

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



TESIS

**EVALUACIÓN DE RIESGO POR MOVIMIENTOS DE MASA PARA LA
ELABORACION DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD EN LA CARRETERA
UBICADA EN EL CERRO LOMAS DEL INDIO. SUCRE- CELENDÍN.**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO GEÓLOGO**

Autor:

Bach. ARANA TANTA ALEX PAÚL

Asesor:

Dr. LAGOS MANRIQUE ALEJANDRO CLAUDIO

Cajamarca – Perú

2024

CONSTANCIA DE INFORME DE ORIGINALIDAD

- FACULTAD DE INGENIERÍA -

1. **Investigador:** ARANA TANTA ALEX PAUL
DNI: 45543616
ESCUELA PROFESIONAL: INGENIERÍA GEOLÓGICA
2. **Asesor:** DR. ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE
Facultad: Ingeniería
3. **Grado académico o título profesional**
☐ Bachiller ☒ Título profesional ☐ Segunda especialidad

☐ Maestro ☐ Doctor
4. **Tipo de Investigación:**
☒ Tesis ☐ Trabajo de investigación ☐ Trabajo de suficiencia profesional

☐ Trabajo académico
5. **Título de Trabajo de Investigación:**
EVALUACIÓN DE RIESGO POR MOVIMIENTOS DE MASA PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD EN LA CARRETERA UBICADA EN EL CERRO LA LOMA DEL INDIO. SUCRE- CELENDÍN
6. **Fecha de evaluación:** 29-11-2024
7. **Software antiplagio:** ☒ TURNITIN ☐ URKUND (OURIGINAL) (*)
8. **Porcentaje de Informe de Similitud:** 14%
9. **Código Documento:** oid: 3117:410510273
10. **Resultado de la Evaluación de Similitud:** 14%

☒ APROBADO ☐ PARA LEVANTAMIENTO DE OBSERVACIONES O DESAPROBADO

Fecha Emisión: 02 de diciembre del 2024



Ing. Alejandro C. Lagos Manrique

FIRMA DEL ASESOR
ALEJANDRO CLAUDIO LAGOS MANRIQUE
DNI:09224934

UNIVERSIDAD NACIONAL DE CAJAMARCA
FACULTAD DE INGENIERÍA
UNIDAD DE INVESTIGACIÓN

Dra. Ing. Laura Sofía Bazán Díaz
DIRECTORA

UNIDAD DE INVESTIGACION FI

* En caso se realizó la evaluación hasta setiembre de 2023



Universidad Nacional de Cajamarca

"Norte de la Universidad Peruana"

Fundada por Ley 14015 del 13 de Febrero de 1962

FACULTAD DE INGENIERÍA

Teléf. N° 365976 Anexo N° 1129-1130



ACTA DE SUSTENTACIÓN PÚBLICA DE TESIS.

TÍTULO : "EVALUACIÓN DE RIESGO POR MOVIMIENTOS DE MASA PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD EN LA CARRETERA UBICADA EN EL CERRO LA LOMA DEL INDIO. SUCRE - CELENDÍN."

ASESOR : Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.

En la ciudad de Cajamarca, dando cumplimiento a lo dispuesto por el Oficio Múltiple N° 0235-2025-PUB-SA-FI-UNC, de fecha 26 de mayo de 2025, de la Secretaría Académica de la Facultad de Ingeniería, a los **treinta días del mes de mayo de 2025**, siendo las ocho horas (08:00 a.m.) en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Geológica (Ambiente 4J - 210), de la Facultad de Ingeniería se reunieron los Señores Miembros del Jurado Evaluador:

Presidente : Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Vocal : M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Secretario : M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.

Para proceder a escuchar y evaluar la sustentación pública de la tesis titulada "EVALUACIÓN DE RIESGO POR MOVIMIENTOS DE MASA PARA LA ELABORACIÓN DEL MAPA DE SUSCEPTIBILIDAD EN LA CARRETERA UBICADA EN EL CERRO LA LOMA DEL INDIO. SUCRE - CELENDÍN", presentado por el Bachiller en Ingeniería Geológica **ALEX PAUL ARANA TANTA**, asesorado por el Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique, para la obtención del Título Profesional

Los Señores Miembros del Jurado replicaron al sustentante debatieron entre sí en forma libre y reservada y lo evaluaron de la siguiente manera:

EVALUACIÓN PRIVADA :04..... PTS.
EVALUACIÓN PÚBLICA :11..... PTS.
EVALUACIÓN FINAL :15..... PTSQuineo (En letras)

En consecuencia, se lo declara **APROBADO** con el calificativo deQuineo..... acto seguido, el presidente del jurado hizo saber el resultado de la sustentación, levantándose la presente a las09:00 am... horas del mismo día, con lo cual se dio por terminado el acto, para constancia se firmó por quintuplicado.

Dr. Ing. Crispín Zenón Quispe Mamani.
Presidente

M.Cs. Ing. Roberto Severino Gonzales Yana.
Vocal

M.Cs. Ing. Víctor Ausberto Arapa Vilca.
Secretario

Dr. Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique.
Asesor

AGRADECIMIENTO

A Dios, por haberme dado a mis padres, quienes me ayudaron día a día a ser una mejor persona y el profesional que soy ahora.

A mi alma máter, Universidad Nacional de Cajamarca, a mi escuela de Ingeniería Geológica, por permitirme forjar mi carrera en sus aulas.

A mi asesor el Ing. Alejandro Claudio Lagos Manrique por su constante entrega durante la elaboración de la presente tesis.

DEDICATORIA

A mis padres y familiares que me apoyaron, confiaron en mí y nunca me dieron la espalda.

A mis amigos, quienes me han ayudado de una u otra forma a ser mejor persona y mejor profesional.

ÍNDICE DE CONTENIDO

	Pág.
AGRADECIMIENTO.....	i
DEDICATORIA.....	ii
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiv
RESUMEN	xv
ABSTRACT	xvi
CAPÍTULO I	1
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO II	3
MARCO TEÓRICO.....	3
2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS.....	3
2.1.1. Internacionales	3
2.1.2. Nacionales.....	4
2.2. BASES TEÓRICAS	5
2.2.1. Movimientos en masa (MM)	5
2.2.1.1. Factores condicionantes.....	6
2.2.1.1.1. Estructuras geológicas	6
2.2.1.1.2. Litología.....	6
2.2.1.1.3. Geomorfología.....	7
2.2.1.1.4. Clima	7
2.2.1.1.5. Hidrogeología	7
2.2.1.2. Factores desencadenantes	7
2.2.1.2.1. Precipitación	7
2.2.1.2.2. Sismicidad	8
2.2.1.2.3. Actividad volcánica.....	8
2.2.1.2.4. Actividad antrópica	8
2.2.2. Tipos de movimientos en masa.....	8
2.2.2.1. Caídas	9
2.2.2.2. Derrumbes.....	10

	Pág.
2.2.3.3. Vuelcos.....	11
2.2.2.4. Deslizamiento	12
2.2.2.4.1. Deslizamientos lentos.....	14
2.2.2.4.2. Deslizamientos rápidos	14
2.2.2.4.3. Deslizamiento rotacional	14
2.2.2.4.4. Deslizamiento traslacional	15
2.2.5.10. Flujos.....	21
2.2.5.11. Movimientos complejos	22
2.2.5.12. Flujos.....	23
2.2.5.13. Reptación de suelos	24
2.2.5.14. Erosión de laderas.....	25
2.2.5.15. Cárcavas	27
2.2.5.16. Otros peligros	28
2.2.7. Herramientas y técnicas para la evaluación de peligros.....	30
2.2.8. Percepción remota	31
2.2.9. Cartografiado geológico y topográfico	31
2.2.10. Sistema de Información Geográfica (SIG).....	32
2.2.11. Peligros geológicos	32
2.2.11.2. Peligro	32
2.2.11.3. Evaluación del riesgo	33
2.2.11.4. Preparación de Mapas de susceptibilidad	34
2.2.11.5. Riesgo	34
2.2.11.6. Factores de amenaza y factores de riesgo.....	35
2.2.11.7. Medidas y tipos de riesgos	35
2.2.11.8. Amenaza/peligro	36
2.2.11.9. Gestión de riesgo de desastres	36
2.2.11.10. Susceptibilidad	36
2.2.11.11. Zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por MM.....	37
2.2.11.12. Preparación de Mapas de susceptibilidad	38
2.2.11.13. Impacto de los deslizamientos	39
2.2.11.14. Las fuerzas que afectan a los deslizamientos	39
2.2.11.15. Fuerzas desestabilizantes (FD).....	40

	Pág.
2.2.12. Heurístico o Empírico	40
2.2.13. Medidas de dispersión.....	40
2.2.14. Método Probabilístico	41
2.2.15. Análisis Estadístico Univariado o Divariado	41
2.2.16. Matriz de Jerarquías Múltiples (MJM).....	42
2.2.17. Coeficiente de Consistencia (RC)	42
2.2.18. Definición y estratificación de los niveles de riesgo.....	42
2.2.19. Método Multicriterio	43
2.2.19.1. Proceso de análisis jerárquico.....	43
2.2.19.2. Cálculo de los pesos ponderados	43
2.2.19.3. Cálculo de la Relación de Consistencia (RC).....	44
2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS.....	45
CAPÍTULO III	47
MATERIALES Y MÉTODOS	47
3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA.....	47
3.2. ACCESIBILIDAD	48
3.3. CLIMA	48
3.4. VEGETACIÓN.....	49
3.5. FAUNA	49
3.6. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	50
3.6.1. Tipo, nivel, diseño y método de la investigación	50
3.6.1.1. Tipo de investigación.....	50
3.6.1.2. Nivel de investigación.....	50
3.6.1.3. Diseño de investigación.....	50
3.6.1.4. Método de investigación.....	50
3.6.1.5. Población de estudio	50
3.6.1.6. Muestras.....	50
3.6.1.7. Unidad de análisis	50
3.7. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	50
3.7.1. Técnicas	50
3.7.2. Instrumentos y equipos	51
3.8. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS	52

	Pág.
3.9. GEOLOGÍA LOCAL.....	52
3.9.1. Cretácico Inferior	52
3.9.1.1. Formación Pariatambo (Ki- pa)	52
3.9.2. Cretácico Superior.....	52
3.9.2.1. Formación Yumagual (Ks- yu).....	52
3.9.3. Cuaternario	53
3.9.3.1. Depósitos fluviales (Qh-fl)	53
3.9.4. Geología estructural	54
3.10. GEOMORFOLOGÍA	54
3.10.1. Laderas fuertemente empinadas.....	54
3.10.2. Laderas empinadas.....	55
3.10.3. Colinas	55
3.10.4. Lomadas	55
3.10.5. Valle	56
CAPÍTULO IV	57
ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	57
4.1. CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	57
4.1.1. Características geológicas	57
4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE MASA IDENTIFICADOS	58
4.2.1. Delimitación del área de influencia relacionada a los MM.....	64
4.2.2. Identificación de parámetros de evaluación	64
4.2.3. Magnitud de las zonas inestables	64
4.2.3.1. Determinación de la ponderación del área de influencia.....	64
4.2.3.2. Determinación de la matriz de normalización del área de influencia	65
4.2.3.3. Determinación del Índice de consistencia	65
4.2.3.4. Determinación del IC y RC.....	67
4.3. SUSCEPTIBILIDAD DE LA ZONA DE ESTUDIO ANTE LOS MM.....	68
4.3.1. Factores condicionantes	69
4.3.1.1. Ponderación de los factores condicionantes	69
4.3.1.2. Normalización de los factores condicionantes	69
4.3.1.3. Determinación del IC y RC.....	70
4.3.1.4. Factor litológico	71

	Pág.
4.3.1.4.1. Ponderación del Factor litológico	71
4.3.1.4.2. Determinación de la normalización del factor litológico	71
4.3.1.4.3. Determinación del IC y RC del factor litológico	72
4.3.1.5. Factor de pendiente	73
4.3.1.5.1. Ponderación del Factor de pendientes	73
4.3.1.5.2. Determinación de la normalización del factor litológico	74
4.3.1.5.3. Determinación del IC y RC del factor pendiente.....	74
4.3.1.6. Factor geomorfológico	76
4.3.1.6.1. Ponderación del Factor geomorfológico	76
4.3.1.6.2. Normalización del factor geomorfológico	76
4.3.1.6.3. Determinación del IC y RC	76
4.3.1.7. Factor de cobertura vegetal	78
4.3.1.7.1. Ponderación del Factor cobertura vegetal.....	78
4.3.1.7.2. Normalización del factor geomorfológico	79
4.3.1.7.3. Determinación del IC y RC	79
4.3.2. Factores desencadenantes	80
4.3.2.1. Ponderación del Factor umbrales de precipitación	80
4.3.2.2. Determinación ponderación del factor de umbrales de precipitación	82
4.3.2.3. Determinación normalización del factor de umbrales de precipitación.....	83
4.3.2.4. Determinación del IC y RC.....	84
4.4. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE LA ZONA DE LA CARRETERA LOMAS DEL INDIO	85
4.4.1. Análisis de vulnerabilidad.....	86
4.4.1.2. Normalización del factor de exposición socio- económicas	86
4.4.1.3. Determinación del IC y RC.....	87
4.4.2. Definición del escenario	88
4.4.3. Determinación de los niveles de peligro.....	88
4.4.4. Cálculo de la susceptibilidad	90
4.4.5. Cálculo del peligro.....	90
4.4.5.1 Determinación de los rangos de peligro	91
4.4.6. Determinación de la vulnerabilidad	91
4.4.6.1. Determinación de los rangos de vulnerabilidad	91
4.4.7. Evaluación del nivel de riesgo de la Carretera Lomas del indio	91

	Pág.
4.4.7.1. Cálculo de los niveles de riesgo contra MM	92
4.4.7.2. Determinación de los rangos de riesgo contra MM	94
4.4.8. Contrastación de la hipótesis	95
CAPÍTULO V	96
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	96
5.1. CONCLUSIONES	96
5.2. RECOMENDACIONES	97
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	98
ANEXOS	104
PANEL FOTOGRÁFICO	105

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Esquemas de tipos de movimientos de los bloques realizan sobre el talud dependiendo de su pendiente y su origen.	10
Figura 2 Esquema de derrumbe.	11
Figura 3 Esquema de vuelco.	12
Figura 4 Partes de un deslizamiento.	13
Figura 5 Tipos de deslizamientos rotacionales.	15
Figura 6 Tipos de deslizamientos de acuerdo con el mecanismo de ruptura	17
Figura 7 Detalles a analizar en un deslizamiento.	20
Figura 8 Esquema de flujos canalizados y no canalizados.	23
Figura 9 Esquema de flujos de lodos.	24
Figura 10 Esquema de reptación superficial.	25
Figura 11 Esquema de erosión de laderas.	26
Figura 12 Movimientos de flujo.	26
Figura 13 Etapa de formación de cárcavas.	27
Figura 14 Signos para reconocer un problema de deslizamientos.	29
Figura 15 Aspectos fundamentales para el análisis de susceptibilidad.	31
Figura 16 Tipos de Peligros.	33
Figura 17 Mapas de susceptibilidad de deslizamientos y caídas de rocas.	38
Figura 18 Representación de fuerzas resistentes y fuerzas desestabilizantes	39
Figura 19 Ubicación del área de estudio.	47
Figura 20 Vegetación presente en zona de estudio, donde predomina bosques de eucalipto, pastos naturales y variedad de plantas menores.	49
Figura 21 Afloramiento de la Formación Yumagual; intercalación de calizas y limoarcillitas. Foto tomada en el Km 6+740 de la carretera Lomas del Indio.	53
Figura 22 Depósitos fluviales. Foto tomada en el tramo final de la Carretera Lomas del Indio.	53
Figura 23 Falla inversa Lomas del Indio que se encuentra afectando a la Formación Yumagual.	54
Figura 24 Ladera empinada. Foto tomada cerca al Km 7+960 de la carretera Lomas del Indio	55

	Pág
Figura 25 Lomada de forma suave. Foto tomada en el Km 8 de la carretera	
Lomas del Indio	56
Figura 26 Valle que se ubica en la parte baja de la zona de estudio.	56
Figura 27 Porcentaje afloramientos rocosos en el área de estudio. Formación	
Yumagual y Pariatambo vs depósitos cuaternarios.....	57
Figura 28 Descripción del movimiento de masa (MM1)	59
Figura 29 Descripción del movimiento de masa (MM2)	60
Figura 30 Descripción del movimiento de masa (MM3)	61
Figura 31 Descripción del movimiento de masa (MM4)	62
Figura 32 Descripción del movimiento de masa (MM5)	63
Figura 33 Determinación de la susceptibilidad	68
Figura 34 Determinación del riesgo mediante la vulnerabilidad y el peligro	92

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1: Clasificación de movimientos en masa.....	9
Tabla 2 Tamaño de deslizamientos por área en proyección horizontal.....	21
Tabla 3 Detalles que indican actividad o inactividad de deslizamientos.....	30
Tabla 4 Ejemplo de cálculo de ponderación.....	41
Tabla 5 Valores para el cálculo de la relación de consistencia.	42
Tabla 6 Valores y niveles de riesgo.....	43
Tabla 7 Acceso a la zona de estudio.....	48
Tabla 8 Cuadro climatológico de la región de Cajamarca	48
Tabla 9 Porcentaje de afloramientos rocosos en la zona de estudio	57
Tabla 10 ubicación de los MM.....	58
Tabla 11 Área de movimiento de masa.....	64
Tabla 12 Ponderación de la magnitud del área de influencia	64
Tabla 13 Matriz de normalización.....	65
Tabla 14 Producto de la primera columna con el peso de la primera fila	65
Tabla 15 Producto de la segunda columna con el peso de la segunda fila.....	65
Tabla 16 Producto de la tercera columna con el peso de la tercera fila	66
Tabla 17 Producto de la cuarta columna con el peso de la cuarta fila	66
Tabla 18 Producto de la quinta columna con el peso de la quinta fila.....	66
Tabla 19 Suma ponderada de $a*b$	66
Tabla 20 Determinación del λ_{max}	67
Tabla 21 Valores para el cálculo de la relación de consistencia.	67
Tabla 22 Índice de consistencia y relación de consistencia	68
Tabla 23 Ponderación de los factores condicionantes	69
Tabla 24 Matriz de normalización de pares de los factores condicionantes.....	69
Tabla 25 Valores para el cálculo de la relación de consistencia.	70
Tabla 26 Índice de consistencia y relación de consistencia	70
Tabla 27 Tabla de ponderación del factor litológico	71
Tabla 28 Matriz de normalización del Factor litológico.....	71
Tabla 29 Determinación del λ_{max}	72
Tabla 30 Valores para el cálculo de la relación de consistencia.	72
Tabla 31 Índice de consistencia y relación de consistencia	73
Tabla 32 Elaboración de la Ponderación del Factor de pendientes	73

	Pág.
Tabla 33 Matriz de normalización del Factor pendiente	74
Tabla 34 Determinación del λ_{max}	74
Tabla 35 Valores para el cálculo de la relación de consistencia.	75
Tabla 36 Índice de consistencia y relación de consistencia	75
Tabla 37 Elaboración de la Ponderación del Factor de pendientes	76
Tabla 38 Matriz de normalización del Factor geomorfológico	76
Tabla 39 Determinación del λ_{max}	77
Tabla 40 Valores para el cálculo de la relación de consistencia	77
Tabla 41 Índice de consistencia y relación de consistencia	78
Tabla 42 Elaboración de la Ponderación del Factor de cobertura vegetal	78
Tabla 43 Matriz de normalización del Factor de cobertura vegetal	79
Tabla 44 Determinación del λ_{max}	79
Tabla 45 Valores para el cálculo de la relación de consistencia	80
Tabla 46 Índice de consistencia y relación de consistencia	80
Tabla 47 Umbrales de precipitación de la Estación Celendín. Región Cajamarca.....	81
Tabla 48 Elaboración de la Ponderación del Factor de cobertura vegetal	82
Tabla 49 Matriz de normalización del factor de umbrales de precipitación	83
Tabla 50 Determinación del λ_{max}	84
Tabla 51 Valores para el cálculo de la relación de consistencia	84
Tabla 52 Índice de consistencia y relación de consistencia	85
Tabla 53 Elaboración de la Ponderación del Factor de cobertura vegetal	86
Tabla 54 Matriz de normalización del factor de umbrales de precipitación	86
Tabla 55 Determinación del λ_{max}	87
Tabla 56 Valores para el cálculo de la relación de consistencia	87
Tabla 57 Índice de consistencia y relación de consistencia	88
Tabla 58 Factores condicionantes y desencadenante	89
Tabla 59 Cálculo de la susceptibilidad	90
Tabla 60 Calculo del Peligro.....	90
Tabla 61 Rangos de peligro	91
Tabla 62 Determinación del grado de vulnerabilidad	91

	Pág.
Tabla 63 Determinación de los rangos de vulnerabilidad	91
Tabla 64 Niveles de riesgo por MM en la Carretera Lomas del Indio.....	92
Tabla 65 Determinación de los rangos de riesgo	94
Tabla 66 Estratificación de los niveles de riesgo de la carrera Lomas del Indio...	94

LISTA DE ABREVIATURAS

m	:	Metro
cm	:	Centímetro
mm	:	Milímetro
msnm	:	Metros sobre el nivel de mar
h	:	Hora
Km	:	kilómetro
S	:	Sur
N	:	Norte
E	:	Este
O	:	Oeste
NE	:	Noreste
NO	:	Noroeste
SE	:	Sureste
SO	:	Suroeste
GPS	:	Global Positioning System
UTM	:	Universal Transversal Mercator
MM	:	Movimiento de masa
INGEMMET	:	Instituto Geológico Minero Metalúrgico
SENAMHI	:	Servicio Nacional de meteorología e hidrología

RESUMEN

En la carretera Lomas del Indio, localizada en el cerro del mismo nombre y que constituye un desvío desde la localidad de Cajamarca hacia el Distrito de Jorge Chávez en la Provincia de Celendín, se ha determinado que existen zonas susceptibles a Movimientos de masa (MM), lo cual supone posibles riesgos a la población aledaña. En este sentido se plantea la presente investigación, que se enfoca en determinar los factores condicionantes a los MM y generar un plano de susceptibilidad. A partir de información recopilada en campo se determina que los factores que condicionan los Movimientos de masa son en el siguiente orden: litológico, pendiente y cobertura vegetal donde se tiene, por otro lado la acción de la falla inversa Lomas del Indio, que cruza esta zona, generó condiciones para que se produzca una intensa meteorización de las rocas y por consiguiente se produzcan los MM; está comprendido dentro del Factor litológico. Se elaboró el mapa de susceptibilidad de la carretera Lomas del Indio en donde se identifica que la zona que posee una muy alta susceptibilidad está ubicada muy cerca a la Falla Lomas del indio. Dentro de los movimientos de Masa (MM) identificados, son los deslizamientos (03), caída de rocas (01) y flujo de detritos (01), el factor desencadenante será un evento de precipitación anómalo llamado por SENAMHI (2014) como umbral de precipitación que para la Estación de Celendín que determina que los umbrales de precipitación, si se presenta lluvias extremas sobre encima de estos umbrales y durante varios días se desencadenaría los MM sobre todo en depósitos de arcillitas calcáreas, calizas y margas que se presentan en la zona de estudio muy meteorizadas y alteradas.

Palabras claves: Umbral de precipitación, riesgo, susceptibilidad, percentil.

ABSTRACT

On the Lomas del Indio highway, located on the hill of the same name and which constitutes a detour from the town of Cajamarca to the Jorge Chávez District in the Celendín Province, it has been determined that there are areas susceptible to mass movements (MM), which pose possible risks to the surrounding population. In this sense, the present investigation is proposed, which focuses on determining the factors that condition the MM and generating a susceptibility plan. From information collected in the field, it is determined that the factors that condition the mass movements are in the following order: lithological, slope and vegetation cover where it is had, on the other hand, the action of the Lomas del Indio reverse fault, which crosses this area, generated conditions for an intense weathering of the rocks to occur and consequently the MM to occur; it is included within the lithological factor. The susceptibility map of the Lomas del Indio highway was prepared, where it is identified that the area that has a very high susceptibility is located very close to the Lomas del Indio Fault. Within the Mass Movements (MM) identified, are the landslides (03), rock fall (01) and debris flow (01), the triggering factor will be an anomalous precipitation event called by SENAMHI (2014) as precipitation threshold for the Celendín Station that determines the precipitation thresholds, if extreme rains occur above these thresholds and for several days, MM would be triggered especially in deposits of calcareous clays, limestones and marls that are present in the study area very weathered and altered.

Key words: precipitation threshold, risk, susceptibility, percentile.

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

La carretera Loma del Indio, se ubica en el cerro del mismo nombre, esta vía está construido sobre rocas calcáreas de edad cretácicas. Constituye una vía de acceso importante desde la ciudad de Cajamarca hacia la localidad de Sucre. La carretera principal une la ciudad de Cajamarca con la localidad de Sucre: es Cajamarca-Celendín- Sucre, mientras que la vía alternativa es Cajamarca- Loma del Indio-Sucre. Así mismo en épocas de intensas lluvias, la localidad de Sucre frecuentemente es inundada en sus partes bajas afectando y por lo tanto gran tramo de la carretera que comunica con las ciudades de Celendín y Cajamarca, por lo que la carretera de Lomas del Indio es utilizada como única alternativa para realizar dicha comunicación vial. Por tal motivo es importante que esta vía esté, siempre, en buen estado. Además, se ha notado que en varios tramos existen movimientos de masa que interrumpen el tránsito, además existen muchas fracturas en los taludes lo que podrían generar caídas de rocas interrumpir el tránsito y causar accidentes. Por todo lo explicado se deduce que es necesario realizar una evaluación geológica para determinar las posibles zonas inestables. Para esta evaluación necesario confeccionar diversos mapas como: el tectónico, litológico, de pendientes con ellos confeccionar el mapa de susceptibilidad a los MM en donde se identificarán y representarán las zonas de riesgo asociados a un determinado peligro natural.

Por lo que se formula la siguiente interrogante ¿Cuál es el resultado de la evaluación geológica para la identificación de los movimientos de masa en la carretera ubicada en el Cerro Loma del indio, Sucre- Celendín?; ¿Cuáles son las zonas más susceptibles a los movimientos en masa en la carretera ubicado en el cerro Loma del Indio, Sucre- Celendín? y ¿cuáles son los factores condicionantes para la generación de los movimientos de masa en la carretera ubicado en el cerro Loma del Indio?

Dentro de los objetivos se plantea: Realizar la evaluación geológica para la elaboración del mapa de susceptibilidad a los movimientos de masa en la carretera

ubicada en el cerro Loma del Indio. Sucre- Celendín; Confeccionar el mapa de susceptibilidad a los movimientos de masa en la carretera ubicada en el cerro Loma del Indio; mediante el análisis del mapa de susceptibilidad determinar las zonas más susceptibles a los Movimientos de Masa en la carretera ubicado en el cerro Loma del Indio; mediante el análisis de la superposición de los mapas factores determinar los factores condicionantes a los movimientos de masa en la carretera ubicada en el cerro Loma del Indio; identificar dentro del mapa de susceptibilidad las zonas más susceptibles a los movimientos de masa.

La investigación está conformada por cinco capítulos. Dentro del Capítulo I titulado como Introducción, está la descripción del contenido de los capítulos de la tesis, aquí también se mencionan los objetivos, la hipótesis y el contenido de la tesis. Dentro del Capítulo II, se tiene el Marco Teórico donde se menciona los antecedentes internacionales, nacionales y locales así mismo las bases teóricas que van a ser el sustento teórico en que se basa el trabajo de investigación y finalmente se tiene la Definición de Términos Básicos. Dentro del capítulo III, denominado como Materiales y Métodos están los subcapítulos denominados: Ubicación del área de estudio, La accesibilidad, el clima y la vegetación, la flora y fauna. También se describe el contexto de la investigación, los procedimientos, la metodología, la identificación de las variables, la descripción de las técnicas utilizadas, los instrumentos y los equipos, además en este capítulo se desarrollan los objetivos planteados y se presentan los resultados de la investigación. Dentro del Capítulo IV, denominado Análisis y Discusión de Resultados, están los Resultados de la investigación; los resultados deben estar íntimamente relacionado con los objetivos. Además, está la contrastación de la hipótesis con los resultados obtenidos. Dentro del capítulo V, están las conclusiones y recomendaciones. Las conclusiones están relacionadas con los objetivos planteados. En la parte final se detallan las referencias bibliográficas y los anexos.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES TEÓRICOS

2.1.1. Internacionales

Moreno (2007) en su estudio denominado Deslizamiento de El Mirador, Km 105 Carretera Bogotá- Villavicencio, Colombia, describe detalladamente el origen y evolución de este movimiento desde 1964 hasta 1997, asimismo, determina que este deslizamiento se desencadenó por el proceso erosivo y que removió rocas trituradas en una zona de falla y que de los factores desencadenantes son la fuerte trituración y cizallamiento de las rocas y su exposición por la erosión hídrica. Concluye que el factor detonante fue la fuerte erosión, que no fue controlada por 24 años y que las lluvias mantuvieron activo el deslizamiento por varios años.

Aristizábal et al. (2011) en su estudio denominado Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el valle de Aburrá, Colombia, presenta el análisis de umbrales críticos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el valle de Aburrá, se utilizó una base de datos de precipitación con registros de resolución temporal cada 15 minutos; y se estimó la lluvia acumulada y la lluvia acumulada antecedente (LAA), para cada movimiento en masa. Los resultados obtenidos reflejan que el mayor condicionante para la ocurrencia de movimientos en masa en el valle de Aburrá es la LAA.

Trujillo et al. (2016) en su estudio denominado Evaluación de susceptibilidad por movimientos en masa para la empresa canteras de Colombia S.A.S, realizó un estudio para identificar las zonas de mayor susceptibilidad de movimientos en masa. La información evaluó teniendo en cuenta características como: cartografía base, geología, geomorfología, geofísica, para determinar la influencia de cada factor en la estabilidad de la zona de estudio, realizar análisis semi-cuantitativo de los factores que condicionan la estabilidad del terreno y ocurrencia de movimientos en masa, y poder estimar el grado de susceptibilidad del área.

2.1.2. Nacionales

Ochoa (2010) realiza el estudio Peligros Geológicos en la cuenca alta del Rímac entre Ticlio y Matucana, en este estudio determina cualitativa y cuantitativamente los peligros geológicos existentes en las localidades de Ticlio y Matucana. Concluye que el entorno geográfico de montañas y valles de fuertes pendientes superiores a 30° ha condicionado la erosión y la geodinámica externa en la cuenca alta del río Rímac; reportándose alrededor de 230 peligros geológicos. Para las categorizaciones de susceptibilidad aplicó métodos de evaluación Heurísticos y probabilísticos.

INGEMMET (2021) en el estudio sobre la evaluación de peligros geológicos por movimientos en masa en los sectores Coraguaya y Borogueña. distrito de Ilabaya, provincia Jorge Basadre Grohmann, Región Tacna, INGEMMET, cumple con su función de brindar asistencia técnica de calidad e información actualizada, confiable. En el área de estudio afloran secuencias volcánicas tobáceas medianamente meteorizadas de la Formación Matalaque; secuencias volcánicas tobáceas del Grupo Toquepala, constituida por la Formación Quellaveco, tanto la unidad Inferior y la unidad superior, la primera constituida por tobas andesíticas, las cuales se presentan ligeramente meteorizadas y medianamente fracturadas.

Luque (2018) en su estudio denominado “Peligros geológicos por movimientos en masa en la región Moquegua ” logró Identificar las zonas afectadas por peligros geológicos (Mapas de Peligros y susceptibilidad), determinar zonas críticas, Evaluar la seguridad física de zonas pobladas e infraestructura ante peligros geológicos (medidas de prevención, mitigación, reubicación), Brindar información a GoRe, municipios, para que realicen planes de emergencia, Declarar zonas de emergencia por peligro inminente por peligros geológicos, Sensibilizar a la población sobre los peligro.

2.1.3 Locales

COSUDE (2008) Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación, esta agencia realizó el Proyecto: Gestión de Riesgo de Deslizamiento del Ronquillo, Urubamba y Corisorgona- Levantamiento Geofísico de Georadar, en donde se concluye que los espesores del material arcilloso en los alrededores de la localidad de

Cajamarca, poseen entre 8 a 25 m de espesor y presentan ángulos de arrastre de 45° a más; por ende, lo consideran como zonas de alto riesgo de deslizamientos.

INGEMMET (2011) en el estudio sobre movimientos de masa determina que la región de Cajamarca es muy propensa a sufrir una serie de movimientos de masa. El análisis estadístico efectuado determinó que los deslizamientos predominan con un porcentaje de 36,81%, seguida de caídas de rocas con 22,25%, flujos 17,83% y erosión de laderas 10,25%.

Lagos (2015) realiza el estudio de movimiento de masa en la zona de Urubamba-Cajamarca, en este estudio introduce, por primera vez, el mapa factor tectónico en el análisis de susceptibilidad, además separa las zonas afectadas por edad de tectonismo. Es así que analiza y define que la tectónica Incaica afectó más a las secuencias sedimentarias cretácicas y la tectónica post Incaica afectó levemente a las secuencias volcánicas cenozoicas, de esta manera determina que las secuencias volcánicas cenozoicas son las menos susceptibles a los movimientos de masa.

2.2. BASES TEÓRICAS

2.2.1. Movimientos en masa (MM)

Los Movimientos de masa (MM) son procesos esencialmente gravitatorios, por los cuales una parte de la masa del terreno se desplaza a un nivel inferior de la original. Este tipo de procesos está asociado con las precipitaciones altas y los movimientos originados por las placas tectónicas de la tierra, los cuales son precursoras de los movimientos en masa, aumentando las fuerzas desestabilizadoras y reduciendo la resistencia del suelo al deslizamiento (Trujillo et al. 2016).

Están referidos a un conjunto de procesos de denudación que están relacionados con la deformación del terreno y el desplazamiento más o menos rápida y localizada de diferentes volúmenes de suelo incluyendo material de suelos, detritos, bloques y masas de rocas, cuesta abajo, por incidencia de las fuerzas de desplazamiento (gravedad, movimientos sísmicos), a veces con participación del agua, del hielo y otros agentes. Algunos autores definen a los movimientos en masa los deslizamientos como el movimiento gravitacional hacia el exterior de la ladera y

descendente de tierras o rocas. Sin la ayuda del agua. Como vemos las definiciones adoptadas para movimientos en masa son variados, como fenómenos de remoción en masa; para nosotros se entenderá como peligros geológicos por movimientos en masa, a los procesos de movimiento lento o rápido que involucran roca, suelo o ambos por efectos de la gravedad. Los movimientos en masa (MM) están relacionados a factores condicionantes y desencadenantes, son factores que pueden afectar la remoción de masas en laderas activando el proceso de movimiento de sus masas y rocas en la superficie terrestre. Entre los factores condicionantes, propios de la naturaleza del terreno, están los factores geológicos, los cuales determinan las propiedades del material que predomina en la ladera, como la resistencia según el tipo de suelo y la existencia de fallas o fisuras que afectan directamente al movimiento de masa. Otro factor condicionante es el geomorfológico, el cual tiene como característica la pendiente del terreno y la geometría del talud. Los factores hidrológicos también forman parte de este grupo, debido a que el agua es un elemento que afecta a la resistencia mecánica del suelo y donde también se consideran los factores climáticos, los cuales afectan a la estabilidad de estos materiales. Por otro lado, los factores desencadenantes son externos a las laderas y presentan un comportamiento dinámico en estas.

2.2.1.1. Factores condicionantes

Son factores propios del fenómeno o intrínsecos, de acción estática o pasiva, que representa debilidades inherentes en rocas y suelos en las laderas, entre los factores condicionantes tenemos:

2.2.1.1.1. Estructuras geológicas

Las estructuras geológicas que están afectando a los materiales que constituyen una ladera como: fallas, fracturas, pliegues, planos de estratificación y foliación deben ser considerados porque éstos pueden favorecer o no los procesos de inestabilidad de laderas (Ayala, Carcedo y Olcinas, 2002).

2.2.1.1.2. Litología

Estos son los aspectos más importantes a tener en cuenta para la ocurrencia de movimientos de ladera es de tipo de material que constituya las laderas, sus propiedades químicas y físicas, la resistencia al esfuerzo, grado de meteorización

de los mismos y su forma de evaluación en cada ambiente natural (Mora y Vahrson, 1993).

2.2.1.1.3. Geomorfología

Las características morfométricas como la pendiente, altura, amplitud de la ladera, nos pueden dar una idea del grado de equilibrio de los materiales que la componen (Aguilar y Mendoza, 2002). Por ejemplo, se espera que ocurran movimientos de masa en pendiente moderadas a muy fuertes (Medina,1991).

2.2.1.1.4. Clima

Los procesos climáticos pueden afectar el contenido de humedad de los materiales constituyentes de una ladera (Mora y Vahrson, 1993). Además de contribuir a acelerar la meteorización y disminuir la resistencia mecánica de dichos materiales.

2.2.1.1.5. Hidrogeología

Los parámetros hidrogeológicos como la porosidad, capacidad de drenaje de los materiales, entre otros también influyen en la inestabilidad de laderas, cambios de la presión hidrostática, que pueden ser a la vez factores desencadenante por efecto de lluvias

2.2.1.2. Factores desencadenantes

Factores que tienen una acción activa en la remoción en masas en laderas, que originan la inestabilidad, estas variables que hacen que un movimiento de ladera se active o desencadene aun en laderas en equilibrio. Entre los principales factores desencadenantes se tiene a la precipitación, sismicidad, sobrecarga, excavación. (Villacorta, 2007).

2.2.1.2.1. Precipitación

La frecuencia y tipo de precipitación son factores que desencadenan o reactivan los movimientos de ladera porque al infiltrarse el agua de lluvia y saturarse el terreno pierde capacidad de absorción y puesto que esto implica mayor densidad, mayor presión de poros por contenido de agua y pérdida de cohesión el material falla.

2.2.1.2.2. Sismicidad

La actividad sísmica es un factor significativo en el desencadenamiento o reactivación de movimientos de ladera. Las vibraciones provocadas por sismos pueden ser lo suficientemente fuertes como para originar deslizamientos de diversa magnitud, afectando extensas áreas.

2.2.1.2.3. Actividad volcánica

Los movimientos de ladera pueden estar relacionados con la erupción o con sismos previos a ésta en un volcán. En las primeras etapas de la erupción se depositan flujos piroclásticos, los cuales forman nuevos depósitos o amplían algunos existentes, pudiendo así provocar movimientos de material en las faldas del volcán. En los volcanes nevados, las altas temperaturas producidas por una Erupción funden los depósitos de hielo y nieve, éstos se mezclan con los materiales piroclásticos previamente expulsados de tal manera que generan avalanchas y flujos de lodo que pueden recorrer grandes distancias.

2.2.1.2.4. Actividad antrópica

Las actividades humanas en muchos casos han desencadenado la ocurrencia de movimientos de ladera. Un claro ejemplo es el caso ocurrido el 12 de enero del 2007 en Sao Paulo (Brasil), que, por la ejecución de obras subterráneas de ampliación del Metro, las paredes de la obra se hundieron dejando un socavón de cuarenta metros de profundidad. Asimismo, la extracción de materiales para la construcción o la sobrecarga en una ladera debida a la urbanización o la mala disposición de depósitos de acumulación de residuos sólidos, son cambios bruscos en la topografía de un área que pueden desencadenar un movimiento de ladera.

2.2.2. Tipos de movimientos en masa

Según International Association of Engineering and Environment (IAEG) los movimientos en masa se clasifican con base en el tipo de movimiento y al material involucrado, lo cual genera todo un sistema de eventos. Para la clasificación de los movimientos en masa se presenta el sistema propuesto originalmente por (Varnes, 1978):

Tabla 1: Clasificación de movimientos en masa.

Tipos de movimientos	Tipos de Material		
	Roca	Suelos ingenieriles	
		Detritos Predominantemente Granular (<80%arena y más fina)	Tierra Predominantemente fina (>80% arena y más fino)
Caídas	Caída de roca	Caída de detritos	Caída de tierra
Vuelcos	Vuelcos de rocas	Vuelco en suelo granular	Vuelco en suelo cohesivo
Deslizamiento	Deslizamiento de roca	Deslizamiento de detritos	Derrumbe de tierra Desplazamiento de tierra
Flujos	Flujo de roca Reptación de Roca	Flujo de detritos	Flujo húmedo de arena y limo
		Avalancha	Flujo rápido de tierra
		Reptación de suelos	Flujo loess
		Solifluxión	Flujo seco de arena
Complejo	Combinación de dos o más de los principales tipos de movimientos		

Fuente: Varnes, (1978).

2.2.2.1. Caídas

Son movimientos rápidos de una masa rocosa, de cualquier tamaño, se arranca de un talud empinado o un acantilado, y desciende a través del aire por caída libre, saltos, rodando. La separación ocurre a lo largo de discontinuidades como fracturas, fallas y planos de estratificación. Estos movimientos son muy rápidos. Las caídas son influenciadas por la gravedad, intemperismo mecánico, y la presencia de agua intersticial. Se pueden diferenciar dos tipos de movimientos:

Caída de roca (detritos o suelo): Fenómenos que presentan una ruptura brusca de un bloque o una masa rocosa o de suelo, de una ladera con talud de pendiente fuerte o un acantilado rocoso, con una caída libre donde el mayor recorrido de su desplazamiento se da en el medio aéreo, se producen en rocas muy fracturadas, debido a factores desencadenantes como lluvias intensas, sismos, erosiones, socavamiento y explosiones. Las caídas de rocas son Desprendimientos o caídas de rocas que ocurren en materiales no compactos y semi- compactos, como también en roca o suelo cementados con pendientes mayores a 40°.

Según Varnes (1978), son movimientos que consisten en el desplazamiento de bloques de roca por efecto de la gravedad a lo largo de pendientes empinadas, cuyos movimientos dependiendo de la pendiente del talud pueden ser del tipo caída libre, saltos, rodamiento o deslizamiento.

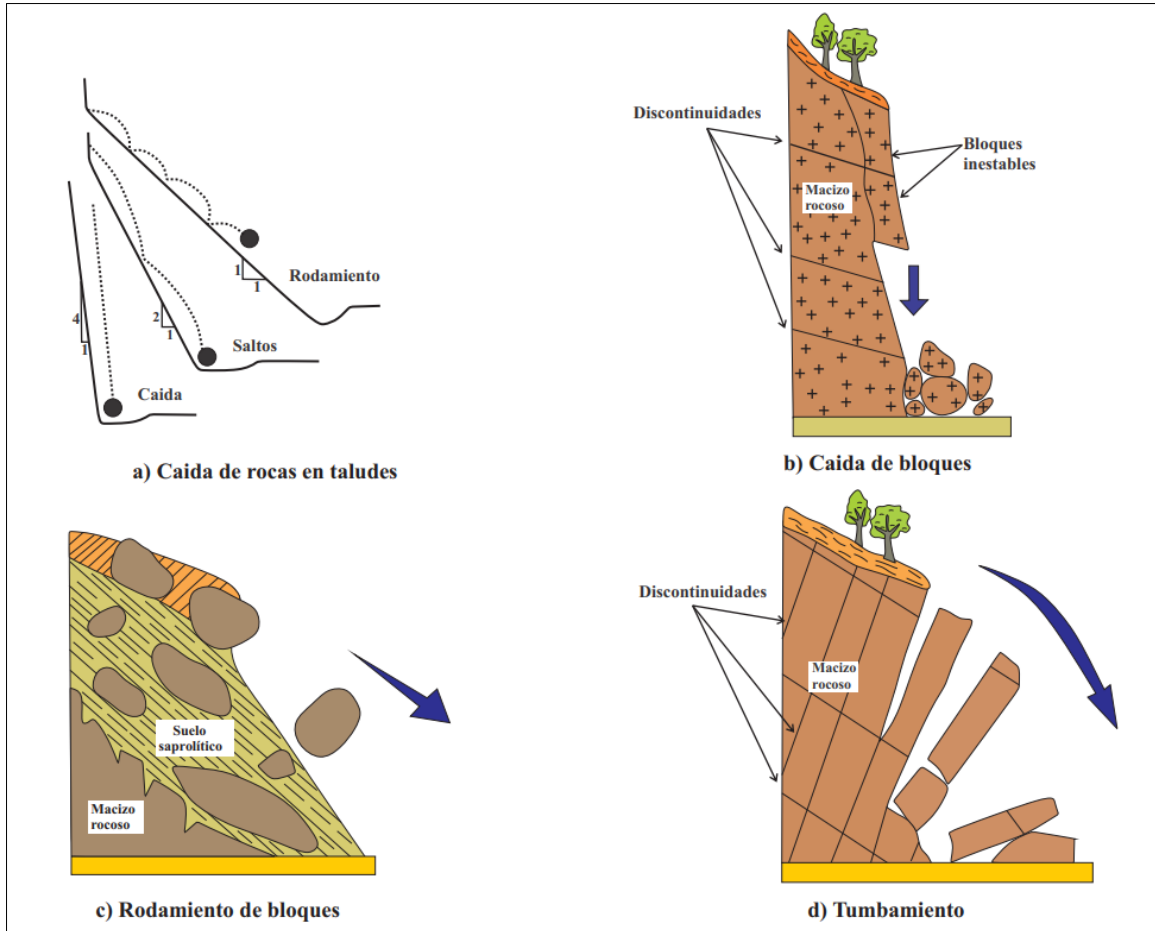


Figura 1 Esquemas de los tipos de movimientos de los bloques realizan sobre el talud dependiendo de su pendiente y su origen.

Fuente: Varnes, (1978).

2.2.2.2. Derrumbes

Es la disgregación generalmente de roca, que forma en la base un depósito caótico de material grueso, es producido por el socavamiento de la base de riveras fluviales, áreas costeras, acantilados rocosos, en laderas de moderada a fuerte pendiente, por acción de lluvias, movimientos sísmicos y antrópica (cortes de carreteras o áreas agrícolas).

El deslizamiento o derrumbe, es un fenómeno de la naturaleza. Se desarrollan cuando el agua se acumula rápidamente en el suelo, a raíz de lluvia intensa o deshielos rápidos, convirtiendo el terreno en un río de barro. El barro puede fluir rápidamente por una ladera o quebradas y ataca con poco o sin aviso, a gran velocidad. El río de barro puede viajar muchos kilómetros desde su origen, aumentando de tamaño a medida que arrastra árboles, autos y otros elementos en el camino. Los derrumbes generalmente se repiten en lugares donde ya han sucedido antes.

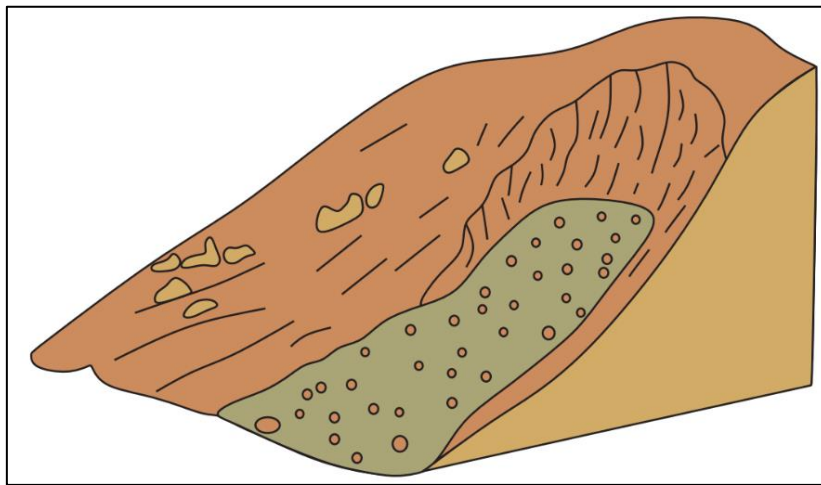


Figura 2 Esquema de derrumbe.

Fuente: Varnes, (1978).

2.2.3.3. Vuelcos

Son movimientos debido a fuerzas que causan un movimiento de rotación alrededor de un punto de giro localizado en un punto inferior, bajo la acción de la gravedad y fuerzas ejercidas por unidades adyacentes, se consideran que se producen exclusivamente en rocas, condicionados por la disposición estructural de los estratos contra el talud y/o un sistema de discontinuidades bien desarrollado.

Se conoce como vuelco de rocas al tumbamiento de una columna de roca en una ladera o pared natural. Los vuelcos se dan cuando una masa de rocas rota cae hacia adelante (cuesta abajo). Una vez que la inclinación es suficiente ocurre una ruptura que desprende a la masa de roca dando paso a su caída y fragmentación. El desprendimiento es a veces posible debido a la ocurrencia de fracturas preexistentes. Una causa de vuelco de rocas es la socavación por erosión o

meteorización de la base de una columna. Otras causas pueden ser un empuje gradual al vuelco debido a cambios de volumen de materiales ricos en arcilla o el sobre-empinamiento de la ladera debido a la erosión.

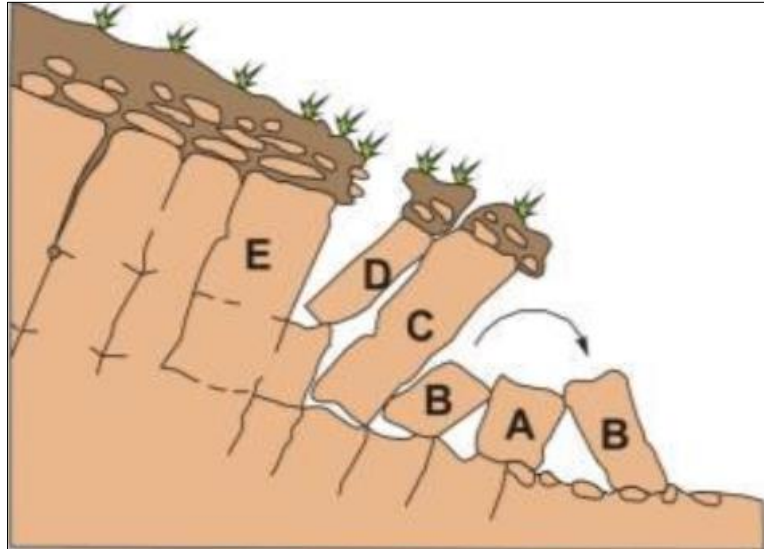


Figura 3 Esquema de vuelco.

Fuente: Varnes, (1978).

2.2.2.4. Deslizamiento

Consiste de una deformación por corte y desplazamiento a lo largo de una o varias superficies visibles o que pueden inferirse, dentro de una zona más o menos estrecha. Los deslizamientos de tierra son causados por alteraciones en el equilibrio natural de una pendiente. Pueden ocurrir durante lluvias torrenciales o producirse luego de sequías, terremotos o erupciones volcánicas. Se denomina también como el movimiento de masa rocosa o de los suelos por la pérdida de la estabilidad que puede ser por la saturación de agua, presencia de materiales arcillosos que actúan como lubricantes, fuertes inclinaciones de las vertientes y otras causas. La acción humana puede acelerar muchas veces el proceso de deslizamiento por la utilización sin el estudio adecuado de las áreas de posible de deslizamiento. Este movimiento consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies. El movimiento puede ser progresivo, o sea, que no se inicia simultáneamente al largo de toda la superficie de falla. Los deslizamientos pueden ser de una sola masa que se mueve, o pueden comprender varias unidades

o masas semiindependientes (Suárez, 1998). Los deslizamientos se dividen en dos subtipos, de acuerdo con el mecanismo de ruptura:

Este movimiento consiste en un desplazamiento de corte a lo largo de una o varias superficies, que pueden detectarse fácilmente o dentro de una zona relativamente delgada (Figura 4). El movimiento puede ser progresivo, o sea, que no se inicia simultáneamente a lo largo de toda, la que sería, la superficie de falla. Los deslizamientos pueden ser de una sola masa que se mueve o pueden comprender varias unidades o masas semi-independientes. Los deslizamientos pueden obedecer a procesos naturales o a desestabilización de masas de tierra por el efecto de cortes, rellenos y deforestación.

No todos los deslizamientos de tierra son rápidos. Algunos deslizamientos de tierra son lentos, se detienen y vuelven a empezar, y no avanzan más de tres pies por año. Aunque estos deslizamientos de tierra pocas veces causan pérdidas de vidas humanas, pueden causar daños al terreno y la propiedad con el tiempo.

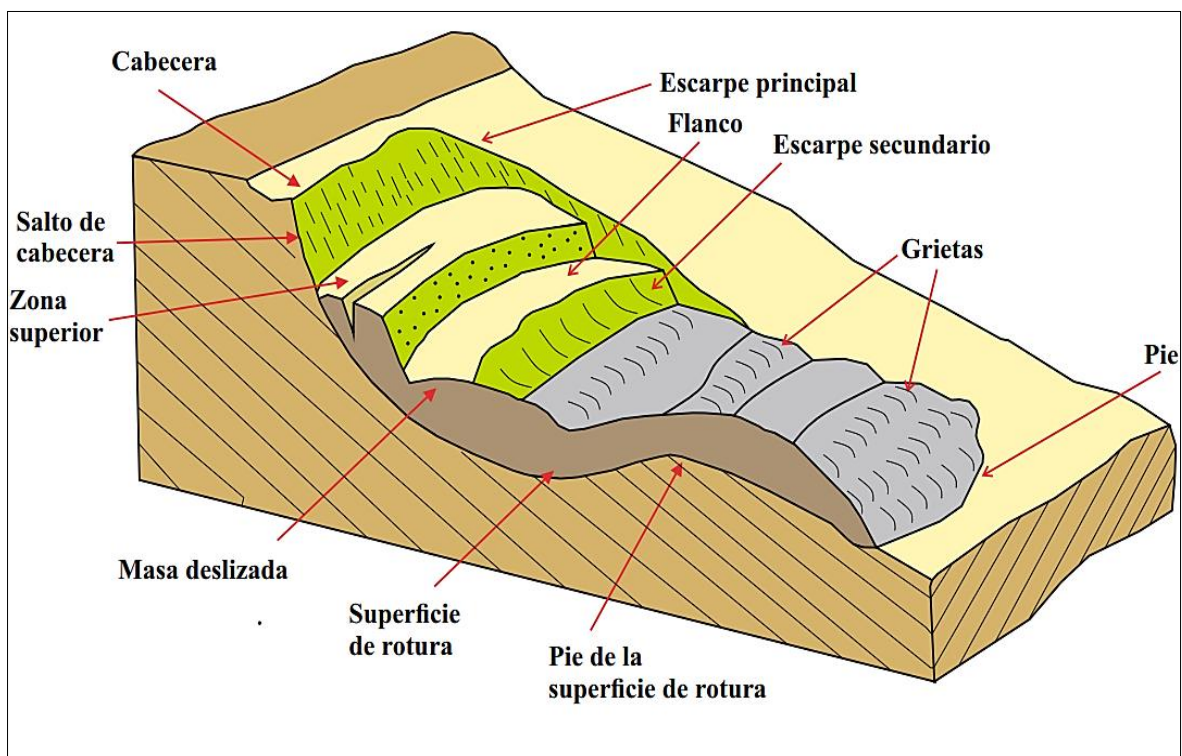


Figura 4 Partes de un deslizamiento.

Fuente: Varnes, (1978).

Los deslizamientos se pueden a su vez dividir en dos subtipos denominados deslizamientos rotacionales y traslacionales o planares. Esta diferenciación es importante porque puede definir el sistema de análisis y estabilización a emplearse. Existen dos tipos de deslizamientos o derrumbes:

2.2.2.4.1. Deslizamientos lentos

Son aquellos donde la velocidad del movimiento es tan lenta que se percibe cuando ha ocurrido varias veces en el mismo lugar. Este tipo de deslizamiento se puede mirar de manera tal que frecuentemente arrastran parte de la capa vegetal, sólo es un pequeño desprendimiento de tierra y muy lento.

2.2.2.4.2. Deslizamientos rápidos

Son aquellos donde la velocidad del movimiento es tal que la caída de toda la tierra o las rocas puede darse en pocos minutos o segundos. Son frecuentes durante las épocas de lluvias o actividades sísmicas intensas. Como son difíciles de identificar, ocasionan importantes pérdidas materiales y personales.

2.2.2.4.3. Deslizamiento rotacional

Se produce a lo largo de una superficie de ruptura de forma circular o semicircular y cóncava hacia arriba, su velocidad varía de lenta a moderada, teniendo gran influencia la inclinación de la superficie de ruptura en el pie del deslizamiento, se puede producir en rocas muy fracturadas, detritos y suelo. En un deslizamiento rotacional la superficie de falla es formada por una curva cuyo centro de giro se encuentra por encima del centro de gravedad del cuerpo del movimiento, Visto en planta el deslizamiento posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El movimiento produce un área superior de hundimiento y otra inferior de deslizamiento generándose comúnmente, flujos de materiales por debajo del pie del deslizamiento. En muchos deslizamientos rotacionales se forma una superficie cóncava en forma de “cuchara”. Generalmente, el escarpe debajo de la corona tiende a ser semivertical, lo cual facilita la ocurrencia de movimientos retrogresivos. El movimiento, aunque es curvilíneo no es necesariamente circular, lo cual es común en materiales residuales donde la resistencia al corte de los materiales aumenta con la profundidad. La rotura se produce a lo largo de una superficie curvilínea y cóncava. El terreno experimenta un giro según un eje situado por encima del centro de gravedad de la masa

deslizada. El material de cabecera efectúa una inclinación contra ladera, generando depresiones donde se acumula el agua e induce nuevas reactivaciones. Este tipo de mecanismo es característico de suelos cohesivos homogéneos y de macizos rocosos intensamente fracturados. En materiales arcillosos, especialmente si hay presencia de agua, el pie puede evolucionar hacia un deslizamiento de tierras o colada de tierras. Posee una serie de agrietamientos concéntricos y cóncavos en la dirección del movimiento. El deslizamiento rotacional presenta en su parte superior hundimientos y en su parte inferior se producen flujos de materiales que se acumulan en la pata de la ladera o son transportados (Suárez, 1998). El deslizamiento rotacional está principalmente asociado con pendientes entre 20 y 40 grados y su relación profundidad-longitud, es del orden de 0.3 a 0.1. Además, ocurren usualmente en suelos homogéneos, sean naturales o artificiales (Suárez, 1998).

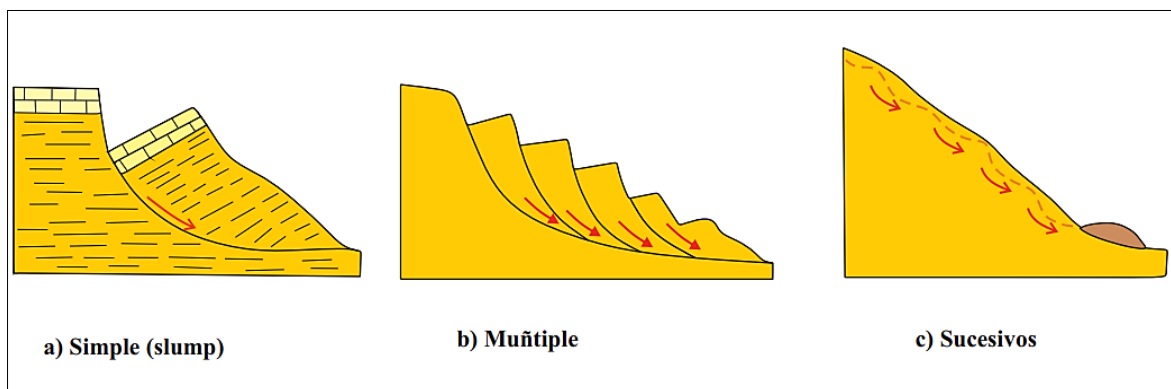


Figura 5 Tipos de deslizamientos rotacionales
Fuente: González de Vallejo, (2002).

2.2.2.4.4. Deslizamiento traslacional

Se produce a lo largo de una superficie de ruptura plana o suavemente ondulada; frecuentemente controlada o relacionada estructuralmente con superficies de debilidad como son las fallas, diaclasas, planos de estratificación, o por contacto entre substrato rocoso firme y depósitos suprayacentes superficiales, se pueden producir en roca, suelos y detritos (Millan, 2019).

En el deslizamiento de traslación el movimiento de la masa se desplaza hacia fuera o hacia abajo, a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación o volteo. Los

movimientos traslacionales tienen generalmente, una relación D_r/L_r de menos de 0.1. La diferencia importante entre los movimientos de rotación y traslación está principalmente, en la aplicabilidad o no de los diversos sistemas de estabilización. Sin embargo, un movimiento de rotación trata de auto estabilizarse, mientras uno de traslación puede progresar indefinidamente a lo largo de la ladera hacia abajo. Los movimientos de traslación son comúnmente controlados por superficies de debilidad tales como fallas, juntas, fracturas, planos de estratificación y zonas de cambio de estado de meteorización que corresponden en términos cuantitativos a cambios en la resistencia al corte de los materiales o por el contacto entre la roca y materiales blandos o coluviones. En muchos deslizamientos de traslación la masa se deforma y/o rompe y puede convertirse en flujo. Los deslizamientos sobre discontinuidades sencillas en roca se les denomina deslizamientos de bloque, cuando ocurren a lo largo de dos discontinuidades se le conoce como deslizamiento de cuña y cuando se presentan sobre varios niveles de una familia de discontinuidades se le puede denominar falla en escalera. En los deslizamientos traslacionales el movimiento de la masa se desplaza hacia fuera o hacia abajo a lo largo de una superficie más o menos plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación. Son generalmente controlados por superficies de debilidad tales como diaclasas, fallas, planos de estratificación (Suárez, 1998).

Deslizamientos traslacionales de bloques de suelo o roca sin apenas trocearse, sobre superficies únicas en macizos rocosos se han denominado resbalamientos (García, 1966). Cuando la superficie de rotura está formada por dos planos que obligan a la masa rocosa contenida a desplazarse según la línea de intersección, se forma un deslizamiento en cuña. Las roturas de cuñas no suelen alcanzar grandes dimensiones debido a que la intersección de planos de gran penetración en el macizo rocoso es infrecuente. Los factores que controlan los movimientos de las laderas son aquellas capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno; los factores condicionantes (pasivos) dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno, mientras que los desencadenantes (activos) pueden ser considerados como factores externos que provocan o desencadenan inestabilidad y son responsables por, lo general, de la magnitud y velocidad de los movimientos (Suárez, 1998). El movimiento de la masa se desplaza hacia fuera o hacia abajo a lo largo de una superficie más o menos

plana o ligeramente ondulada y tiene muy poco o nada de movimiento de rotación. Son generalmente controlados por superficies de debilidad tales como diaclasas, fallas, planos de estratificación (Suárez, 1998).

Deslizamientos traslacionales de bloques de suelo o roca sin apenas trocearse, sobre superficies únicas en macizos rocosos se han denominado resbalamientos (García, 1966).

Los factores que controlan los movimientos de las laderas son aquellas capaces de modificar las fuerzas internas y externas que actúan sobre el terreno; los factores condicionantes (pasivos) dependen de la propia naturaleza, estructura y forma del terreno, mientras que los desencadenantes (activos) pueden ser considerados como factores externos que provocan o desencadenan inestabilidad y son responsables por, lo general, de la magnitud y velocidad de los movimientos (Suárez, 1998).

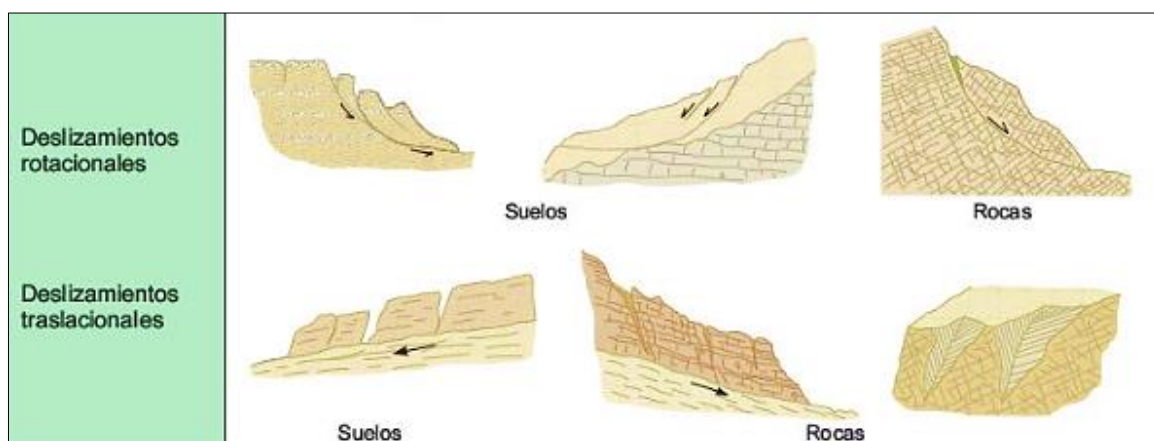


Figura 6 Tipos de deslizamientos de acuerdo con el mecanismo de ruptura

Fuente: González de Vallejo, (2002)

2.2.2.5. Tipos de deslizamientos según su profundidad

Según la profundidad pueden ser deslizamientos superficiales o profundos. Nos referimos a deslizamientos superficiales, también llamados “soil slip” (Cruden y Varnes, 1996), cuando el material desplazado normalmente se mueve sobre una zona estrecha de cizallamiento a una zona de roca fresca o ligeramente meteorizada, un horizonte podogénico o una superficie estructural en correspondencia a una unión permeable/impermeable, la superficie de falla generalmente se desarrolla en el contacto entre el regolito y el lecho rocoso y es aproximadamente paralelo a la superficie del suelo. La superficie de ruptura se

encuentra por debajo de 1 m de profundidad y son usualmente desencadenados por lluvias cortas de intensa duración o en algunos casos por lluvia prolongadas, pero menos intensas. Por tanto, los deslizamientos profundos son aquellos en el cual la superficie de ruptura es mayor a 1 m de profundidad.

2.2.2.6. Tipos de deslizamientos según el tipo de movimiento

Según el tipo de movimiento los deslizamientos pueden denominarse como:

2.2.2.6.1. Progresivo

La superficie de falla se extiende en la misma dirección del movimiento.

2.2.2.6.2. Retrogresivo

La superficie de falla se extiende en dirección opuesta al movimiento.

2.2.2.6.3. Ampliándose

La superficie de falla se extiende hacia una u otra de las márgenes laterales.

2.2.2.6.4. Alargándose

La superficie de falla se alarga agregando continuamente volumen de material desplazado. La superficie de falla puede alargarse en una o más direcciones. El término alargándose puede utilizarse indistintamente con el término progresivo.

2.2.2.6.5. Confinado

Se refiere a movimientos que tienen un escarpe visible pero no tienen superficie de falla visible en el pie de la masa desplazada.

2.2.2.6.6. Disminuyendo

El volumen de material siendo desplazado, disminuye con el tiempo.

2.2.2.7. Pérdidas económicas debidas a los deslizamientos

2.2.2.7.1. Costos Directos

Reparación, reemplazo o mantenimiento como resultado de los daños a la propiedad o infraestructura debido a los deslizamientos.

2.2.2.7.2. Costos Indirectos

Pérdida de productividad e ingresos, reducción del valor de la tierra, pérdida de ingreso por impuestos, medidas de mitigación de los deslizamientos, pérdida de productividad humana o animal debida a heridas/traumas.

2.2.2.8. Elementos del deslizamiento

2.2.2.8.1. Altura

Es la distancia vertical entre el pie y la cabeza, la cual se presenta claramente definida en taludes artificiales, pero es complicada de cuantificar en las laderas debido a que el pie y la cabeza no son accidentes topográficos bien marcados (Suárez, 1998).

2.2.2.8.2. Pie

Corresponde al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte inferior.

Cabeza o escarpe se refiere al sitio de cambio brusco de pendiente en la parte superior (Suárez, 1998).

2.2.2.8.3. Altura de nivel freático

Distancia vertical desde el pie del talud o ladera hasta el nivel de agua medida debajo de la cabeza (Suárez, 1998).

Es la medida de la inclinación del talud o ladera. Puede medirse en grados, en porcentaje o en relación $m/1$, en la cual m es la distancia horizontal que corresponde a una unidad de distancia vertical (Suárez, 1998).

Factores a analizar en un deslizamiento:

- Patrones de drenaje
- Marcas de erosión
- Grietas transversales y radiales
- Escarpes
- Cambios en la cobertura de la vegetación
- Inclinación de árboles
- Zonas de humedad
- Afloramientos de agua
- Empozamientos
- Gradadas
- Cambios topográficos
- Estructuras rotas
- Cárcavas

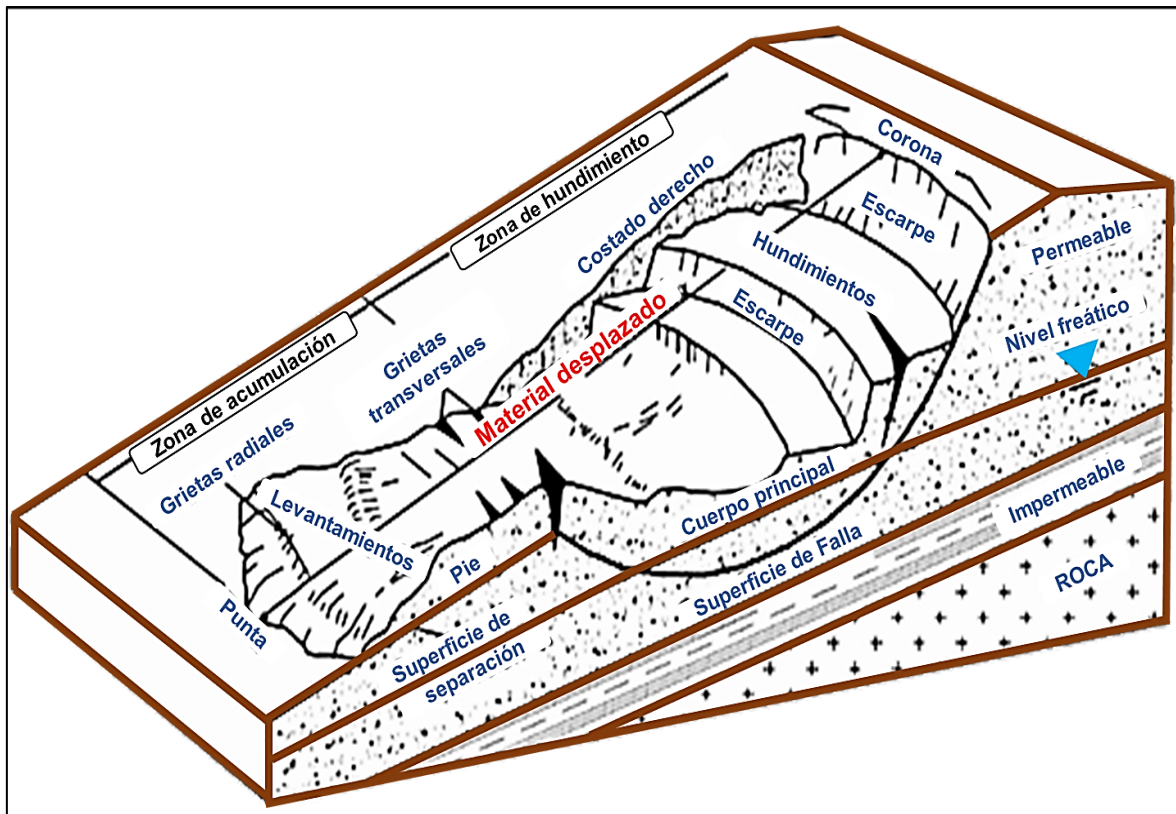


Figura 7 Detalles a analizar en un deslizamiento.

Fuente: Adaptado de Suárez, (1998).

2.2.2.9. Dimensiones de un deslizamiento

2.2.2.9.1. Ancho de la masa desplazada

Ancho máximo de la masa desplazada perpendicularmente a la longitud.

2.2.2.9.2. Ancho de la superficie de falla

Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicularmente a la longitud.

2.2.2.9.3. Longitud de la masa deslizada

Distancia mínima entre la punta y la cabeza.

2.5.5.9.4. Longitud de la superficie de falla

Distancia mínima desde el pie de la superficie de falla y la corona.

2.2.5.9.5. Profundidad de la superficie de falla

Máxima profundidad de la superficie de falla con respecto a la superficie original del terreno

2.2.5.9.6. Longitud total

Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.

2.2.5.9.7. Longitud de la línea central

Distancia desde la punta o uña hasta la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos.

2.2.5.9.8. Tamaño del deslizamiento

En cuanto a la magnitud no hay tamaños estandarizados para la descripción de deslizamientos que pueda proporcionar alguna referencia. La tabla 6 es usada en el presente trabajo de investigación, como guía para describir el tamaño de deslizamientos.

Tabla 2 Tamaño de deslizamientos por área en proyección horizontal

Descripción	Área (pies ²)	Área (m ²)
Muy pequeña	<2000	<200
Pequeña	2,000- 20,000	200- 2,000
Media	20,000- 200,000	2,000- 20,000
Extensa	200,000- 2,000,000	20,000- 200,000
Muy extensa	2,000,000- 20,000,000	200,000- 2,000,000
Enorme	>20,000,000	>2,000,000

Fuente: Conforth, (2005).

2.2.5.10. Flujos

Son movimientos espacialmente continuos en los que las superficies de cizalla tienen corta vida, se encuentran muy próximas y generalmente no se conservan. La distribución de velocidades en la masa desplazada se parece a la que se presenta en un fluido viscoso. Por este motivo, la masa movida no conserva la forma en su movimiento descendente, adoptando a menudo, formas lobuladas cuando interesan a materiales cohesivos y desparramándose por la ladera o formando conos de deyección cuando afectan a materiales granulares.

Existe una gradación desde los deslizamientos a los flujos dependiendo del Contenido de agua, movilidad y evolución del movimiento. Un deslizamiento de derrubios puede convertirse en una corriente o avalancha de derrubios a medida que el material pierde cohesión, incorpora agua y discurre por pendientes más empinadas. En los flujos existen movimientos laterales de las partículas o bloques

pequeños dentro de una masa que se mueve o desliza sobre una superficie de falla (Suárez, 1998).

El agua es el principal desencadenante por la pérdida de resistencia al corte que da lugar a materiales poco cohesivos y fáciles de transportar. Las partículas sueltas que cubren pendientes desnudas y otros depósitos detríticos no consolidados, disponibles dentro de la cuenca de recepción, son transportadas hacia el cauce principal (ríos o quebradas) donde continúa su movimiento, removiendo depósitos de gravas y arenas sueltas del lecho, hasta alcanzar el área de depositación, que corresponde a zonas de baja pendiente o más llanas, formando parte de los abanicos aluviales. En general, con la disminución de la pendiente a medida que aumenta la distancia desde su fuente, los flujos van perdiendo su carga sólida, por lo que van pasando paulatinamente a flujos de barro y finalmente a inundaciones o flujos hiperconcentrados, donde la fracción sólida varía generalmente entre 1 a 25% en volumen original (Pierson y Scott, 1985).

Generalmente asociados a la presencia de agua, se subdividen en:

Flujos de roca. Comprende las deformaciones que se distribuyen a lo largo de muchas fracturas grandes y pequeñas. Este tipo de movimiento ocurre en laderas muy empinadas mayores a 45 grados. Son ligeramente húmedos y de velocidad rápida a muy rápida (Suárez, 1998).

Flujos de detritos (escombros). Se pueden considerar como la terminación de un flujo de rocas; fragmentos de roca se van formando debido al transporte del material. (Suárez, 1998).

Flujo de lodo: los materiales transportados son muy finos y el contenido de humedad es muy alto. (Suárez, 1998).

2.2.5.11. Movimientos complejos

Se les denomina complejos, debido a que se producen por una combinación de dos o más de los tipos descritos anteriormente (Suárez, 1998).

Un movimiento de masa, no incluido en esta clasificación, es el conocido como reptación (creep), que por sí sólo puede afectar grandes áreas y preceder otros tipos de movimientos de masa. Pueden ser movimientos desde lentos hasta extremadamente lentos (unos pocos centímetros por año) del suelo subsuperficial, sin una superficie de falla definida (Suárez, 1988).

Keefer (1984), al exponer las características de los movimientos de masa, también realiza una adaptación de la clasificación de Varnes (1978), en la que, además del tipo de material y el tipo de movimiento, tiene en cuenta otros parámetros como el grado de ruptura interna, contenido de agua, velocidad del movimiento y profundidad.

2.2.5.12. Flujos

Son movimientos de material litológico de textura fina y gruesa que se desplazan a lo largo de una superficie, exhibe un comportamiento semejante a un fluido, puede ser rápido o lento, saturado o seco, estos pueden ser:

a. Flujos de detritos

Se conocen como huaycos, son corrientes que se caracterizan por flujos muy rápidos o avenidas intempestivas de agua turbia, que arrastra a su paso materiales de diferentes características provenientes de la meteorización de las rocas, estos van desde suelos finos hasta enormes bloques de roca, maleza y árboles, que pierden su estabilidad estructural por efecto del agua. Se desplazan a lo largo de un cauce definido con desbordes laterales, en su parte terminal está conformado por un abanico coluvial (Andrés, 2019).

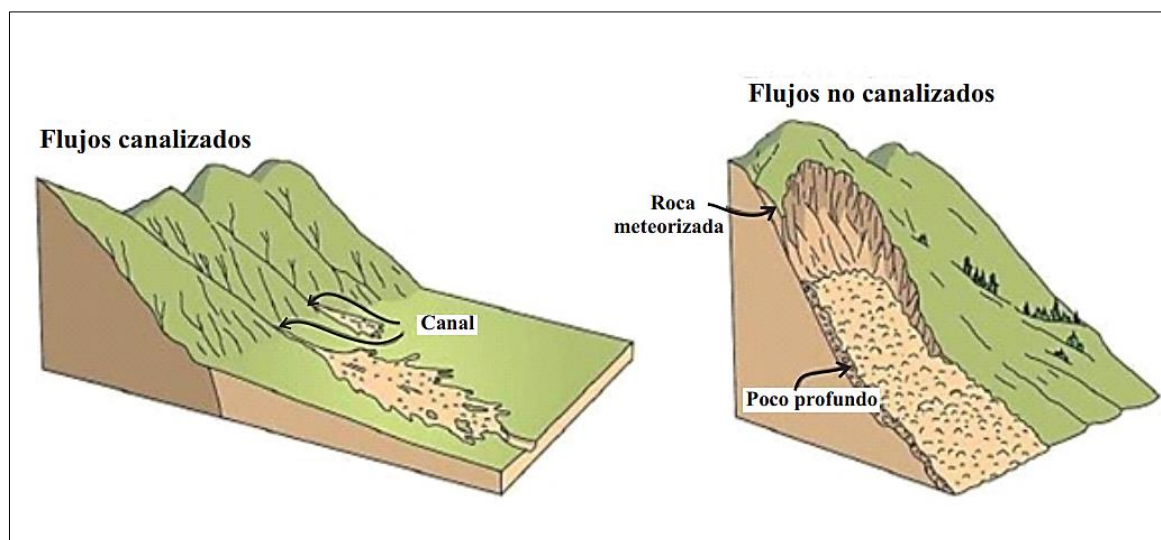


Figura 8 Esquema de flujos canalizados y no canalizados.

Fuente: Varnes, (1978).

b. Flujo de lodo

Es un flujo de tierra en donde el material está bastante húmedo para que pueda fluir rápidamente, contiene menos del 50% de partículas de tamaño de arenas, limos y arcillas. El movimiento del flujo del lodo se debe a la gravedad, duración de las lluvias y su velocidad depende en mayor grado por la pendiente del terreno por donde se desplazan y de la viscosidad del lodo, con influencia de las dimensiones del canal y la rugosidad de su superficie. (Andrés, 2019).

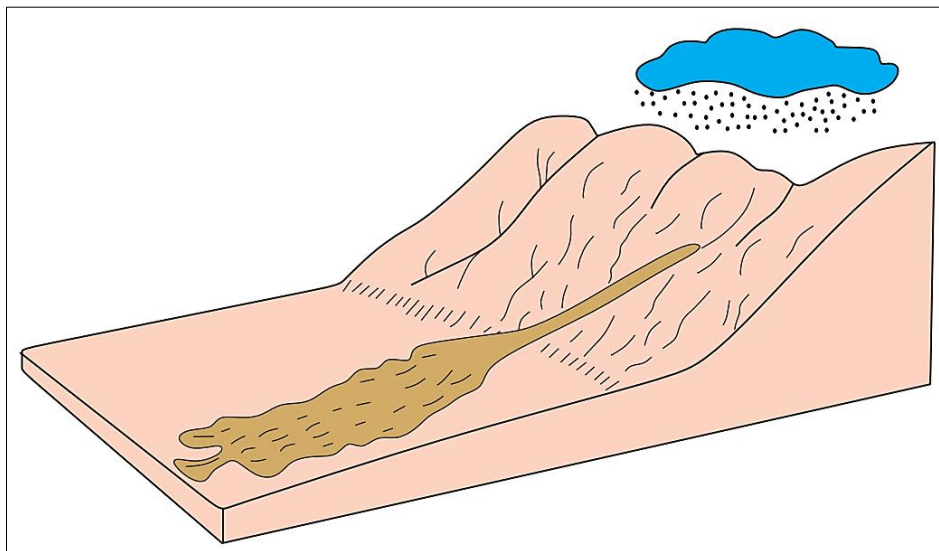


Figura 9 Esquema de flujos de lodos.

Fuente: Varnes, (1978).

2.2.5.13. Reptación de suelos

Son movimientos extremadamente lentos casi imperceptibles según la pendiente de una parte de la ladera natural, que comprometen a una masa de suelo detrítico coluvial con abundante matriz arcillosa y/o rocas blandas, susceptibles de experimentar deformación elastoplástica. El movimiento no es homogéneo y dentro de la masa se distingue varios movimientos parciales, con desplazamientos verticales del orden de centímetros y el horizontal casi nulo. (Andrés, 2019).

Movimiento lento del terreno en donde no se distingue una superficie de falla. La reptación puede ser de tipo estacional, cuando se asocia a cambios climáticos o de humedad del terreno, y verdadera cuando hay un desplazamiento relativamente continuo en el tiempo. (Quispe, 2022)

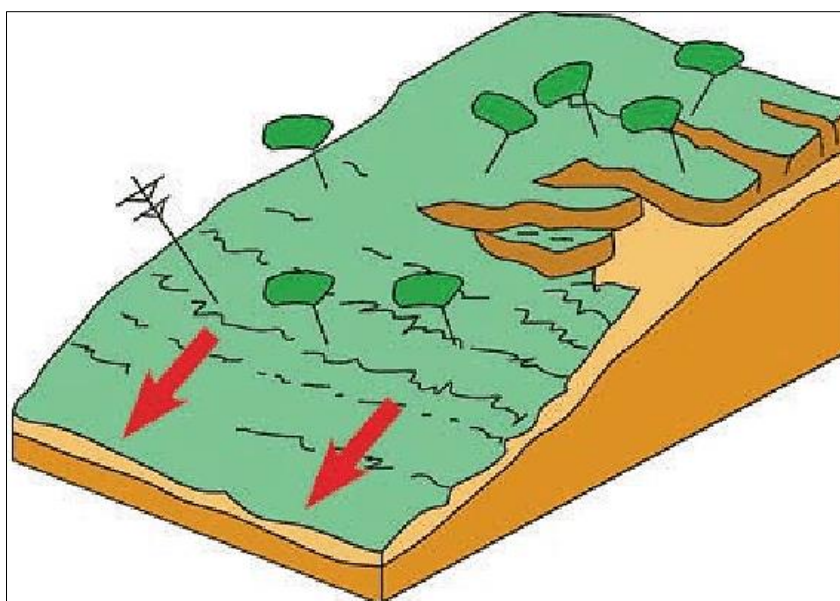


Figura 10 Esquema de reptación superficial.

Fuente: ResearchGate, (2023).

2.2.5.14. Erosión de laderas

La erosión de los suelos es producto de la remoción del material superficial por acción del agua o viento. El proceso se presenta gracias a la presencia de agua en forma de precipitación pluvial (lluvias) y escorrentías (escurrimiento) en contacto con el suelo. La construcción de muchas obras de ingeniería, así como el asentamiento de centros poblados y la habilitación de muchas zonas como terrenos de cultivo, exigen la remoción de la cobertura vegetal y excavaciones del suelo. Estas acciones, conlleva a la generación de problemas en laderas y cursos de agua por la generación e incorporación de suelo removido a las corrientes, los cuales pueden alterar ecosistemas naturales y generan problemas de sedimentación. (Andrés, 2019).



Figura 11 Esquema de erosión de laderas

Fuente: Varnes, (1978).

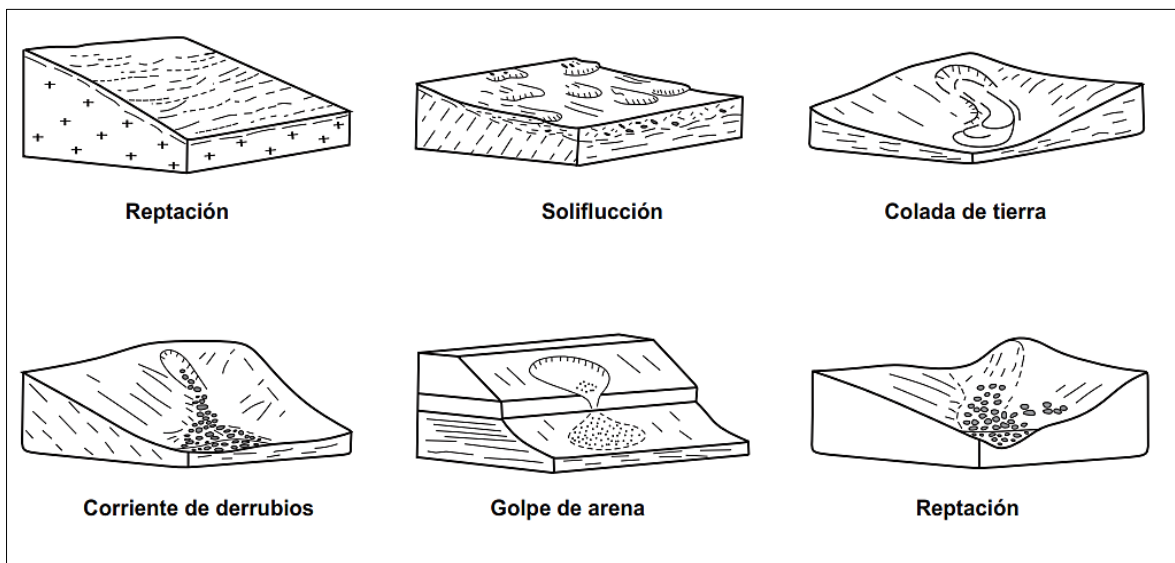


Figura 12 Movimientos de flujo.

Fuente: Corominas y García, (1997).

2.2.5.15. Cárcavas

Es un tipo de erosión que caracteriza por presentar surcos que se forma por el escurrimiento de las aguas sobre la superficie de las laderas. La presencia de cárcavas en el terreno, indica un grado avanzado de degradación, ya que, si las pequeñas incisiones por las que circula el agua en la ladera no se eliminan, estas irán progresando en el sentido aguas arriba captando desprendimientos y derrumbes de materiales de mayor tamaño debido a la falta de cohesión por exceso de humedad (Andrés, 2019).

En la formación de cárcavas, el agua arranca y transporta partículas del fondo y paredes del canal en las que pueden producirse deslizamientos, lo que genera cantidades importantes de material que, una vez movilizado, puede producir efectos aguas abajo. El proceso se debe a una perturbación hidrológica en el área.

La mayoría de las cárcavas se forman debido a una mezcla de las actividades humanas y la acción de procesos erosivos, que también pueden ser acelerados por la acción humana. Influyen en su formación las condiciones de la pendiente, la permeabilidad del sustrato y la mayor o menor presencia de precipitaciones (Zarza, 2023).

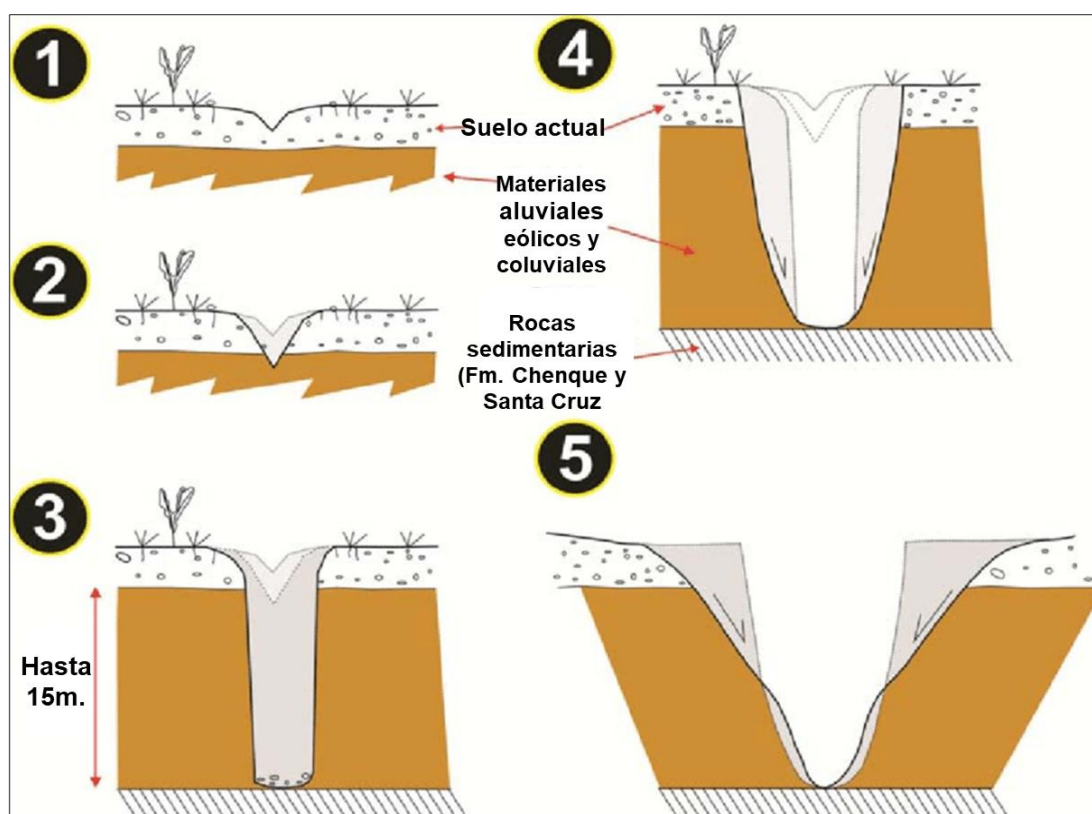


Figura 13 Etapa de formación de cárcavas.

Fuente: ResearchGate, (2023).

2.2.5.16. Otros peligros

Coladas de tierra

Es la deformación plástica, lenta y no necesariamente muy húmeda, de tierra o rocas blandas (pizarras, filitas), en laderas de inclinación moderada. Cuando predominan los materiales cohesivos con un elevado contenido de limos y arcillas, se les denomina coladas de barro (Corominas y Alonso, 1984). En este caso, adoptan una forma elongada, lobulada en el pie (lengua), formando un volumen positivo sobre la superficie original del terreno. El estiramiento del material y el correspondiente cambio de forma, caracteriza el movimiento como un flujo. En numerosas ocasiones se ha observado que las coladas de tierra y de barro tienen su inicio al pie de deslizamientos. Algunos autores han observado que algunas formas de coladas de barro progresan principalmente por deslizamiento sobre superficies de cizalla con moderada deformación interna (Hutchinson, 1988), en este caso se denominan deslizamiento de tierras.

Avalanchas

Son movimientos de una masa de hielo o nieve sobre una ladera, asociada a zonas glaciares de alta montaña. El principal agente es la gravedad y pueden variar desde un pequeño flujo hasta una gigantesca masa destructiva (Vargas, 1999).

2.2.6. Evidencias de deslizamientos

Las condiciones de inestabilidad de un lugar no son necesariamente obvias en la investigación de campo. En ocasiones hay evidencias claras de la inestabilidad, pero es común que una amenaza de movimiento no sea detectada a simple vista. Parkhurst (2000), propuso una metodología para la identificación de sitios inestables. Este procedimiento consiste en darle una calificación a una serie de factores o indicadores de estabilidad, en forma similar a como se elaboran los mapas de amenaza a los deslizamientos y de acuerdo a la calificación se investigan a detalle los sitios con más alta calificación de amenaza. En ocasiones existen evidencias claras de deslizamiento del terreno, pero es común que estos eventos no sean detectados a simple vista, por lo que se deben tener en cuenta algunos signos que nos indiquen un problema de deslizamiento. Se recomienda tener en cuenta la siguiente lista de evidencias más comunes:

Escarpas (en caso si el material es suelo) o escarpes (si el material es roca).

Grietas (suelo) o fisuras (roca) en el terreno.

Afloramientos de agua (manantiales, lagunas) a diferentes niveles topográficos del terreno.

Inclinación de árboles.

Grietas en las paredes de las viviendas.

Presencia de terrazas escalonadas y depresiones en el terreno.

Estructuras rotas como canales, carreteras, cercos.

Desplazamientos o asentamientos en el terreno.

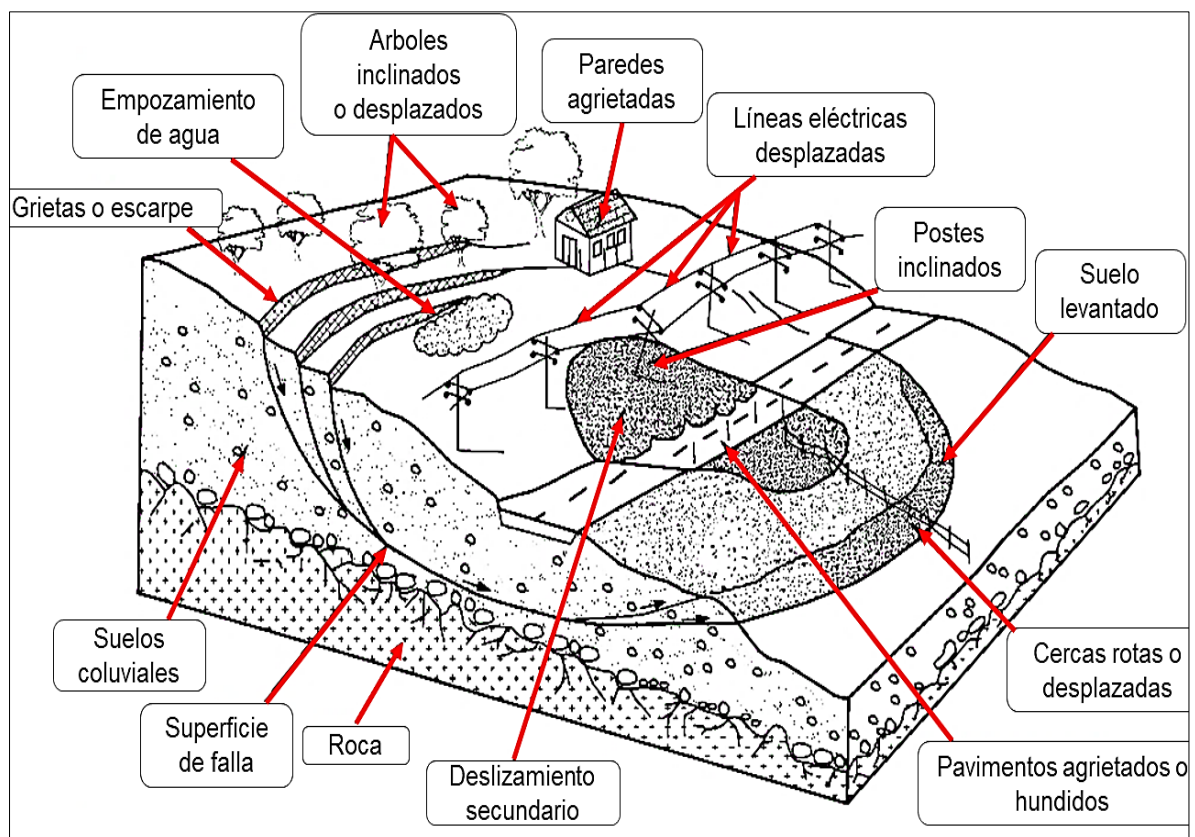


Figura 14 Signos para reconocer un problema de deslizamientos.

Fuente: Suárez, (1998).

Tabla 3 Detalles que indican actividad o inactividad de deslizamientos.

Deslizamientos activos	Deslizamientos inactivos
Escarpes terrazas y hundimiento con bordes puntiagudos	Escarpes terrazas y hundimiento con bordes redondeados
Grietas sin relleno	Grietas rellenas
Movimientos de masa secundarios sobre las caras de los escarpes	No hay movimientos de masa secundarios sobre las caras de los escarpes
Superficies de ruptura frescas y con estrías	No aparecen estrías en la superficie de ruptura
Bloques con superficies fracturadas frescas	Bloques con superficies fracturadas meteorizadas
Sistema de drenaje irregular con empozamiento y depresiones	Sistema de drenaje integrado al paisaje
Diques de depositación en el perímetro del deslizamiento	Sectores de dique erosionado
Solo aparece vegetación de rápido crecimiento sobre las áreas de ruptura	Aparece vegetación de crecimiento lento sobre las áreas de ruptura
No aparece formación de suelo nuevo sobre la superficie de ruptura expuesta	Aparece suelo nuevo u oxidado sobre las superficies de ruptura expuestas
Vegetación en estado muy diferente dentro y fuera del área deslizada	Vegetación muy similar dentro y fuera del área deslizada
Arboles inclinados, pero no torcidos	Arboles curvados y torcidos
No aparecen capas secundarias de soporte en los troncos de los arboles	Aparecen capas secundarias de soporte en los troncos de los arboles

Fuente: Crozier, (1984).

2.2.7. Herramientas y técnicas para la evaluación de peligros

La percepción de la existencia del fenómeno peligroso, es uno de los fundamentos principales para la evaluación de la peligrosidad y la adaptación de medidas para mitigar los efectos. Su caracterización y representación implica la escenificación del comportamiento probable de los peligros en un área determinada.

Se analizará el problema considerando 3 aspectos (procesos, factores y criterios). Los procesos describen las diferentes fases de movimientos de masas, relacionados a los factores como propiedades y agentes que contribuyen al proceso

y finalmente los criterios son la unidad pragmática de evaluación indirecta de la magnitud de los procesos.

2.2.8. Percepción remota

Considerada una de las más importantes de las herramientas para el evaluador. Su uso en los estudios de peligros se ha referido a identificar la probabilidad de ocurrencia, su magnitud e intensidad; así también para la captura de información del entorno geológico, geográfico, topográfico y ambiental; con el fin de producir mapas de inventario y otros mapas utilizados en el análisis de susceptibilidad. Según Saaty y Vargas (1991), las herramientas principales para la captura de información antes mencionan son: las imágenes satelitales de tipo Landsat y fotografías aéreas.

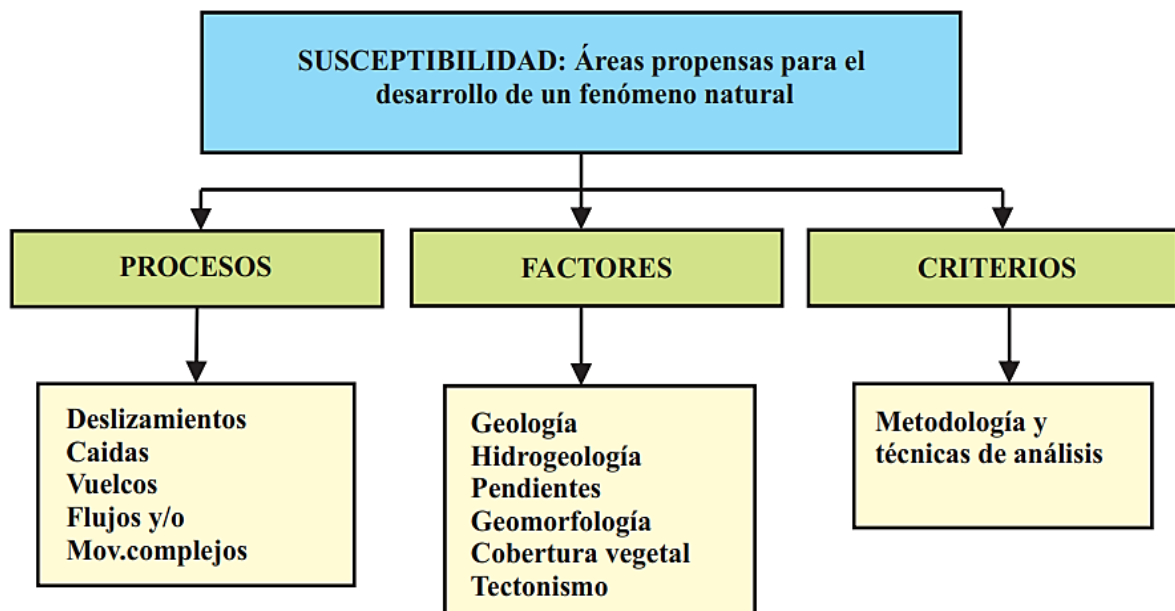


Figura 15 Aspectos fundamentales para el análisis de susceptibilidad.

Fuente: Castellanos y Carrillo, (2003).

2.2.9. Cartografiado geológico y topográfico

El cartografiado geológico proporciona la información conjunta de campo. Se reconocen dos tipos de cartografía necesarias para la evaluación de susceptibilidad:

Cartografía base o topográfica: Está compuesta por un conjunto de curvas de nivel que se utilizan para representar las características generales del relieve terrestre y para la georreferenciación de los peligros. Además, con él se puede medir formas, tamaños, distancias, perímetros y áreas que se requieren como datos adicionales para la zonificación primaria.

Cartografía temática: En ellos se representan a los factores condicionantes en la inestabilidad de laderas (FCI) y se conforman por la agrupación de las denominadas sub unidades cartográficas, definidas como una porción de superficie del área cartografiada en unidades de polígonos y que contienen una serie de características de las condiciones del terreno que difieren de las unidades adyacentes mediante límites bien definidos.

2.2.10. Sistema de Información Geográfica (SIG)

Es un software implementado en una computadora que facilita la adquisición, almacenamiento, administración, análisis y visualización de base de datos geográficos. Los elementos componentes para la evaluación son: la elaboración y preparación de base de datos; la construcción de una base de datos topográfica.

2.2.11. Peligros geológicos

Los procesos geodinámicos que afectan la superficie terrestre dan lugar a movimientos de terreno de diferente magnitud que pueden constituir peligros geológicos, los que pueden afectar de forma directa o indirecta las actividades humanas. Asociados a los peligros geológicos se reconocen cuatro conceptos principales: susceptibilidad, vulnerabilidad, amenaza o peligrosidad (Crozier, 1999).

2.2.11.2. Peligro

Es un evento externo representado por un fenómeno físico de origen natural o antrópico, se manifiesta en sitios específicos y durante un tiempo de exposición determinado; Puede ocasionar daños físicos, económicos, ambientales y sociales (EIRD, 2004).

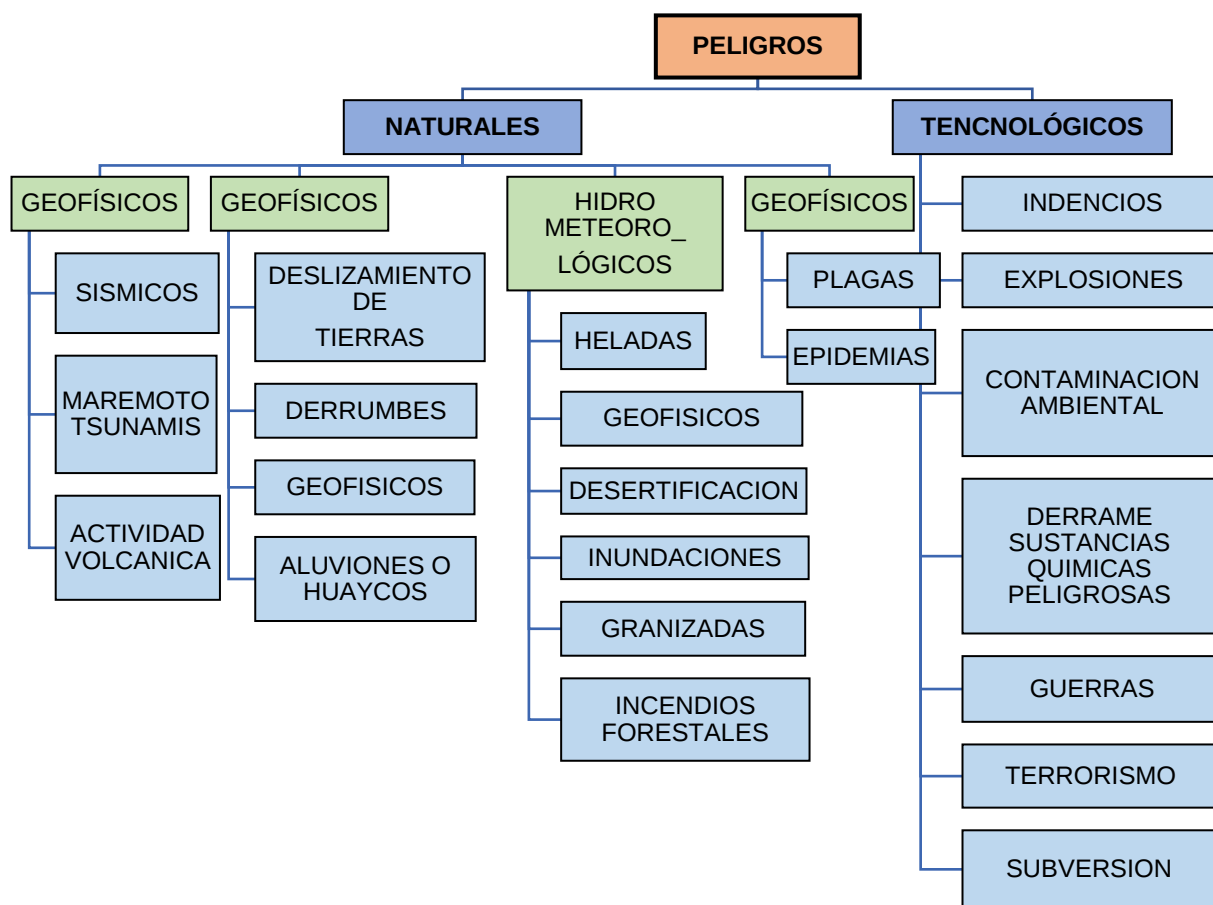


Figura 16 Tipos de Peligros
Fuente: UNESCO, (2000).

2.2.11.3. Evaluación del riesgo

La evolución de riesgos es un procedimiento que permite realizar el análisis del nivel de riesgo que se determina mediante la relación entre el nivel de peligro y el nivel de vulnerabilidad. Por un lado, para el cálculo de los niveles del peligro, es necesario considerar el parámetro de evaluación, así como la susceptibilidad mediante la sistematización de datos e información para identificar el tipo de peligro. Por otro lado, el nivel de vulnerabilidad relaciona factores como la exposición, fragilidad y resiliencia del área de estudio que podría sufrir daños por la existencia de una amenaza teniendo en cuenta la dimensión física (condiciones en las que se encuentran los elementos en peligro), la dimensión social (acciones y organización de la comunidad), la dimensión económica (recursos económicos con los que cuenta la comunidad) y la dimensión ambiental (recursos naturales). Estos niveles varían en cuatro rangos: “Muy alto”, “Alto”, “Medio” y “Bajo”. El nivel de riesgo

permite identificar el daño físico (población) y estructural al que la zona está expuesta para establecer los criterios de mitigación mediante el planteamiento de medidas preventivas para reducir el riesgo (CENEPRED, 2014).

2.2.11.4. Preparación de Mapas de susceptibilidad

Es un mapa en el cual se zonifica las unidades de rocas o suelo que muestran una actividad de deslizamientos similar o de igual potencial de inestabilidad, la cual es obtenida de un análisis multivariable entre los factores que pueden producir movimiento de masa (ÍNDECI, 2011).

No existe un método estandarizado para la preparación de mapas de susceptibilidad a los movimientos de masa y existe mucha libertad en la determinación de los pasos a seguir. En áreas de montañas de alta pendiente y valles semiplanos se pueden identificar las áreas de acuerdo a su topografía. Si se posee un mapa geológico, a cada formación se le puede asignar un grado de susceptibilidad y se puede combinar formación geológica y topografía para identificar áreas diferentes dentro de la misma formación. (ÍNDECI, 2011). Se recomienda localizar con mucha precisión las áreas cubiertas con material coluvial, las cuales son generalmente de susceptibilidad alta, al igual que las áreas con procesos intensos de erosión y las áreas de influencia de las grandes fallas geológicas. Se deben tener en cuenta otros factores tales como uso de la tierra y drenaje (ÍNDECI, 2011).

2.2.11.5. Riesgo

El riesgo es la posibilidad de afectar significativamente las vidas o bienes a causa de un fenómeno dañino que tiene una probabilidad determinada de ocurrir dentro de un período de tiempo dado. La relación entre amenaza y riesgo se establece por medio de la expresión.

Según Smith (2001), el riesgo puede definirse como la probabilidad de que ocurra un peligro y cause pérdidas, y su evaluación se realiza a partir de la expresión:

$$R = P \times Pe$$

Siendo P la probabilidad de ocurrencia del proceso, o peligrosidad y Pe las pérdidas esperadas.

Riesgo= Amenaza x Vulnerabilidad

Riesgo = [Peligrosidad x Vulnerabilidad] – capacidad de respuesta

La amenaza depende del evento detonante, del grado de susceptibilidad a la falla y de la energía potencial destructiva del evento. La vulnerabilidad es directamente proporcional al grado de exposición de los elementos e inversamente proporcional a su resistencia al evento.

2.2.11.6. Factores de amenaza y factores de riesgo

Según Smith (2001), Los factores de amenaza son:

La susceptibilidad debida a factores internos.

Los eventos detonantes como lluvias, sismos, erosión y sobrecargas.

El potencial de energía destructiva del sistema.

El nivel de amenaza.

El grado de exposición de elementos que puedan sufrir daños posibles (ubicados sobre la ladera o al alcance del evento).

La resistencia al fenómeno que opongan los elementos amenazados, para no sufrir daños estructurales ni funcionales.

2.2.11.7. Medidas y tipos de riesgos

Según Suárez (1998), La etapa a la cual los juicios y valores entran en el proceso de decisiones, explícita o implícitamente, incluyendo consideraciones de la importancia de los riesgos estimados y las consecuencias sociales, ambientales y económicas asociadas, con el propósito de identificar un rango de alternativas para el manejo de los riesgos. Manejo de Riesgo: el proceso completo de evaluación del riesgo y control de riesgo. Riesgo aceptable: un riesgo para el cual, para los propósitos de vida o trabajo nosotros estamos preparados a aceptar tal como es, sin preocupación de su manejo. La sociedad no considera justificable realizar gastos para reducir esos riesgos.

Riesgo tolerable

Un riesgo que la sociedad tiene la voluntad de vivir con él, con la confianza de que está apropiadamente controlado hasta donde es posible.

Riesgo Individual

El riesgo de la fatalidad o lesión de un individuo identificable con nombre propio, quien vive dentro de la zona expuesta al deslizamiento y quien tiene un sistema de vida particular que lo puede exponer al deslizamiento o sus consecuencias.

Riesgo social

El riesgo de lesiones múltiples o muertes a una sociedad como un todo.

2.2.11.8. Amenaza/peligro

Evento físico, potencialmente perjudicial, fenómeno y/o actividad humana que puede causar la muerte o lesiones daños materiales, interrupción de la actividad social y económica o degradación ambiental. Estos incluyen condiciones latentes que pueden derivar en futuras amenazas/peligros, los cuales pueden tener diferentes orígenes: natural (geológico, hidrogeológico y biológico) o antrópico (degradación ambiental y amenazas tecnológicas). Las amenazas pueden ser individuales, combinadas o secuenciales en su origen y efectos. Cada uno de ellas se caracteriza por su localización, magnitud o intensidad, frecuencia y probabilidad. (UN/ISDR, 2004).

2.2.11.9. Gestión de riesgo de desastres

Conjunto de decisiones administrativas de organización y conocimiento operacionales desarrollados por sociedades y comunidades para implementar políticas estratégicas y fortalecer sus capacidades a fin de reducir el impacto de amenazas naturales y de desastres ambientales y tecnológicos consecuentes. Esto involucra todo tipo de actividades incluyendo medidas estructurales y no estructurales para evitar o limitar los efectos adversos de los desastres. (UN/ISDR, 2004).

2.2.11.10. Susceptibilidad

La susceptibilidad se define como la posibilidad de que una zona quede afectada por un determinado proceso, y se expresa a través de distintos grados cualitativos y relativos. Depende de los factores que controlan o condicionan la ocurrencia de los procesos, que pueden ser intrínsecos de los materiales geológicos o controlados por un factor externo. Los mapas de susceptibilidad pueden realizarse en base a mapas inventario: áreas que sufren o han sufrido procesos que pueden volver a sufrirlos y mapas de factores: las áreas en las que confluyen determinados factores que condición los procesos de una determinada zona o región, aunque estos no se hayan presentado hasta la actualidad, pueden ser afectados en un futuro (González de Vallejo, 2002).

La determinación de la susceptibilidad a movimientos en masa constituye una herramienta técnica básica para la prevención de futuros eventos geológicos en cualquier territorio. Su zonificación a partir de parámetros intrínsecos del terreno

(condicionantes), son independientes de la ocurrencia de eventos detonantes (lluvias prolongadas o intensas, sismos o actividad antrópica).

2.2.11.11. Zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por MM

La zonificación de la susceptibilidad y/o amenaza es una herramienta útil y es usada en casi todos los lugares del mundo, donde existe propensión a los movimientos de masa. Se han elaborado diversas técnicas para desarrollar la zonificación, teniendo en cuenta factores como la escala de trabajo, la relación costo-beneficio, el objeto del estudio, información disponible, tiempo requerido, precisión de los resultados, capacidad de análisis y experiencia de los investigadores. La zonificación de la susceptibilidad y/o amenaza requiere un detallado inventario de los procesos de inestabilidad; el estudio de estos procesos en relación con su marco ambiental; el análisis de los factores de susceptibilidad y disparo; la representación espacial de los factores y de los procesos de inestabilidad (Mora y Vahrson, 1993).

Nuevas herramientas como los Sistemas de Información Geográfica y el uso de sensores remotos, agilizan cada vez el tratamiento de la información, permitiendo rápidamente la actualización de la misma. Estudios de susceptibilidad y/o amenaza multitemporal permiten predecir con más confiabilidad las áreas, observando el desarrollo de la inestabilidad en el tiempo y más rapidez en la captura de variables involucradas en los análisis. Las técnicas de zonificación están en desarrollo constante, y cada día surgen nuevos métodos, más precisos y confiables, que pueden ser usados en diversas regiones a un costo razonable. Un mapa ideal de susceptibilidad y/o amenaza por movimientos de masa, debería proveer información sobre la probabilidad de ocurrencia espacial y temporal, tipo, magnitud, velocidad, distancia de recorrido, y límite de regresión de los movimientos de masa en cierta área de interés (Suárez, 1998).

Según Carrara et. al., (2008), Los métodos estadísticos ofrecen mayor incertidumbre en los resultados de zonificación de susceptibilidad, debido a que en su análisis estadístico se fundamentan ponderaciones obtenidas con relaciones de la distribución espacial de factores condicionantes de la inestabilidad de la ladera y la de los deslizamientos observados; asumiéndose que los factores que causaron roturas en una región específica son similares a los que podrían generar deslizamientos en el futuro.

Una Evaluación de la susceptibilidad es el primer paso del análisis de riesgo, por lo que un mapa ideal de amenaza por inestabilidad de laderas debería suministrar información sobre la probabilidad espacial y temporal de ocurrencia, la distancia, el límite de avance retrogresivo de movimientos en masa, la magnitud, el tipo y entre otros (Hartlen y Viberg, 1996).

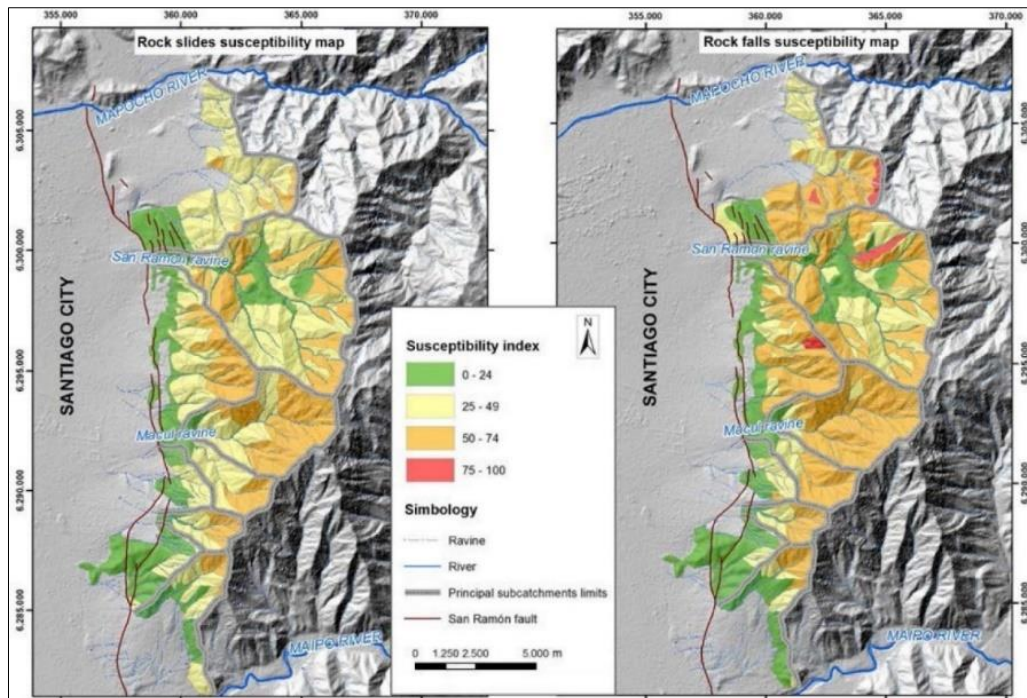


Figura 17 Mapas de susceptibilidad de deslizamientos y caídas de rocas.

Fuente: Lara, (2018).

2.2.11.12. Preparación de Mapas de susceptibilidad

El mapa de susceptibilidad es un mapa en el cual se zonifica las unidades de rocas o suelo que muestran una actividad de deslizamientos similar o de igual potencial de inestabilidad, la cual es obtenida de un análisis multivariable entre los factores entre los factores que pueden producir movimiento de masa y el mapa de inventario de movimiento de masa (ÍNDECI, 2011).

No existe un método estandarizado para la preparación de mapas de susceptibilidad a los movimientos de masa y existe mucha libertad en la determinación en la determinación de los pasos a seguir.

En áreas de montañas de alta pendiente y valles semiplanos se pueden identificar las áreas de acuerdo a su topografía. Si se posee un mapa geológico, a cada formación se le puede asignar un grado de susceptibilidad y se puede combinar

formación geológica y topografía para identificar áreas diferentes dentro de la misma formación (ÍNDECI, 2011).

Se recomienda localizar con mucha precisión las áreas cubiertas las áreas cubiertas con material coluvial, las cuales son generalmente de susceptibilidad alta, al igual que las áreas con procesos intensos de erosión y las áreas de influencia de las grandes fallas geológicas. Se deben tener en cuenta otros factores tales como uso de la tierra y drenaje (ÍNDECI, 2011).

2.2.11.13. Impacto de los deslizamientos

La actividad de deslizamientos a nivel mundial, se está incrementando debido a:
Incremento de urbanización y desarrollo en áreas propensas a deslizamientos,
deforestación continua de áreas propensas a deslizamientos.

Incremento de la precipitación regional causada por los cambios de los patrones climáticos.

2.2.11.14. Las fuerzas que afectan a los deslizamientos

Las fuerzas que afectan a los deslizamientos son de dos tipos

Fuerzas desestabilizantes (FD)

Son las fuerzas que causan los movimientos de masa

Fuerzas resistentes (FR)

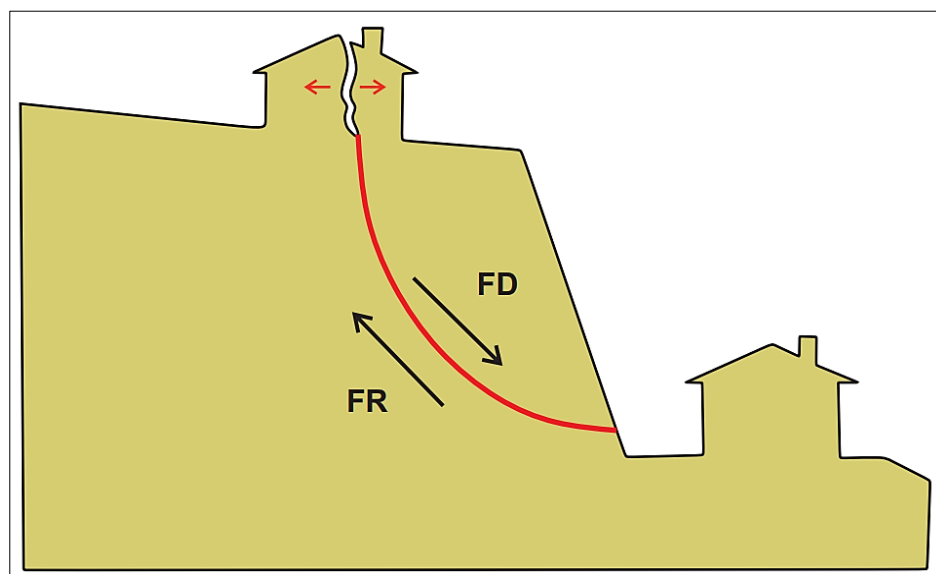


Figura 18 Representación de las fuerzas resistentes y fuerzas desestabilizantes
Fuente: Aizpiri et al., (2014).

Las fuerzas resistentes son aquellas que se oponen al movimiento de masa y estabilizan el talud. Cuando las fuerzas desestabilizantes superan a las fuerzas resistentes suceden los movimientos de masa. Para prevenir los MM o disminuir sus efectos es necesario aumentar las fuerzas resistentes o disminuir las fuerzas desestabilizantes.

2.2.11.15. Fuerzas desestabilizantes (FD)

Las pendientes muy acentuadas

El aporte de agua al talud procedente del riego, lluvias

Las lluvias intensas y/o la fusión de la nieve cuando se produce de forma rápida

Intensa meteorización de las rocas

Los sismos y las lluvias intensas pueden desencadenar los movimientos de masa.

Factores que aumentan las fuerzas resistentes (FR)

Favorecer el drenaje y la eliminación de agua de los taludes

Aportar material de refuerzo o construir elementos de contención (muros, escolleras) en la base.

Introducir elementos resistentes en el terreno, como carriles.

Revegetar los taludes y laderas.

2.2.12. Heurístico o Empírico

El método heurístico o empírico se basa en la experiencia del investigador para clasificar y ponderar la distribución de los factores causantes de la ocurrencia de movimientos de masas. Se utiliza para clasificar y ponderar la distribución de los factores causantes de la ocurrencia de movimientos de masas. Sirven además de base para trabajos de mayor detalle y para delimitar zonas peligrosas. En este método se utiliza una ponderación.

2.2.13. Medidas de dispersión

Rango: El rango de un conjunto de datos es el valor mayor ($V_{\text{máx}}$) de nuestras operaciones, claramente influenciado por valores extremos.

$RANGO = Valor\ máximo - Valor\ mínimo$

El intervalo de una clase es la amplitud dividida entre el número de clases.

$INTERVALO = (V_{\text{máx}} - V_{\text{mín}}) / N^{\circ}\text{ de clases}$

Tabla 4 Ejemplo de cálculo de ponderación.

Valor	Intervalo	Grado de susceptibilidad
1	< 0.25	Muy baja
2	0.26 - 0.5	Baja
3	0.51 - 1.0	Moderada
4	1.01 - 2.0	Alta
5	2.01 - 4	Muy Alta

Fuente: INGEOMINAS, (2001).

2.2.14. Método Probabilístico

El método probabilístico permite establecer relaciones estadísticas entre una serie de factores condicionantes de los movimientos de masa como la litología, pendiente, geomorfología y la distribución actual y/o pasada de los movimientos a escala de detalle. Su uso requiere crear una base de datos que incluya toda la información (Carrara, 2008).

2.2.15. Análisis Estadístico Univariado o Divariado

Está considerado como un análisis de aproximación semi cuantitativa que permite estimar la posibilidad de ocurrencia de movimientos en masa en una determinada área. El procesamiento consta en determinar cuantitativamente el grado de influencia que cada variable o factor intrínseco (subunidades de mapas temáticos) tiene en la susceptibilidad, se desarrolla calculando la sumatoria de las áreas de cada tipo de movimiento en masa que se encuentre dentro de las áreas que abarca cada unidad cartográfica (INGEOMINAS, 1998).

Esta fórmula es la siguiente:

$$W\% = DZX \times 100/S$$

Dónde:

W= peso o susceptibilidad de la UCP respecto al movimiento en masas.

DZX= Superficie acumulada de movimiento en masa en Km²

S= superficie total acumulada de la UCP.

UCP= Unidad Cartográfica de Parámetro. (INGEOMINAS 1998).

2.2.16. Matriz de Jerarquías Múltiples (MJM)

Es una manera de jerarquizar contenidos donde no es posible homologar los criterios de evaluación, se refiere a aquellos problemas donde es necesario ordenar o elegir entre varias opciones en función de algunas reglas pre establecidas.

Permite asignar ponderaciones de importancia a los factores condicionantes de la inestabilidad, de una manera más rigurosa que la directa apreciación o juicio de expertos. Este análisis se basa en la importancia relativa y pesos obtenidos mediante comparaciones sucesivas entre parejas de criterios (*pair wise*) que permite asignar ponderaciones de importancia a los factores condicionantes de la inestabilidad (Hayman, 1998). Se utiliza la escala de Saaty (1991).

2.2.17. Coeficiente de Consistencia (RC)

Esta fórmula se utiliza para demostrar la consistencia y confiabilidad de las ponderaciones, se requiere que el valor sea menor a 0,10. Se utiliza la siguiente fórmula: (INGEOMINAS, 2000)

$$RC = \frac{IC}{IA} \qquad IC = \frac{\lambda_{\max} - n}{n-1}$$

Dónde:

RC : Coeficiente de Consistencia.

IC : Índice de consistencia.

IA : Índice aleatorio.

$\lambda_{\max}$: Eigenvalor máximo o principal.

Tabla 5 Valores para el cálculo de la relación de consistencia.

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
IA	0.525	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.513	1.535	1.555

Fuente: Aguaron y Moreno 2001 & INGEOMINAS, (2000).

2.2.18. Definición y estratificación de los niveles de riesgo

el nivel de riesgo se obtendrá cuando tengamos los resultados de la peligrosidad y vulnerabilidad del área en estudio. Se establecerán rangos utilizando los pesos de los descriptores de cada factor.

Muy alto

Alto

Medio

Bajo

Muy bajo

$$\text{Riesgo} = f(\text{peligro}, \text{vulnerabilidad})$$

Tabla 6 Valores y niveles de riesgo

Valores de rangos de riesgo	Niveles de riesgo
$n_2 < r \leq n_1$	Muy alto
$n_3 < r \leq n_2$	Alto
$n_4 < r \leq n_3$	Medio
$n_5 < r \leq n_4$	Bajo
$n_6 \leq r \leq n_5$	Muy bajo

Fuente: CENEPRED, (2014).

Donde

r: es el valor del riesgo.

n: son los valores del rango de riesgo

2.2.19. Método Multicriterio

2.2.19.1. Proceso de análisis jerárquico

Para la ponderación de los factores se utilizó el Proceso de Análisis Jerárquico. La matriz generada es una matriz cuadrada es decir el mismo número de filas y columnas.

2.2.19.2. Cálculo de los pesos ponderados

Primero

Se construye la matriz de comparaciones de pares, el que mostraría la comparación entre factores sucesivos. Para la ponderación de factores esta matriz nos permite determinar la importancia de un criterio respecto a otro, lo que nos servirá posteriormente para la ponderación.

Segundo

Se construye la matriz de comparaciones normalizada. El cual se obtiene de dividir cada elemento de matriz entre la suma obtenida,

Tercero

Es el cálculo del vector prioridad el cual nos mostrará los pesos ponderados de cada criterio a partir de la matriz normalizada: Sumamos verticalmente los elementos de cada columna.

2.2.19.3. Cálculo de la Relación de Consistencia (RC)

Se verifica la consistencia de los datos obtenidos.

Primero

Se multiplica cada valor de la primera columna de la matriz de comparación pareada por la prioridad relativa del primer elemento que se considera y así sucesivamente. Se deben sumar los valores sobre las filas para obtener un vector de valores, denominado Vector Suma Ponderada (VSP).

Segundo

Se dividen los elementos del vector de suma ponderada entre el correspondiente valor de prioridad para cada uno de los criterios:

Tercero

Se determina la lambda máxima ($\lambda_{\max}$) que nos permite determinar el índice de consistencia

$$\lambda_{\max} = \frac{(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \dots + \lambda_n)}{n}$$

Cuarto

Determinación del Índice de consistencia (IC)

$$IC = \frac{(\lambda_{\max} - 1)}{(n - 1)}$$

Con esto nos permite hallar la relación de consistencia de la matriz para verificar si las decisiones tomadas fueron las acertadas.

Quinto

Se procede a determinar la Relación de Consistencia (RC)

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

Donde IA es el Índice Aleatorio de una Matriz de Comparaciones Pareadas, generada.

NOTA: Para matrices de 3 parámetros la RC debe ser menor a 0.04, para matrices de cuatro parámetros la RC debe ser menor a 0.08 y para matrices mayores a cuatro deben ser menores a 0.10.

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS

Peligros naturales: Fenómeno atmosférico, hidrológico, geológico que por su severidad y frecuencia puede afectar de manera adversa a los seres humanos, a sus infraestructuras o actividades. (Petak et al.,1982).

Peligros geológicos: Son aquellos elementos del medio ambiente físico perjudicial al hombre, causado por fuerzas ajenas a él. Comprenden una gran variedad y complejidad de movimientos de material geológico debido a las fuerzas de gravedad y en algunos casos por acción del agua. (Petak et al.,1982).

Zonas críticas: Son áreas o lugares vulnerables a sufrir pérdidas socioeconómicas debido a la ocurrencia de peligros geológicos. Su identificación se realiza utilizando la susceptibilidad y elementos vulnerables (Fidel, 2006).

Previsión: Predicción en la probabilidad de ocurrencia de procesos geológicos, cuya posibilidad de identificación de áreas con riesgo permitirá tener una idea de los peligros y sus impactos en el medio (Fidel, 2006).

Prevención o mitigación (Reducción): Conjunto de medidas y acciones dispuestas con anticipación; cuyo fin es evitar o impedir que se presente un fenómeno peligroso (Fidel, 2006).

Peligro: Se representa mediante la probabilidad de ocurrencia de un evento en un determinado tiempo, el cual produciría daños presentando características como magnitud o intensidad (CENEPRED, 2014).

Vulnerabilidad: Es el grado de pérdidas y daños que provoca un evento en un área determinada, teniendo en cuenta factores como el grado de exposición, la protección, la reacción, la recuperación básica y reconstrucción (CENEPRED, 2014).

Riesgo: Es la posibilidad de ocurrencia (contingencia) de un evento que produciría un daño con proximidad en tiempo y espacio. Este se considera como la

combinación entre peligro (amenaza), vulnerabilidad de la zona afectada y la exposición de esta (CENEPRED, 2014).

Sistema de Información Geográfica (SIG): Es una herramienta digital que permite el análisis de la información espacial referenciada para obtener resultados como mapas, gráficos, entre otros (Español, 2017).

Talud o ladera: Es una superficie inclinada de suelo o roca que se forma mediante procesos naturales (por desgaste o depósito) o por intervención del hombre (por terraplenado o excavación) y que se clasifican por la altura, la elevación de la pendiente, la forma de falla y el mecanismo que presentan (Muñoz, 2017).

Gestión de riesgo: Es el procedimiento para la planificación de reducción del riesgo identificado mediante la prevención, mitigación, preparación y transferencia, los cuales se elaboran para anticipar la ocurrencia del evento que provocaría daños (Arias, 2012)

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. UBICACIÓN GEOGRÁFICA

La zona de investigación se encuentra en el Cerro Loma del indio. Distrito de Sucre, Provincia de Celendín, departamento de Cajamarca. Se ubica a 1 km y al SW del distrito de Sucre.

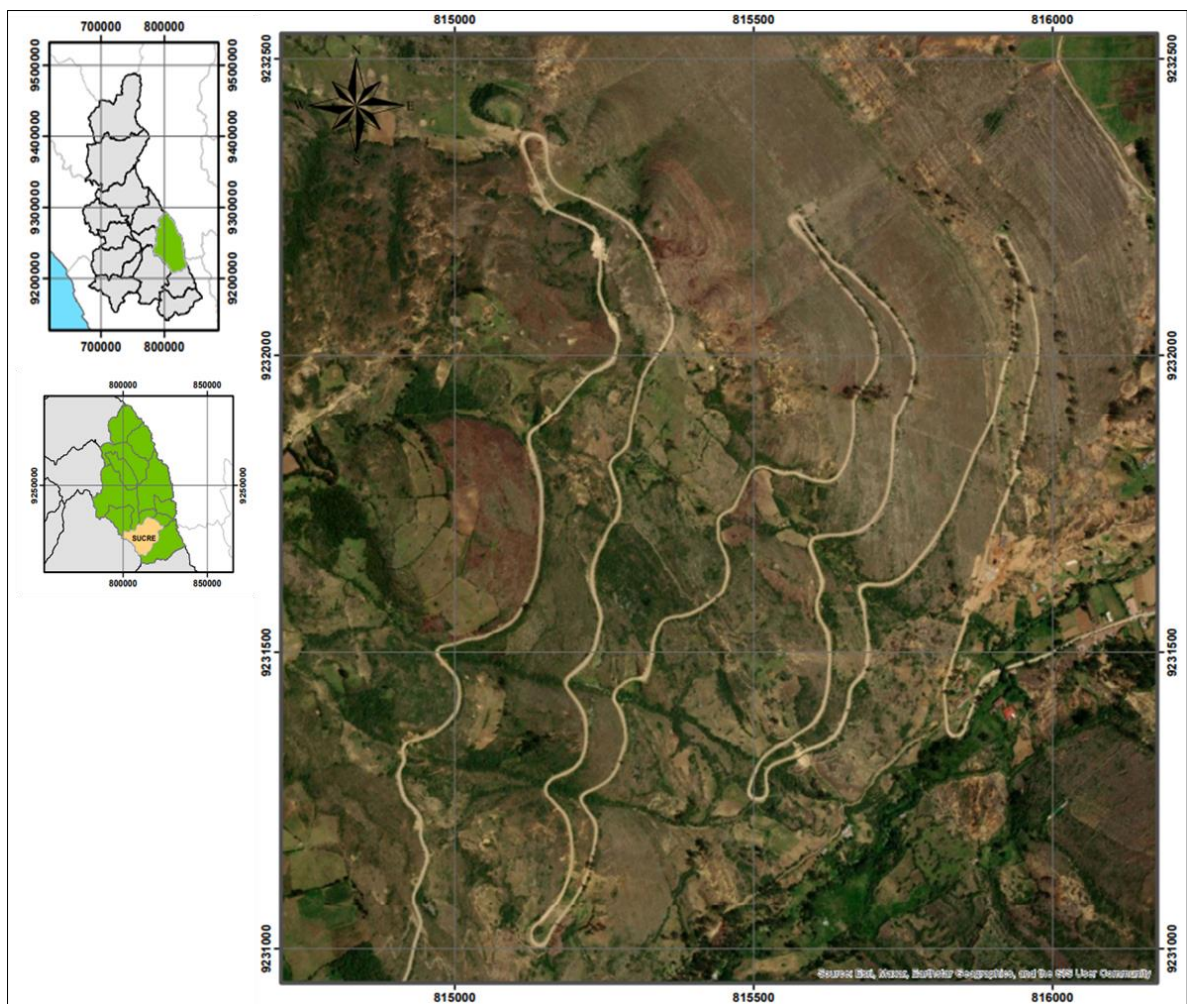


Figura 19 Ubicación del área de estudio.

Fuente: Google Earth, (2023).

3.2. ACCESIBILIDAD

Para acceder a la zona de estudio, utiliza la carretera asfaltada de Cajamarca Celendín:

Tabla 7 Acceso a la zona de estudio

Tramo	Distancia (Km)	Tiempo (hrs)	Condición
Cajamarca- Celendín	200	2.50	Asfaltada
Celendín- Loma del Indio	3	0.20	Carretera de herradura
Sucre- Loma del Indio	1	0.30	Carretera de herradura

3.3. CLIMA

El clima del área de estudio está dominado por los efectos claros de los Andes. En las partes altas es frío y cálido en las partes bajas conocidas con el nombre de temple. Los meses con más frío son los de noviembre, diciembre, enero, marzo y abril. Los meses de mayo, junio, julio, agosto, septiembre y octubre son soleados presentando fuertes vientos en el mes de agosto.

Tabla 8 Cuadro climatológico de la región de Cajamarca

	ENE.	FEB.	MAR.	ABR.	MAY.	JUN.	JUL.	AGO.	SEP.	OCT.	NOV.	DIC.
Precipitación (mm)	74,40	86,91	107,41	51,47	5,03	0,60	1,43	0,70	21,78	54,80	14,40	56,15
Tem. del aire Máx. °C	19,24	18,79	18,89	18,56	18,59	17,32	17,26	18,13	18,20	18,52	18,50	17,75
Tem. del aire Mín. °C	10,26	11,75	10,45	9,71	7,73	6,38	5,12	6,45	7,63	8,41	6,37	9,57
Tem. del aire Med. °C	14,75	15,27	14,67	14,13	13,16	11,85	11,19	12,29	12,92	13,46	12,43	13,66
Hum. Rel. Máx. (%)	91,21	92,78	93,96	94,50	91,53	85,99	84,14	81,74	84,79	86,85	77,73	91,13
Hum. Rel. Mín. (%)	52,37	59,95	57,54	57,00	49,37	44,88	40,27	40,22	43,58	44,70	34,51	52,99
Hum. Rel. Med. (%)	71,79	76,36	75,75	75,75	70,45	65,43	62,20	60,98	64,19	65,77	56,12	72,06
Direc. Viento (grados)	161,62	151,46	156,91	159,29	175,86	163,13	175,97	153,74	160,29	171,16	177,90	169,17
Vel. Viento (Nudos)	1,51	1,31	1,26	1,26	1,40	1,60	1,71	1,89	1,61	1,60	1,74	1,48
Presion atm. (mb)	12,80	12,81	12,82	12,82	12,82	12,83	12,83	12,82	12,82	12,79	12,79	12,79

Fuente: SENAMHI, (2022).

3.4. VEGETACIÓN

Es muy variada, en donde se pueden observar bosques de eucaliptos. También se puede observar los sauces. Existen plantas menores como: pastos naturales, pencas, hierbas santas, berros, zarzamoras cuyas hojas machucadas sirven de efectiva medicina para curar las escaldaduras de los bebés; también existen las plantas aromáticas. En las laderas de los cerros se producen plantones de lanche, de fruto muy agradable; la chupanilla de dulce néctar; la chilca utilizada para barrer el horno y cocer el pan y que según dicen da cielo y suelo al horno. Cabe indicar que en la zona de estudio existen muchas zonas de cultivo y muchos bosques reforestados lo que ha ocasionado que existan pocos bosques naturales autóctonos.



Figura 20 Vegetación presente en la zona de estudio, donde predomina bosques de eucalipto, pastos naturales y variedad de plantas menores.

3.5. FAUNA

Existen pocas especies silvestres. Las aves acuáticas que habitan los totorales y cienegas, la pauculla, ave corredora muy elegante; el pato silvestre; la garza blanca. En la parte alta se encuentran la perdiz; la vizcacha; el conejo silvestre; el pájaro carpintero. Entre los cuadrúpedos están el venado.

3.6. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.6.1. Tipo, nivel, diseño y método de la investigación

3.6.1.1. Tipo de investigación

La metodología es descriptiva y explicativa, ya que una vez identificado el problema de movimientos de masa se decidió evaluar el origen de la problemática y determinar los niveles de peligro y vulnerabilidad.

3.6.1.2. Nivel de investigación

De carácter cualitativo y cuantitativo debido a que analizan las variables independientes y las dependientes. Se adoptó una Evaluación Multicriterio que nos permite ponderar las variables según el nivel de importancia desarrollando un Proceso de Jerarquización Analítica (AHP).

3.6.1.3. Diseño de investigación

El diseño utilizado es observacional y transversal, debido a que se utiliza información secundaria extraída de diversas fuentes para ser utilizada en el estudio de la problemática en cuestión.

3.6.1.4. Método de investigación

De carácter cuantitativo y analítico. Adoptándose la Evaluación Multicriterio que nos permite ponderar las variables según el nivel de importancia desarrollando un Proceso de Jerarquización Analítica (AHP).

3.6.1.5. Población de estudio

Todos los tipos de movimientos de masa que se encuentran en la localidad de Loma del Indio en un área de 20 km².

3.6.1.6. Muestras

Se estudiará un total de 5 zonas con movimientos de masa.

3.6.1.7. Unidad de análisis

La unidad de análisis está conformada por la descripción de los movimientos de masas.

3.7. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

3.7.1. Técnicas

Esta investigación se realizará teniendo en cuenta en su parte inicial una exhaustiva recopilación bibliográfica. Luego se realizarán salidas al campo para la recolección de muestras para la realización del análisis químico. También se harán una serie

de mediciones para determinar el tipo de método de explotación a aplicar. Finalmente, se elaboran los mapas geológicos, perfiles y de esta manera procesar los datos para su interpretación final.

3.7.2. Instrumentos y equipos

GPS Navegatorio

Sistema de navegación basado en 24 satélites en órbita sobre el planeta tierra que envía información sobre la posición de una persona u objeto en cualquier horario y condiciones climáticas.

Brújula tipo Brunton

Instrumento que nos ayuda obtener la dirección de estructuras geológicas consistentes en rumbos y buzamientos de los estratos, fallas y dirección del flujo en las rocas volcánicas y sedimentarias.

Picota del geólogo

Se utiliza para obtener una superficie fresca de una roca con el fin de determinar su composición, su naturaleza, la mineralogía.

Protáctor a escala 1/20000

Sirve para representar los rumbos y buzamientos en un mapa de una manera fácil y simplificada.

Ficha de recolección de datos

Instrumentos en los cuales plasmamos por escrito información importante que hemos encontrado en nuestros procesos de búsqueda de información y que deseamos tener al alcance de nuestras manos en cualquier momento.

Flexómetro de 5 m

Instrumento que sirve para medir longitudes en superficies rectas o curvas.

Wincha 30 m

Es una cinta métrica flexible, enrollada dentro de una caja de plástico o metal, que generalmente está graduada en centímetros en un costado de la cinta y en pulgadas en el otro.

Libreta de campo

Es una herramienta usada por investigadores de varias áreas para hacer anotaciones cuando ejecutan trabajos de campo

Lupa 40X (40 aumentos)

Instrumento que nos servirá para identificar, minerales, texturas y estructuras de la roca

Cámara fotográfica digital Marca Canon 12Mp

Usado para tomar fotos, y de este modo, evidencia de las estructuras estudiadas.

3.8. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE DATOS

Los datos serán plasmados en las libretas de campo los que posteriormente serán analizados y procesados mediante el software ArcGIS 10.2 para elaborar los diferentes mapas, perfiles y columnas geológicas.

3.9. GEOLOGÍA LOCAL

En el área de estudio afloran las Formaciones Pariatambo del Cretácico inferior, la Formación Yumagual del Cretácico superior y depósitos inconsolidados del cuaternario. Se muestra la columna estratigráfica de la región Cajamarca.

3.9.1. Cretácico Inferior

3.9.1.1. Formación Pariatambo (Ki- pa)

Consiste en una alternancia de arcillitas calcáreas con estratos delgados de calizas bituminosas gris oscuras, con un característico olor fétido al fracturarlas. Posee un espesor entre los 150 a 200 m. La Formación Pariatambo sobreyace en forma concordante a la Formación Chulec e infrayace con la misma relación a la Formación Yumagual. Cabe indicar que regionalmente se observan sus mejores exposiciones en los alrededores de Cajamarca, La Encañada y San Marcos. Reyes 1980.

3.9.2. Cretácico Superior

3.9.2.1. Formación Yumagual (Ks- yu)

La Formación Yumagual consiste en una alternancia de calizas, arcillitas y margas. Destaca una secuencia arcillítica gris amarillento. Algunas veces se intercalan con estratos delgados con abundantes restos de fósiles. Esta unidad posee un grosor de 700 m. aproximadamente. Se expone ampliamente dentro y fuera del área de trabajo. Por la forma topográfica que adopta, muchas veces puede confundirsele

con la Formación Cajamarca, aunque sus grosores, litología y fauna, dentro del área se mantienen uniformes, tanto en el sector occidental como oriental. Dichas características varían hacia el sur del área (Reyes, 1980).

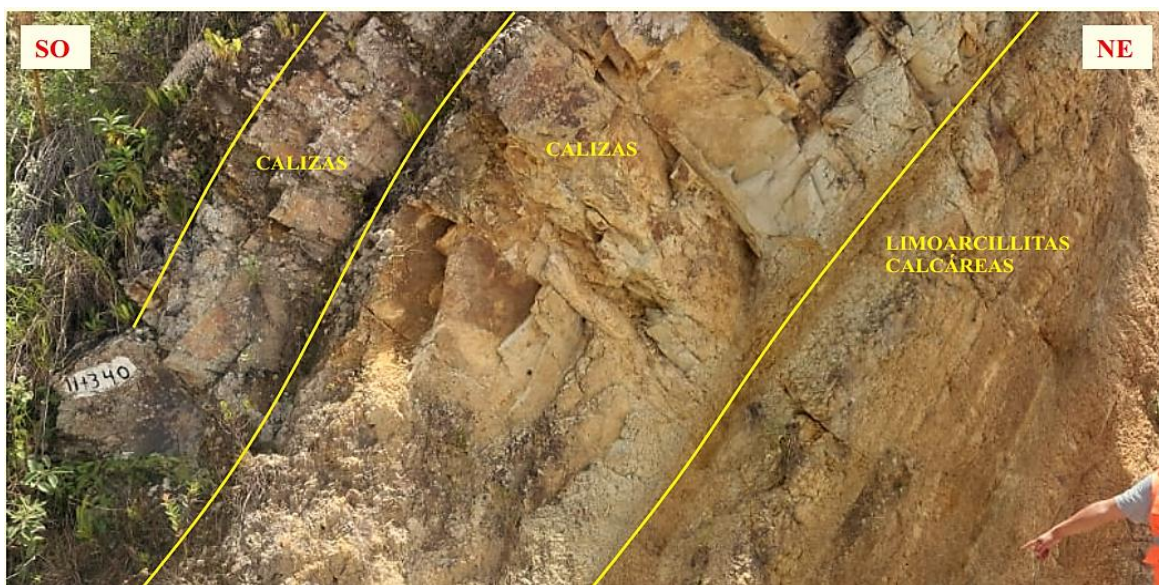


Figura 21 Afloramiento de la Formación Yumagual; intercalación de calizas y limoarcillitas. Foto tomada en el Km 6+740 de la carretera Lomas del Indio.

3.9.3. Cuaternario

3.9.3.1. Depósitos fluviales (Qh-fl)

Estos depósitos están formados por gravas, arenas, limos y arcillas; estos materiales son de diferentes tipos de rocas. Se ubican generalmente en las riberas de los ríos y son utilizados como materiales de construcción por los pobladores del lugar.



Figura 22 Depósitos fluviales. Foto tomada en el tramo final de la Carretera Lomas del Indio.

3.9.4. Geología estructural

En el área de estudio se observa una falla de componentes inversos que afecta a las calizas de la Formación Yumagual. Posee una orientación NO- SE y se le denomina como Falla Lomas del indio. Se encuentra buzando 35° al SO y forma una zona de falla y que parece ser que debido a su actividad en este tramo de carretera las rocas se encuentran intensamente intemperizadas.

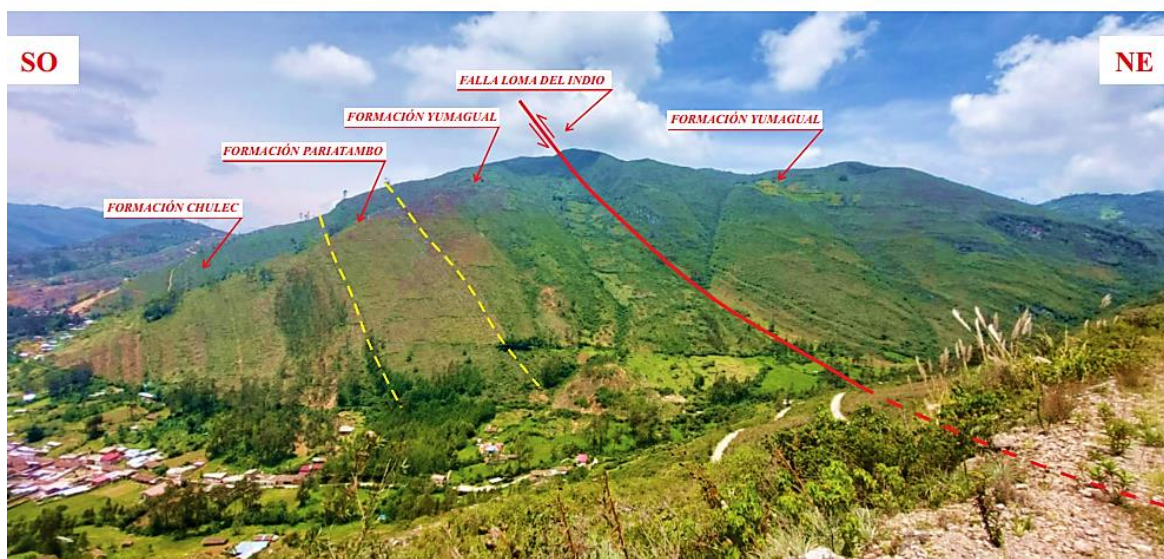


Figura 23 Falla inversa Lomas del Indio que se encuentra afectando a la Formación Yumagual. Notase que en la esquina inferior derecha esta estructura se encuentra cruzando el tramo de carretera. Foto tomada cerca del Km 11.

3.10. GEOMORFOLOGÍA

Tiene como objetivo el análisis de las formas de relieve de la superficie terrestre teniendo en cuenta su origen, naturaleza de las rocas y los elementos climáticos e hidrológicos que han actuado en su conformación. El relieve terrestre es un factor condicionante muy importante para la clasificación y ponderación teniendo en cuenta su vinculación con los peligros geológicos.

3.10.1. Laderas fuertemente empinadas

Son elevaciones naturales del terreno que poseen gran altitud y pendiente. Se han formado como consecuencia del plegamiento de las rocas cretácicas debido a procesos tectónicos de la Fase Incaica. En esta unidad geomorfológica se han registrado la mayoría de los MM.

3.10.2. Laderas empinadas

Las laderas empinadas son elevaciones de terreno que se ubican por encima de las laderas fuertemente empinadas. Su altura puede variar ampliamente. Las laderas empinadas se han formado por la intensa erosión. Se ubican entre las lomadas y las laderas fuertemente empinadas.



Figura 24 Ladera empinada. Foto tomada cerca al Km 7+960 de la carretera Lomas del Indio

3.10.3. Colinas

Las colinas son elevaciones suaves y redondeadas del terreno, con una altura máxima que generalmente no supera los 200 metros. Se forman a través de procesos de intensa erosión, presentando una topografía más suave y menos pronunciada. Su superficie puede estar cubierta por vegetación baja, como arbustos y pastizales.

3.10.4. Lomadas

Las lomadas son elevaciones suaves del terreno. Se ubican en la parte baja entre las colinas y el valle. Se han formado por los procesos de erosión. Se observan abundantes plantaciones y pastos para ganado.



Figura 25 Lomada de forma suave. Foto tomada en el Km8+120 de la carretera Lomas del Indio

3.10.5. Valle

Son terrenos que se ubican en la parte baja de la zona de investigación. Es la prolongación del valle de José Gálvez. Existen abundantes plantaciones de eucaliptos, de pinos y de pastos de ganado.



Figura 26 Valle que se ubica en la parte baja de la zona de estudio.

CAPÍTULO IV ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

4.1 CARACTERÍSTICAS DE LA ZONA DE ESTUDIO

4.1.1. Características geológicas

En el tramo de carretera de Lomas del Indio se encuentran aflorando rocas sedimentarias pertenecientes a la Formación Yumagual de edad del Cretácico Superior. En el sector NE afloran rocas de la Formación Pariatambo de Cretácico Inferior en un porcentaje reducido y depósitos cuaternarios. En la parte central de la zona de estudio se observa una falla de carácter regional, de orientación NO-SE, que se le denomina Falla Loma del indio, de componente inverso y de edad post Tectónica Inca. Esta falla afecta a las calizas de la Formación Yumagual produciendo un engrosamiento horizontal y parece ser que ha contribuido en la intensa meteorización de las rocas que se encuentran en la zona de falla.

Tabla 9 Porcentaje de afloramientos rocosos en la zona de estudio

Formaciones geológicas	Porcentaje %
Calizas de la Formación Yumagual	80
Calizas de la Formación Pariatambo	15
Depósitos cuaternarios	5

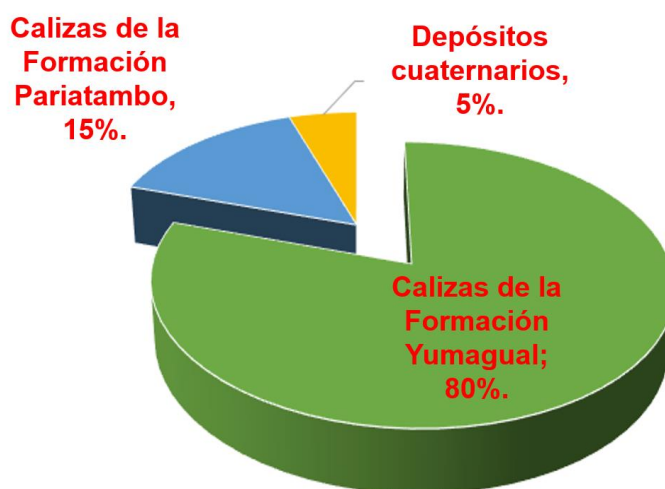


Figura 27 Porcentaje de afloramientos rocosos en el área de estudio. Se observa un gran porcentaje de rocas sedimentarias (95%) pertenecientes a la Formación Yumagual y Pariatambo vs depósitos cuaternarios inconsolidados (5%).

4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS MOVIMIENTOS DE MASA (MM) IDENTIFICADOS

Se han identificado 08 MM de masa se ha realizado medidas, su ubicación en coordenadas y la altura con respecto al nivel mar.

Tabla 10 ubicación de los MM

Movimiento de masa (MM)	Norte	Este	Altura
MM-01	9231750	815120	3020
MM-02	9232000	815220	2825
MM-03	9231950	815650	2828
MM-04	9232250	815560	2870
MM-05	9232150	815680	2825
MM-06	9231780	815755	2780
MM-07	9231680	815840	2720
MM-08	9231850	815860	2700

MM-01		
Coordenadas UTM:	Norte:	Este:
	9232200	815220
Cota:	2825msnm	
Unidad geológica involucrada:	Parte superior de la Formación Yumagual	
Inclinación de la cara del MM:	50°	
Color por intemperización:	Gris anaranjado	
Tipo de MM:	Caída de rocas	
Descripción		
 Movimiento de rocas identificado como Caída de rocas, está compuesto por bloques calizas de 30 a 40 cm de diámetro. Posee dimensiones de 2m*20m por lo que el área de influencia es de 400m² Caída de rocas identificado en la margen izquierda de la carretera Lomas del Indio cerca al Km 5+780.		

Figura 28 Descripción del movimiento de masa (MM1)

MM-02		
Coordenadas UTM:	Norte	Este
	9231750	815120
Cota:	3020msnm	
Unidad geológica involucrada:	Parte superior de la Formación Yumagual	
Inclinación de la cara del MM:	40°	
Color por intemperización:	Gris anaranjado	
Efervescencia al HCl:	Baja	
Tipo de MM:	Deslizamiento	
Descripción		
Deslizamiento compuesto por calizas con intercalación de margas que se presentan muy alteradas. Posee unas dimensiones de 25m*20m y que un representa un área de influencia de 500m m2		
NW SE 		
Deslizamiento identificado en la margen izquierda de la carretera Lomas del Indio cerca al Km 4+860.		

Figura 29 Descripción del movimiento de masa (MM2)

MM-03		
Coordenadas UTM	Norte	Este
	9231950	815650
Cota	2828msnm	
Unidad geológica involucrada	Formación Yumagual	
Inclinación de la cara del MM	40º	
Color por intemperización	Gris amarillento	
Tipo de MM	Deslizamiento	
Descripción		
Deslizamiento compuesto por intercalación de arcillitas calcáreas que se presentan muy alteradas. Posee unas dimensiones de 30m*25m y que un representa un área de influencia de 750 m²		
		
Deslizamiento identificado en la margen izquierda de la carretera Lomas del Indio cerca al Km 7+960.		

Figura 30 Descripción del movimiento de masa (MM3)

MM-04		
Coordenadas UTM	Norte	Este
	9232250	815560
Cota	2870msnm	
Unidad geológica involucrada	Formación Yumagual	
Inclinación de la cara del MM	28°	
Color por intemperización	Gris amarillento	
Tipo de MM	Deslizamiento	
Descripción		
SO NE  Deslizamiento compuesto por una intercalación de arcillitas calcáreas y margas que se presentan intensamente alteradas. Posee unas dimensiones de 38m*55m y que un representa un área de influencia de 2080 m² Deslizamiento identificado en la margen izquierda de la carretera Lomas del Indio cerca al Km 10+20.		

Figura 31 Descripción del movimiento de masa (MM4)

MM-05		
Coordenadas UTM	Norte	Este
	9232150	815560
Cota	2825msnm	
Unidad geológica involucrada	Formación Yumagual	
Inclinación de la cara del MM	30°	
Color por intemperización	Gris rojizo a gris anaranjado	
Tipo de MM	Deslizamiento	
Descripción		
		
Deslizamiento compuesto por una intercalación de arcillitas calcáreas, margas y calizas que se presentan intensamente intemperizadas. Posee unas dimensiones de 40m*40m y que representa un área de influencia de 1600 m²1 aprox. Deslizamiento identificado en la margen derecha de la carretera Lomas del Indio cerca al Km 10+120. Se relaciona a la zona de falla		

Figura 32 Descripción del movimiento de masa (MM5)

4.2.1. Delimitación del área de influencia relacionada a los MM

Los movimientos de masa identificados en todo el recorrido de la carretera Lomas del Indio representan peligros latentes ante un eventual evento de precipitación anómalo denominado por SENAMHI como umbral de precipitación (factor desencadenante). Este desencadenamiento afectaría al tramo de carretera interrumpiendo el tránsito, a las tierras de cultivos y terrenos de pastos de ganado generando pérdidas económicas.

4.2.2. Identificación de parámetros de evaluación

Los cálculos de las áreas inestables fueron realizados con las salidas al campo, las mediciones mediante métodos directos y el cartografiado de los MM.

4.2.3. Magnitud de las zonas inestables

Dentro del tramo de carretera Lomas del Indio se identificaron 05 MM ubicados mayormente en la parte central del tramo de dicha carretera. La medición de los MM se realizó mediante la wincha y el cálculo de las áreas se realizó mediante fórmulas matemáticas establecidas.

Tabla 11 Área de movimiento de masa

Parámetro	Descripción
Área de influencia de los movimientos de masa (MM)	Mayor a 2000m ²
	1500- 2000m ²
	1000- 1500m ²
	500- 1000m ²
	Menos de 500m ²

4.2.3.1. Determinación de la ponderación del área de influencia

Tabla 12 Ponderación de la magnitud del área de influencia

Factor	Mayor de 2000m ²	1500- 2000m ²	1000- 1500m ²	500- 1000m ²	Menos de 500m ²
Mayor a 2000m ²	1.00	2.00	4.00	6.00	8.00
1500- 2000m ²	0.50	1.00	2.00	4.00	6.00
1000- 1500m ²	0.25	0.50	1.00	2.00	4.00
500- 1000m ²	0.17	0.25	0.50	1.00	2.00
Menos de 500m ²	0.13	0.17	0.25	0.50	1.00
Suma	2.05	3.92	7.75	13.50	21.00
1/suma	0.49	0.26	0.13	0.07	0.05

4.2.3.2. Determinación de la matriz de normalización del área de influencia

Tabla 13 Matriz de normalización

Factor	Mayor de 2000m ²	1500- 2000m ²	1000- 1500m ²	500- 1000m ²	Menos de 500m ²	Valoración
Mayor a 2000m ²	0.49	0.51	0.52	0.44	0.38	0.47
1500- 2000m ²	0.24	0.26	0.26	0.30	0.29	0.27
1000- 1500m ²	0.12	0.13	0.13	0.15	0.19	0.14
500- 1000m ²	0.08	0.06	0.06	0.07	0.10	0.08
Menos de 500m ²	0.06	0.04	0.03	0.04	0.05	0.04
Suma	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

Fuente: Adaptado de CENEPRED, (2015).

4.2.3.3. Determinación del Índice de consistencia

Para determinar $\lambda_{\max}$ se sigue el procedimiento de acuerdo al manual CENEPRED, (2015).

Tabla 14 Producto de la primera columna con el peso de la primera fila

a) Valores de la primera columna	b) Peso de la primera fila	a*b
1.00	0.47	0.47
0.50	0.47	0.23
0.25	0.47	0.12
0.17	0.47	0.08
0.13	0.47	0.06

Tabla 15 Producto de la segunda columna con el peso de la segunda fila

a) Valores de la segunda columna	b) Peso de la segunda fila	a*b
2.00	0.27	0.54
0.54	0.27	0.27
0.27	0.27	0.13
0.13	0.27	0.07
0.07	0.27	0.06
0.04		

Tabla 16 Producto de la tercera columna con el peso de la tercera fila

a) Valores de la tercera columna	b) Peso de la tercera fila	a*b
4.00	0.14	0.57
2.00	0.14	0.29
1.00	0.14	0.14
0.50	0.14	0.07
0.25	0.14	0.04

Tabla 17 Producto de la cuarta columna con el peso de la cuarta fila

a) Valores de la cuarta columna	b) Peso de la cuarta fila	a*b
6.00	0.08	0.46
4.00	0.08	0.30
2.00	0.08	0.15
1.00	0.08	0.08
0.50	0.08	0.04

Tabla 18 Producto de la quinta columna con el peso de la quinta fila

a) Valores de la quinta columna	b) Peso de la quinta fila	a*b
8.00	0.04	0.36
6.00	0.04	0.27
4.00	0.04	0.18
2.00	0.04	0.09
1.00	0.04	0.04

Tabla 19 Suma ponderada de a*b

(a*b)1	(a*b)2	(a*b)3	(a*b)4	(a*b)5	Suma ponderadas
0.47	0.54	0.57	0.46	0.36	2.39
0.23	0.27	0.29	0.30	0.27	1.36
0.12	0.13	0.14	0.15	0.18	0.72
0.08	0.07	0.07	0.08	0.09	0.38
0.06	0.04	0.04	0.04	0.04	0.22

Tabla 20 Determinación del $\lambda_{\max}$

Vector (suma ponderada)	Peso (valoración)	Vector*peso (λ)
2.39	0.47	5.11
1.36	0.27	5.08
0.72	0.14	5.05
0.38	0.08	5.04
0.22	0.04	5.02
$\lambda_{\max}$		5.06

4.2.3.4. Determinación del IC y RC

Hallando IC

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

$$IC = \frac{5.06 - 5}{5 - 1}$$

$$IC = \frac{0.06}{4}$$

$$IC = 0.015$$

Hallando RC

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

Tabla 21 Valores para el cálculo de la relación de consistencia.

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
IA	0.525	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.513	1.535	1.555

Fuente: Aguaron y Moreno 2001 & INGEOMINAS, (2000).

Reemplazando valores

$$RC = \frac{0.015}{1.12}$$

$$RC = 0.013$$

Tabla 22 Índice de consistencia y relación de consistencia

Relación de consistencia (RC)	0.013
Índice de consistencia (IC)	0.015
Índice aleatorio (tabla 15)	1.12

Relación de consistencia ($RC < 0.100$)

4.3. SUSCEPTIBILIDAD DE LA ZONA DE ESTUDIO ANTE LOS MM

La susceptibilidad es la mayor o menor predisposición de que se produzca un movimiento de masa (MM) como consecuencia de factores condicionantes y desencadenantes. Los factores condicionantes como litología, la pendiente, cobertura vegetal y geomorfología y el factor desencadenante que produce los movimientos de masa como un evento de lluvia extremadamente anómalo denominado por SENAMHI como umbral de precipitación. En la siguiente figura se representa la secuencia del trabajo realizado para determinar la susceptibilidad. Por lo que primero se va a realizar la ponderación de los factores condicionantes y desencadenantes:

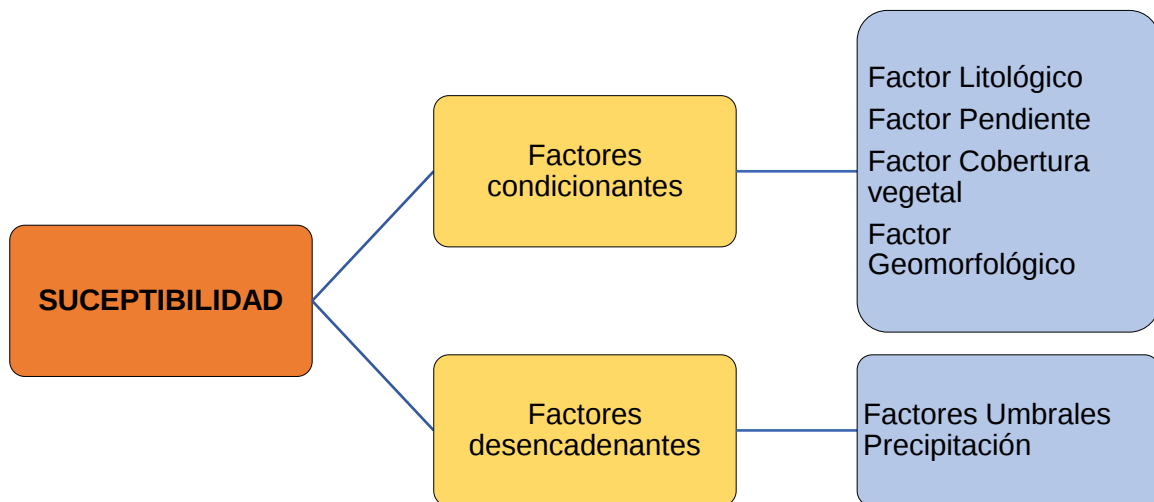


Figura 33 Determinación de la susceptibilidad

Fuente: Adaptado de PM41ZRE, (2021).

4.3.1. Factores condicionantes

4.3.1.1. Ponderación de los factores condicionantes

Tiene como objetivo la determinación del peso que viene a ser valor de importancia del factor y una siguiente matriz normalizada. Con la matriz normalizada se obtuvo los pesos ponderados para cada descriptor que nos dio su importancia ante una ocurrencia de un MM. También para cada factor condicionante y desencadenante se calculó el índice de Consistencia (IC) y la relación de Consistencia (RC) para verificar que los procedimientos fueron los correctos. Por el análisis efectuado en campo mediante el método de juicio de expertos, se determina que el factor condicionante en orden de importancia es: *litológico* > *pendiente* > *cobertura vegetal* > *geomorfológico*. En seguida se va a realizar la ponderación de los factores condicionantes:

Tabla 23 Ponderación de los factores condicionantes

Factores	Factor litológico	Factor pendiente	Factor cobertura vegetal	Factor geomorfológico
Factor litológico	1.00	3.00	5.00	7.00
Factor pendiente	0.33	1.00	3.00	5.00
Factor cobertura vegetal	0.20	0.33	1.00	3.00
Factor geomorfológico	0.14	0.20	0.33	1.00
Suma	1.67	4.53	9.33	16.00
1/suma	0.60	0.22	0.11	0.06

4.3.1.2. Normalización de los factores condicionantes

Tabla 24 Matriz de normalización de pares de los factores condicionantes

Factor	Factor litológico	Factor pendiente	Factor cobertura vegetal	Factor geomorfológico	Valoración
Factor litológico	0.60	0.66	0.54	0.44	0.56
Factor pendiente	0.20	0.22	0.32	0.31	0.26
Factor Cobertura vegetal	0.12	0.07	0.11	0.19	0.12
Factor geomorfológico	0.08	0.04	0.04	0.06	0.06
Suma	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00

4.3.1.3. Determinación del IC y RC

Siendo $\lambda_{\max}=4.15$

Hallando IC

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

$$IC = \frac{4.15-4}{4-1}$$

$$IC = \frac{0.15}{3}$$

$$IC = 0.05$$

Hallando RC

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

Hallando RC

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

Tabla 25 Valores para el cálculo de la relación de consistencia.

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
IA	0.525	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.513	1.535	1.555

Fuente: Aguaron y Moreno 2001 & INGEOMINAS, (2000).

Reemplazando valores

$$RC = \frac{0.05}{0.9}$$

$$RC = 0.005$$

Índice de consistencia

Tabla 26 Índice de consistencia y relación de consistencia

Relación de consistencia (RC)	0.005
Índice de consistencia (IC)	0.05
Índice aleatorio (tabla 15)	0.9

Relación de consistencia ($RC < 0.100$)

Luego de haber calculado la ponderación y normalización y con ello se determinó el peso que es el orden de importancia ante un eventual proceso de MM. Posteriormente se calculó los pesos de cada factor condicionante:

4.3.1.4. Factor litológico

4.3.1.4.1. Ponderación del Factor litológico

Tabla 27 Tabla de ponderación del factor litológico

Factor litológico	Arcillitas calcáreas	Intercalación de calizas y margas	Calizas compactas	Calizas estratos delgados	Depósitos inconsolidados
Arcillitas calcáreas	1.000	3.000	4.000	7.000	8.000
Intercalación de calizas y margas	0.333	1.000	3.000	4.000	7.000
Calizas compactas	0.250	0.333	1.000	3.000	4.000
Calizas estratos delgados	0.143	0.250	0.333	1.000	3.000
Depósitos inconsolidados	0.125	0.143	0.250	0.333	1.000
SUMA	1.851	4.726	8.583	15.333	23.000
1/SUMA	0.540	0.212	0.117	0.065	0.043

4.3.1.4.2. Determinación de la normalización del factor litológico

Tabla 28 Matriz de normalización del Factor litológico

Factor litológico	Arcillitas calcáreas	Intercalación de calizas y margas	Calizas compactas	Calizas estratos delgados	Depósitos inconsolidados	Valor
Arcillitas calcáreas	0.540	0.635	0.466	0.457	0.348	0.489
Intercalación de calizas y margas	0.180	0.212	0.350	0.261	0.304	0.261
Calizas compactas	0.135	0.070	0.117	0.196	0.174	0.138
Calizas estratos delgados	0.077	0.053	0.039	0.065	0.130	0.073
Depósitos inconsolidados	0.068	0.030	0.029	0.022	0.043	0.038
SUMA	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

4.3.1.4.3. Determinación del IC y RC del factor litológico

Tabla 29 Determinación del λ_{max}

Vector suma ponderada	Valoración	λ
2.644	0.489	5.406
1.400	0.261	5.357
0.720	0.138	5.205
0.369	0.073	5.067
0.196	0.038	5.095
	λ_{max}	5.226

Siendo $\lambda_{max} = 5.226$

Hallando IC

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

$$IC = \frac{5.226 - 5}{5 - 1}$$

$$IC = \frac{0.226}{4}$$

$$IC = 0.0565$$

Hallando RC

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

Hallando RC

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

Tabla 30 Valores para el cálculo de la relación de consistencia.

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
IA	0.525	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.513	1.535	1.555

Fuente: Aguaron y Moreno 2001 & INGEOMINAS, (2000).

Reemplazando valores :

$$RC = \frac{0.0565}{1.12}$$

$$RC = 0.050$$

Índice de consistencia

Tabla 31 Índice de consistencia y relación de consistencia

Relación de consistencia (RC)	0.050
Índice de consistencia (IC)	0.0565
Índice aleatorio (tabla 15)	1.12

Relación de consistencia (RC< 0.100)

4.3.1.5. Factor de pendiente

4.3.1.5.1. Ponderación del Factor de pendientes

Tabla 32 Elaboración de la Ponderación del Factor de pendientes

Pendiente	37° a mas	27°- 37°	14°--27°	07°- 14°	00°- 07
37° a mas	1.000	3.000	5.000	6.000	8.000
27°- 37°	0.333	1.000	3.000	5.000	6.000
14°--27°	0.200	0.333	1.000	3.000	4.000
07°- 14°	0.167	0.200	0.333	1.000	3.000
00°- 07°	0.125	0.167	0.200	0.333	1.000
SUMA	1.825	4.700	9.533	15.333	22.000
1/SUMA	0.548	0.213	0.105	0.065	0.045

4.3.1.5.2. Determinación de la normalización del factor litológico

Tabla 33 Matriz de normalización del Factor pendiente

Pendiente	37° a mas	27°- 37°	14°--27°	07°- 14°	00°- 07	Valoración
37° a mas	0.548	0.638	0.524	0.391	0.364	0.493
27°- 37°	0.183	0.213	0.315	0.326	0.273	0.262
14°--27°	0.110	0.071	0.105	0.196	0.182	0.133
07°- 14°	0.091	0.043	0.035	0.065	0.136	0.074
00°- 07°	0.068	0.035	0.021	0.022	0.045	0.038
SUMA	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

4.3.1.5.3. Determinación del IC y RC del factor pendiente

Para el cálculo de λ_{max} se realizó el mismo procedimiento para el cálculo de λ_{max} de las áreas de influencia tal como lo sugiere el Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2da versión.

Tabla 34 Determinación del λ_{max}

Vector suma ponderada	Valoración	λ
2.693	0.493	5.461
1.425	0.262	5.442
0.694	0.133	5.237
0.368	0.074	4.968
0.195	0.038	5.072
	λ_{max}	5.236

Siendo $\lambda_{max}=5.236$

Hallando IC

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

$$IC = \frac{5.236 - 5}{5 - 1}$$

$$IC = \frac{0.236}{4}$$

$$IC = 0.059$$

Hallando RC

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

Hallando RC

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

Tabla 35 Valores para el cálculo de la relación de consistencia.

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
IA	0.525	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.513	1.535	1.555

Fuente: Aguaron y Moreno 2001 & INGEOMINAS, (2000).

Reemplazando valores

$$RC = \frac{0.059}{1.12}$$

$$RC = 0.053$$

Índice de consistencia

Tabla 36 Índice de consistencia y relación de consistencia

Relación de consistencia (RC)	0.053
Índice de consistencia (IC)	0.059
Índice aleatorio (tabla 15)	1.12

Relación de consistencia ($RC < 0.100$)

4.3.1.6. Factor geomorfológico

4.3.1.6.1. Ponderación del Factor geomorfológico

Tabla 37 Elaboración de la Ponderación del Factor de pendientes

Factor geomorfológico	Laderas fuertemente empinadas	Laderas empinadas	Colinas	Lomadas	Valles
Laderas fuertemente empinadas	1.00	3.00	5.00	7.00	9.00
Laderas empinadas	0.33	1.00	3.00	5.00	7.00
Colinas	0.20	0.33	1.00	3.00	5.00
Lomadas	0.14	0.20	0.33	1.00	3.00
Valles	0.11	0.14	0.20	0.33	1.00
SUMA	1.78	4.67	9.53	16.33	25.00
1/SUMA	0.56	0.21	0.10	0.06	0.04

4.3.1.6.2. Normalización del factor geomorfológico

Tabla 38 Matriz de normalización del Factor geomorfológico

Factor Geomorfológico	Laderas fuertemente empinadas	Laderas empinadas	Colinas	Lomadas	Valles	Valoración
Laderas fuertemente empinadas	0.562	0.642	0.525	0.429	0.36	0.504
Laderas empinadas	0.185	0.214	0.315	0.306	0.280	0.260
Colinas	0.112	0.071	0.105	0.184	0.200	0.134
Lomadas	0.079	0.043	0.035	0.061	0.120	0.067
Valles	0.062	0.030	0.021	0.020	0.040	0.035
SUMA	1.000	1.000	1.000	1.000	1.00	1.000

4.3.1.6.3. Determinación del IC y RC

Para el cálculo de $\lambda_{\max}$ se realizó el mismo procedimiento para el cálculo de $\lambda_{\max}$ de las áreas de influencia tal como lo sugiere el Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2da versión.

Tabla 39 Determinación del λ_{max}

Vector suma ponderada	Valoración	λ
2.519	0.487	5.172
1.385	0.272	5.087
0.692	0.137	5.050
0.333	0.066	5.056
0.190	0.038	5.005
	λ_{max}	5.074

Siendo $\lambda_{max}=5.074$

Hallando IC

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

$$IC = \frac{5.074 - 5}{5 - 1}$$

$$IC = \frac{0.074}{4}$$

$$IC = 0.019$$

Hallando RC

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

Hallando RC

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

Tabla 40 Valores para el cálculo de la relación de consistencia

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
IA	0.525	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.513	1.535	1.555

Fuente: Aguaron y Moreno 2001 & INGEOMINAS, (2000).

Reemplazando valores

$$RC = \frac{0.019}{1.12}$$

$$RC = 0.017$$

Índice de consistencia

Tabla 41 Índice de consistencia y relación de consistencia

Relación de consistencia (RC)	0.017
Índice de consistencia (IC)	0.019
Índice aleatorio (tabla 15)	1.12

Relación de consistencia ($RC < 0.100$)

4.3.1.7. Factor de cobertura vegetal

4.3.1.7.1. Ponderación del Factor cobertura vegetal

Tabla 42 Elaboración de la Ponderación del Factor de cobertura vegetal

Factor cobertura vegetal	Zonas de cultivo	Bosques reforestados	Pobre cobertura vegetal	Zona urbana	Pastos naturales
Zonas de cultivo	1.000	3.000	6.000	7.000	8.000
Bosques reforestados	0.333	1.000	3.000	6.000	7.000
Pobre cobertura vegetal	0.167	0.333	1.000	3.000	6.000
Zona urbana	0.143	0.167	0.333	1.000	3.000
Pastos naturales	0.125	0.143	0.167	0.333	1.000
SUMA	1.768	4.643	10.500	17.333	25.000
1/SUMA	0.566	0.215	0.095	0.058	0.040

4.3.1.7.2. Normalización del factor geomorfológico

Tabla 43 Matriz de normalización del Factor de cobertura vegetal

Factor cobertura vegetal	Zonas de cultivo	Bosques reforestados	Pobre cobertura vegetal	Zona urbana	Pastos naturales	Valoración
Zonas de cultivo	0.566	0.646	0.571	0.404	0.320	0.501
Bosques reforestados	0.189	0.215	0.286	0.346	0.280	0.263
Pobre cobertura vegetal	0.094	0.072	0.095	0.173	0.240	0.135
Zona urbana	0.081	0.036	0.032	0.058	0.120	0.065
Pastos naturales	0.071	0.031	0.016	0.019	0.040	0.035
SUMA	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

4.3.1.7.3. Determinación del IC y RC

Tabla 44 Determinación del λ_{max}

Vector suma ponderada	Valoración	λ
2.839	0.501	5.662
1.473	0.263	5.599
0.714	0.135	5.291
0.332	0.065	5.084
0.180	0.035	5.091
	λ_{max}	5.345

Siendo $\lambda_{max} = 5.345$

Hallando IC

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

$$IC = \frac{5.345 - 5}{5 - 1}$$

$$IC = \frac{0.345}{4}$$

$$IC = 0.086$$

Hallando RC

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

Hallando RC

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

Tabla 45 Valores para el cálculo de la relación de consistencia

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
IA	0.525	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.513	1.535	1.555

Fuente: Aguaron y Moreno 2001 & INGEOMINAS, (2000).

Reemplazando valores

$$RC = \frac{0.086}{1.2}$$

$$RC = 0.072$$

Índice de consistencia

Tabla 46 Índice de consistencia y relación de consistencia

Relación de consistencia (RC)	0.072
Índice de consistencia (IC)	0.086
Índice aleatorio (tabla 15)	0.9

Relación de consistencia ($RC < 0.100$)

4.3.2. Factores desencadenantes

4.3.2.1. Ponderación del Factor umbrales de precipitación

Se define como umbral de precipitación a un fenómeno meteorológico extremo, es un evento muy raro en un lugar y en un momento determinado. IPCC (2007). Las precipitaciones que superan el percentil 90, calculado de los días con precipitación acumulada diaria mayor a un 1mm ($RR > 1\text{mm}$) son considerados como días lluviosos; muy lluviosos las precipitaciones que superan el percentil 95. Mientras que extremadamente lluviosos (Extremadamente fuertes), los que superan el percentil 99.

Los datos utilizados en esta investigación se obtuvieron de la información contenida en la Nota Técnica titulada en Umbrales y precipitaciones absolutas elaboradas por el SENAMHI (2014) referente a la información de la Estación Meteorológica de

Celendín. Para el cálculo de umbrales de precipitación, el SENAMHI utilizó la metodología descrita en la nota técnica 001- SENAMHI-DGM-2014 denominado Estimación de umbrales de precipitación extremas para la emisión de avisos meteorológicos. Se considera que ante unas precipitaciones extremas iguales o por encima de estos umbrales podría constituir un factor desencadenante para que se inicie los MM.

Tabla 47 Umbrales de precipitación de la Estación Celendín. Región Cajamarca

Umbrales de precipitación	Caracterización de lluvias extremas	Umbrales calculados para la Estación: Celendín
$RR/día > 99p$	Extremadamente lluvioso	$RR > 43.22mm$
$95p < RR/día \leq 99p$	Muy lluvioso	$26.5mm < RR \leq 43.22mm$
$90p < RR/día \leq 95p$	Lluvioso	$20.2mm < RR \leq 26.52mm$
$75p < RR/día \leq 90p$	Moderadamente lluvioso	$11.5mm < RR \leq 20.2mm$

Fuente: SENAMHI, (2014).

4.3.2.2. Determinación de la ponderación del factor de umbrales de precipitación

Tabla 48 Elaboración de la Ponderación del Factor de cobertura vegetal

Umbrales de precipitación	Extremadamente lluvioso $RR > 43.3mm$	Muy lluvioso $26.5mm < RR \leq 43.2mm$	Lluvioso $20.2mm < RR \leq 26.5mm$	Moderadamente lluvioso $11.5mm < RR \leq 20.2mm$	Escasamente lluvioso $RR < 11.52mm$
Extremadamente lluvioso $RR > 43.3mm$	1.000	3.000	4.000	7.000	9.00
Muy lluvioso $26.5mm < RR \leq 43.2mm$	0.333	1.000	3.000	4.000	7.00
Lluvioso $20.2mm < RR \leq 26.5mm$	0.250	0.333	1.000	3.000	4.00
Moderadamente lluvioso $11.5mm < RR \leq 20.2mm$	0.140	0.250	0.333	1.000	3.00
Escasamente lluvioso $RR < 11.52mm$	0.110	0.140	0.250	0.333	1.00
SUMA	1.833	4.723	8.583	15.333	24.00
1/SUMA	0.546	0.212	0.117	0.065	0.042

Fuente: SENAMHI, (2014).

4.3.2.3. Determinación de la normalización del factor de umbrales de precipitación

Tabla 49 Matriz de normalización del factor de umbrales de precipitación

Umbrales de precipitación	Extremadamente lluvioso $RR > 43.3mm$	Muy lluvioso $26.5mm < RR \leq 43.2mm$	Lluvioso $20.2mm < RR \leq 26.5mm$	Moderadamente lluvioso $11.5mm < RR \leq 20.2mm$	Escasamente lluvioso $RR < 11.52mm$	Valoración
Extremadamente lluvioso $RR > 43.3mm$	0.546	0.635	0.466	0.457	0.375	0.496
Muy lluvioso $26.5mm < RR \leq 43.2mm$	0.182	0.212	0.350	0.261	0.292	0.259
Lluvioso $20.2mm < RR \leq 26.5mm$	0.136	0.071	0.117	0.196	0.167	0.137
Moderadamente lluvioso $11.5mm < RR \leq 20.2mm$	0.076	0.053	0.039	0.065	0.125	0.072
Escasamente lluvioso $RR < 11.52mm$	0.060	0.030	0.029	0.022	0.042	0.036
SUMA	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

Fuente: SENAMHI, (2014).

4.3.2.4. Determinación del IC y RC

Tabla 50 Determinación del λ_{max}

Vector suma ponderada	Valoración	λ
2.651	0.496	5.349
1.377	0.259	5.316
0.708	0.137	5.163
0.361	0.072	5.035
0.185	0.036	5.088
	λ_{max}	5.190

Siendo $\lambda_{max}=5.190$

Hallando IC

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

$$IC = \frac{5.190 - 5}{5 - 1}$$

$$IC = \frac{0.190}{4}$$

$$IC = 0.048$$

Hallando RC

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

Hallando RC

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

Tabla 51 Valores para el cálculo de la relación de consistencia

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
IA	0.525	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.513	1.535	1.555

Fuente: Aguaron y Moreno 2001 & INGEOMINAS, (2000).

Reemplazando valores

$$RC = \frac{0.048}{1.12}$$

$$RC = 0.043$$

Índice de consistencia

Tabla 52 Índice de consistencia y relación de consistencia

Relación de consistencia (RC)	0.043
Índice de consistencia (IC)	0.048
Índice aleatorio (tabla 15)	1.12

Relación de consistencia ($RC < 0.100$)

4.4. ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD DE LA ZONA DE LA CARRETERA LOMAS DEL INDIO

La vulnerabilidad se define como la susceptibilidad de la población, la estructura física o las actividades socioeconómicas de sufrir daño por la acción de un MM. Es un parámetro muy importante para calcular el nivel de riesgo. Para este propósito vamos a analizar la población que puede ser afectada por un eventual desencadenamiento de un MM.

La carretera Cajamarca- Celendín- Jorge Chávez posee un desvío cerca al Centro Poblado La Laguna. Esta carretera es denominada Lomas del indio y que conduce al Distrito de Jorge Chávez. Este tramo de carretera empieza a una altura de 3100 msnm y desciende a 2750msnm (550m) en 6 desarrollos principales llegando al Distrito de Jorge Chávez. En su recorrido se ubican abundantes zonas de cultivos y plantaciones de eucaliptos, pinos y pastos, canales de regadíos. En cuanto a los pastos, estos, sirven de alimentos al ganado vacuno principalmente. No existen pueblos en el trayecto, más bien algunas viviendas esporádicas. Para el análisis de vulnerabilidad es necesario hacer un análisis de estos factores de exposición socio-económicas a los MM.

4.4.1. Análisis de vulnerabilidad

Para calcular la vulnerabilidad de la zona de la carretera Lomas del Indio se va a considerar la exposición socio económica.

4.4.1.1. Ponderación de la exposición socio- económicas

Tabla 53 Elaboración de la Ponderación del Factor de cobertura vegetal

Exposición Socio- económica	Interrupción de carretera	Daño a los terrenos de cultivo	Daño a pastos de ganadería	Daño a los canales de regadíos	Daño a las viviendas
Interrupción de la carretera	1.000	2.000	4.000	6.000	8.000
Daño a los terrenos de cultivo	0.500	1.000	2.000	4.000	6.000
Daño a los pastos de ganadería	0.250	0.500	1.000	2.000	4.000
Daño a los canales de regadío	0.167	0.250	0.500	1.000	2.000
Daño a las viviendas	0.125	0.167	0.250	0.500	1.000
SUMA	2.042	3.917	7.750	13.500	21.000
1/SUMA	0.490	0.255	0.129	0.074	0.048

4.4.1.2. Normalización del factor de exposición socio- económicas

Tabla 54 Matriz de normalización del factor de umbrales de precipitación

Exposición económica	Interrupción de la carretera	Daño a los terrenos de cultivo	Daño a los pastos de ganadería	Daño a los canales de regadío	Daño a las viviendas	Valoración
Interrupción de la carretera	0.490	0.511	0.516	0.444	0.381	0.468
Daño a los terrenos de cultivo	0.245	0.255	0.258	0.296	0.286	0.268
Daño a los pastos de ganadería	0.122	0.128	0.129	0.148	0.190	0.144
Daño a los canales de regadío	0.082	0.064	0.065	0.074	0.095	0.076
Daño a las viviendas	0.061	0.043	0.032	0.037	0.048	0.044
SUMA	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000

4.4.1.3. Determinación del IC y RC

El cálculo de $\lambda_{\max}$ se realizó el mismo procedimiento para el cálculo de $\lambda_{\max}$ de las áreas de influencia tal como lo sugiere el Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, 2da versión.

Tabla 55 Determinación del $\lambda_{\max}$

Vector ponderada	suma	Valoración	λ
2.387		0.468	5.090
1.358		0.268	5.065
0.723		0.144	5.036
0.381		0.076	5.022
0.221		0.044	5.011
		$\lambda_{\max}$	5.046

Siendo $\lambda_{\max}=5.046$

Hallando IC

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

$$IC = \frac{5.046 - 5}{5 - 1}$$

$$IC = \frac{0.046}{4}$$

$$IC = 0.0115$$

Hallando RC

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

Hallando RC

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

Tabla 56 Valores para el cálculo de la relación de consistencia

N	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
IA	0.525	0.9	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.513	1.535	1.555

Fuente: Aguaron y Moreno 2001 & INGEOMINAS, (2000).

Reemplazando valores

$$RC = \frac{0.0115}{1.12}$$

$$RC = 0.0103$$

Índice de consistencia

Tabla 57 Índice de consistencia y relación de consistencia

Relación de consistencia (RC)	0.0103
Índice de consistencia (IC)	0.0015
Índice aleatorio (tabla 15)	1.12

Relación de consistencia ($RC < 0.100$)

4.4.2. Definición del escenario

De la información obtenida de SENAMHI, (2014) acerca de la estación Celendín que determina que los umbrales de precipitación indican: precipitaciones entre $RR > 43.22mm$ calificado como extremadamente lluvioso y precipitaciones de $26.5mm < RR \leq 43.22mm$ catalogado como muy lluvioso y con percentiles de $95p < RR/dia \leq 99p$.

Con lluvias extremas sobre encima de estos umbrales y durante varios días se desencadenaría los MM sobre todo en depósitos de arcillitas calcáreas, calizas y margas que se presentan en la zona de estudio muy meteorizadas y alteradas.

4.4.3. Determinación de los niveles de peligro

En la tabla se muestra el resumen de los pesos calculados de los factores condicionantes y desencadenantes.

En las tablas se explican los procedimientos para el cálculo de los niveles de peligro. Los cálculos fueron realizados siguiendo los procedimientos del Análisis jerárquico que se explican en el Manual para la evaluación de Riesgos originados por fenómenos naturales Segunda Versión (CENEPRED, 2015.)

Tabla 58 Factores condicionantes y desencadenante

Factor condicionante (FC)								Factor desencadenante (FD)			
Factor litológico (FL)		Factor de pendientes (FP)		Factor Cobertura vegetal (FCV)		Factor geomorfológico (FG)		Valor	Peso	Umbrales de Precipitación (RR)	
Peso (FL)	Valor (UL)	Peso (FL)	Valor (UL)	Peso (FL)	Valor (UL)	Peso (FL)	Valor (UL)			Valor	Peso
0.56	0.489	0.26	0.493	0.12	0.501	0.06	0.504	0.492	0.6	0.496	0.4
0.56	0.261	0.26	0.262	0.12	0.263	0.06	0.260	0.261	0.6	0.259	0.4
0.56	0.138	0.26	0.133	0.12	0.135	0.06	0.134	0.136	0.6	0.137	0.4
0.56	0.073	0.26	0.074	0.12	0.065	0.06	0.067	0.072	0.6	0.072	0.4
0.56	0.039	0.26	0.038	0.12	0.036	0.06	0.035	0.038	0.6	0.04	0.4

4.4.4. Cálculo de la susceptibilidad

Para a el cálculo de la susceptibilidad se asume el peso de 0.6 y para el factor desencadene un peso de 0.4 tal como lo sugiere (SENEPRED, 2015).

Tabla 59 Cálculo de la susceptibilidad

Susceptibilidad				
Factor condicionante (FC)		Factor desencadenante (FD)		Valor
Valor	Peso	Valor	Peso	
0.492	0.6	0.496	0.4	0.4936
0.261	0.6	0.259	0.4	0.2602
0.136	0.6	0.137	0.4	0.1364
0.072	0.6	0.072	0.4	0.0720
0.038	0.6	0.04	0.4	0.0372

4.4.5. Cálculo del peligro

Como se están comparando dos factores tanto condicionantes y desencadenantes se asume un peso 0.5 para cada uno.

Tabla 60 Calculo del Peligro

Peligro				
Factor condicionante (FC)		Factor desencadenante (FD)		Valor
Parámetro de evaluación (magnitud de movimiento de masa)	Peso	Susceptibilidad	Peso	
0.470	0.5	0.4936	0.5	0.4818
0.270	0.5	0.2602	0.5	0.2651
0.140	0.5	0.1364	0.5	0.1382
0.080	0.5	0.0720	0.5	0.0760
0.040	0.5	0.0372	0.5	0.0386

4.4.5.1 Determinación de los rangos de peligro

Tabla 61 Rangos de peligro

NIVEL	RANGO				
MUY ALTO	0.2651	<	P	≤	0.4818
ALTO	0.1382	<	P	≤	0.2651
MEDIO	0.076	<	P	≤	0.1382
BAJO	0.0386	≤	P	≤	0.076

4.4.6. Determinación de la vulnerabilidad

Como se está considerando un solo factor que es la exposición a los MM se considera el peso de 1 tal como lo sugiere SENEPRD, (2015).

Tabla 62 Determinación del grado de vulnerabilidad

Grado de vulnerabilidad			
Exposición a los MM			Rango
Cercanía a los MM		Peso	
Interrupción de la carretera	0.468	1.00	0.468
Daño a los terrenos de cultivo	0.268	1.00	0.268
Daño a los pastos de ganadería	0.144	1.00	0.144
Daño a los canales de regadío	0.076	1.00	0.076
Daño a las viviendas	0.044	1.00	0.044
Total	1.000		1.000

4.4.6.1. Determinación de los rangos de vulnerabilidad

Tabla 63 Determinación de los rangos de vulnerabilidad

NIVEL	RANGO				
MUY ALTA	0.268	<	V	≤	0.468
ALTA	0.140	<	V	≤	0.268
MEDIA	0.076	<	V	≤	0.140
BAJA	0.044	≤	V	≤	0.076

4.4.7. Evaluación del nivel de riesgo de la Carretera Lomas del indio

La evaluación del Riesgo de la Carretera Lomas del indio se realizó comparando los niveles de peligrosidad y vulnerabilidad. La prevención y reducción del riesgo

de desastre por MM son importantes para garantizar el desarrollo y crecimiento económico de una localidad y una mejor calidad de vida.

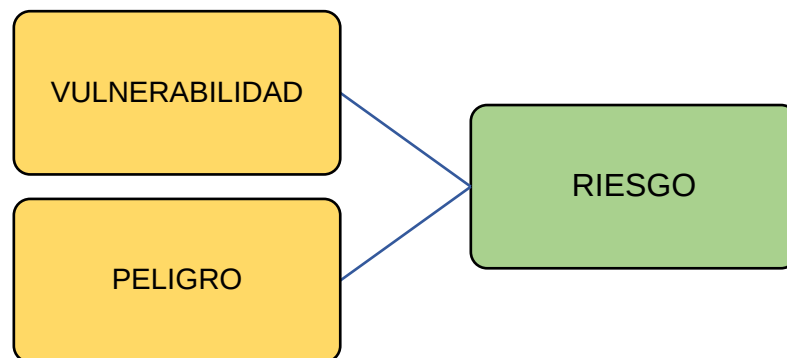


Figura 34 Determinación del riesgo mediante la vulnerabilidad y el peligro.

$$Rie(t = f(Pi * Ve)$$

Donde:

R= riesgo

f= en función

Pi=peligro con la intensidad mayor o igual a i durante un periodo de exposición t

Ve= vulnerabilidad de un elemento expuesto.

A continuación, se construye la matriz de riesgo considerando los valores de la peligrosidad y vulnerabilidad calculados:

4.4.7.1. Cálculo de los niveles de riesgo contra MM

Tabla 64 Niveles de riesgo por MM en la Carretera Lomas del Indio.

PMA	0.4818	0.037	0.005	0.129	0.225
PA	0.2651	0.020	0.003	0.071	0.033
PMA	0.1382	0.011	0.001	0.037	0.017
PB	0.076	0.006	0.001	0.020	0.010
		0.076	0.140	0.268	0.468
		VB	VM	VA	VMA

Donde:

PMA : Peligro Muy Alto

PA : Peligro Alto

PM : Peligro Medio

PB : Peligro Bajo

VMA : Vulnerabilidad Muy Alta

VA : Vulnerabilidad Alta

VM : Vulnerabilidad Media

VB : Vulnerabilidad Baja

Con la matriz elaborada que se observa en la parte superior se ha determinado los rangos de riesgo y con ello se ha construido la estratificación del riesgo de la zona Lomas del Indio por MM:

4.4.7.2. Determinación de los rangos de riesgo contra MM

Tabla 65 Determinación de los rangos de riesgo

NIVEL	RANGO				
MUY ALTA	0.071	<	R	≤	0.225
ALTA	0.001	<	R	≤	0.071
MEDIA	0.006	<	R	≤	0.001
BAJA	0.002	≤	R	≤	0.006

Tabla 66 Estratificación de los niveles de riesgo de la carrera Lomas del Indio.

Niveles de riesgo	Descripción	Rango
Riesgo muy alto	Zonas con predominancia de laderas empinadas, compuestas litológicamente de arcillitas calcáreas de la parte intermedia de la Formación Celendín, con pendientes mayores a 37°. Umbrales de precipitación mayores a $RR > 43.2mm$ con percentil de $RR/dia > 99p$ categorizados como extremadamente lluviosos, que generaría deslizamientos, caída de rocas y caída de detritos afectando áreas mayores a 2000 m ² . Esto generaría interrupción de la carretera Lomas del Indio y daño a áreas de cultivos.	$0.071 < R \leq 0.225$
Riesgo Alto	Zonas de laderas y colinas, compuestas por una intercalación de calizas y margas, con pendientes mayores a 27°. Con umbrales de precipitación de $26.5mm < RR \leq 43.2mm$ con percentil $95p < RR/dia \leq 99p$ que posee la categoría lluviosa lo que generaría deslizamientos y caídas de rocas involucrando un área de 1500 m ² . Lo que produciría daños de áreas de cultivo, canales de irrigación y parte interrupción de la carretera Lomas del Indio.	$0.001 < R \leq 0.071$
Riesgo medio	Zonas de laderas y colinas, compuestas por una intercalación de calizas y margas, con pendientes mayores a 27°. Con umbrales de precipitación de $20.2mm < RR \leq 26.5mm$ y $11.5mm < RR \leq 20.2mm$. Con percentil $95p < RR/dia \leq 99p$ categorizándose como una zona lluviosa y moderadamente lluviosa, se generaría algunos deslizamientos y caídas de rocas leves involucrando un área de 500 m ² y 1000 m ² , lo que ocasionaría daños en áreas de cultivo y algunas viviendas.	$0.006 < R \leq 0.001$
Riesgo bajo	Zonas con predominancia de lomadas, compuestas por depósitos inconsolidados, con pendientes alrededor de 7°. Con umbrales de precipitación $RR < 11.5mm$. Categorizándose como una zona con escasa lluvia, se generaría algunos deslizamientos de pequeñas magnitudes y áreas de menos de 500 m ² , generaría además algunos daños a terrenos de cultivo.	$0.002 < R \leq 0.006$

La zonificación de la susceptibilidad de los terrenos ubicados en la carretera Lomas del Indio se pueden utilizar en:

Base para la zonificación ambiental en los diferentes procesos de ordenamiento territorial

Es básico para el pronóstico de las amenazas por MM para alertas tempranas de origen meteorológicos.

4.4.8. Contrastación de la hipótesis

En relación a la hipótesis inicialmente planteada, se corroboró con evaluación en campo y posterior análisis de datos, que los factores que condicionan y propician los Movimientos de masa, dependen de la litología, pendiente, cobertura vegetal, y geomorfología. Asimismo, se determinó que el principal factor desencadenante de un Movimiento de masa está condicionado por los Umbrales de Precipitación; y con información obtenida de SENAMHI se determinó que al excederse estos límites de precipitación incrementa significativamente la posibilidad de que se produzca un evento relacionado a Movimientos de masa, por lo que se corrobora y confirma la hipótesis planteada para la investigación.

CAPÍTULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

Se determinó que las zonas más susceptibles a Movimientos de masa (MM), se ubican en la parte intermedia de la carretera Lomas del Indio, esto debido en parte a la acción de la falla inversa Lomas del Indio, que cruza esta zona y generó condiciones para que se produzca intensa meteorización y por consiguiente se produzcan los Movimientos de masa.

Se elaboró el mapa de susceptibilidad de la carretera Lomas del Indio en donde se identificó que la zona que posee una muy alta susceptibilidad está ubicada muy cerca a la Falla Lomas del indio.

Los Movimientos de Masa (MM) identificados en el área son ocho, los cuales son de tipo: deslizamientos (06), caída de rocas (01) y flujo de detritos (01).

De los factores desencadenantes, el más representativo será un evento de precipitación anómalo; determinado por umbrales de precipitación (según SENAMHI), los cuales indican: precipitaciones entre $RR > 43.22mm$ calificado como extremadamente lluvioso y precipitaciones de $26.5mm < RR \leq 43.22mm$ catalogado como muy lluvioso y con percentiles de $95p < RR/dia \leq 99p$. Con lluvias extremas sobre encima de estos umbrales y durante varios días se desencadenaría los MM sobre todo en depósitos de arcillitas calcáreas, calizas y margas que se presentan en la zona de estudio muy meteorizadas y alteradas.

5.2. RECOMENDACIONES

Se recomienda a las autoridades competentes de la región Cajamarca, realizar charlas dirigidas a los pobladores de las zonas aledañas al área de investigación sobre Gestión de Riesgos de desastres (GRD).

Difundir y tomar importancia, tanto autoridades como población general, sobre los factores socio económicos que serán afectados ante un eventual Movimiento de masa (MM): interrupción de la carretera, daño a los terrenos de cultivo, daño a los pastos de ganadería, daño a los canales de regadío y daño a las viviendas siendo en orden de importancia:

A las autoridades del Gobierno Regional de Cajamarca realizar gestiones para prevenir y mitigar los factores que desencadenan Movimientos de masa: evitar disminución de la cubierta vegetal, incremento de árboles y vegetación en el área pavimentación de la carretera Lomas del Indio, capacitación a población aledaña.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguarón, J. & Moreno, J. 2003 The geometric consistency index: Approximated thresholds. *European Journal of Operational Research* 147 (1), 137–145.
- Andrés Laurencio 2019 Análisis de vulnerabilidad a los peligros naturales a fin de reducir el riesgo de desastres en la localidad de Yacus, distrito de Yacus-Huánuco 2018. Huánuco – Perú.
- Aizpiri, F., Guerrero, D., Ormaetxea, V. 2014 Riesgo de deslizamiento del terreno. Reconocimiento, prevención, control y minimización de impactos. Colegio oficial de geólogos del país vasco.
- Aristizábal, et al. 2011 Análisis de umbrales empíricos de lluvia para el pronóstico de movimientos en masa en el valle de Aburrá, Colombia. *Revista EIA*, ISSN, 8(15), 95-111.
- Arroyo, J. 2020. Técnicas de mitigación para el control de deslizamientos en taludes y su aplicación a un caso. Lima.
- Benavides, V. 1957 Geología de la Región de Cajamarca. Tesis Doctoral.
- Bobrowsky, P. 2018 Manual de derrumbes: Una guía para entender todo. Lima.
- CIIFEN, 2022. Aproximación para el cálculo de riesgo. Cuenca -Ecuador.
- Carrara, A. et al 1995. GIS Technology in Mapping landslide Hazard. Kluwe Academic Publishers. London, pág. 135-178.
- Carrara, A. 2008. GIS Technology in Mapping landslide Hazard. Kluwe Academic Publishers. London, pág. 135-178.
- Convenio INGEMMET- Complejo Turístico Baños Del Inca 2003 Estudio Hidrológico de las aguas termales- Estudio geofísico. Lima – Perú.
- Convenio INGEMMET- Complejo Turístico Baños Del Inca 2003 Estudio Hidrológico de las aguas termales- Estudio geofísico. Lima – Perú.
- CENEPRED. 2015 Centro Nacional de Estimación prevención y reducción de riesgos de desastres. Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales. 2º Versión. Reproducido por: Neva Studio SAC Av. Tomás Ramsey 762 – Magdalena del Mar – Lima. Dirección de Gestión de Procesos (DGP) - Subdirección de Normas y Lineamientos (SNL).

- Corominas, J. & Alonso, E. 1984. Inestabilidad de laderas en el Pirineo catalán. Tipología y Causas. Jornadas sobre Inestabilidad de laderas en el Pirineo. Barcelona.
- Corominas, J. & Alonso, E. 1984. Inestabilidad de laderas en el Pirineo catalán. Tipología y Causas. Jornadas sobre Inestabilidad de laderas en el Pirineo. Barcelona.
- COSUDE – CARE. 2008. Gestión de Riesgos de Deslizamiento del Ronquillo, Urubamba y Corisorgona-Levantamiento Geofísico de Georadar”.
- Crozier, M. 1999 Prediction of rainfall-triggering landslides: a test of the antecedent water status model. Earth surface processes and landforms.
- Cruden, D.M. 1991. A simple Definition of a Landslide Bulletin of the International Association of Engineering Geology.
- Daniel. A. 2007 Deslizamiento de la ladera sur del Viaducto N°1, autopista Caracas la Guaira. Venezuela.
- Domínguez, M. 2003 Tesis doctoral: Geomorfología e inestabilidad de ladera en la cuenca carbonífera central (Valle de Nalón, Asturias). Análisis de la susceptibilidad ligada a los movimientos superficiales del terreno.
- Español, A. 2017 Estudio de susceptibilidad por movimientos en masa en la subcuenca del arroyo Quijorna mediante evaluación multicriterio. (Tesis de maestría, Universidad de Salamanca, Escuela Politécnica Superior de Ávila. Salamanca, España).
- Ferrer, M. 1984 Mecanismos de rotura de taludes mineros y análisis de su estabilidad. Tesina.
- Fidel, L. 2006 Estudio de Riesgos geológicos del Perú. Franja N°4. Instituto Geológico Minero y Metalúrgico. Serie C. Geodinámica e Ingeniería Geológica. Boletín N°29.
- García, A., 1966 Contribución para la clasificación de los movimientos de terreno: Revista de Obras Públicas.
- Geología Ambiental y Riesgo Geológico – INGEMMET – Perú.
- Gonzales de Vallejo, L. 2002 Ingeniería Geológica. Pearson. Madrid. España.
- Guzmán, M. 2007 Deslizamiento rotacional de San Isidro en la Ciudad de la Paz. Bolivia

- Hayman, B. 1998 Fundamentals of engineering Design. Upper Sadle River, Prentice Hall, New Jersey.
- Hervas, J. 2002 Elaboración de mapas de susceptibilidad de deslizamientos mediante SIG, Teledetección y Métodos de Evaluación Multicriterio. Aplicación a la Depresión de Tirajana (Gran Canaria). pág. 169- 180.
- Huaripata, M. 2013 Tesis profesional: “Modelo Geodinámico de la quebrada Cruz Blanca, microcuenca Cruz Blanca – Los Chilcos.
- Hutchinson, N. 1988. Morphological and geotechnical parameters of landslides in relation to geology and hydrogeology. Holland.
- IDEAM 2012 Metodología para la zonificación de susceptibilidad general del terreno a los movimientos de masa. Instituto de Hidrología y Meteorología y Estudios Ambientales. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Bogotá-Colombia.
- IGACC, 2005 Geomorfología aplicada a levantamiento edafológico y zonificación física de tierras. Bogotá- Colombia.
- INDECI, 2011 Programa de Prevención y Medidas de Mitigación ante Desastres de la Ciudad de los Baños del Inca. Cajamarca.
- INGEMMET 2021 Evaluación de peligros geológicos por movimientos en masa en los sectores Coraguaya y Borogueña. Distrito de Ilabaya, provincia de Jorge Basadre Grohmann, región Tacna. Lima: INGEMMET, Informe Técnico. 37 p.
- INGEOMINAS, 2000. Guía Metodológica. Evaluación de Riesgos por Fenómenos de Remoción en Masa. 1º edición, Colombia.
- INGEOMINAS. 1998. Zonificación de amenaza por procesos de remoción en masa en las cuencas de los ríos Bolo y Fraile y avenidas torrenciales en la cabecera municipal de pradera - Valle del Cauca. Bogotá
- INGEOMINAS. 2001. Mapa de categorías de amenaza relativa por movimientos en masa de Colombia, escala 1:1.500.000”. Bogotá
- IPCC 2007 The Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2007: Working Group I: The Physical Science
- Juan Montero, et al 2017. Clasificación de Movimientos en Masa y su Distribución en Terrenos Geológicos de Colombia. Boletines Especiales Geológicas.

- Keefer, D. 1984. Landslides caused by earthquakes. Geological Survey of America Bulletin.
- Kosaca, R; Gonzales, E; Arias, H; Minaya, A; Farfan, T; Icona, J 2002. Estudio Geodinámico y Evaluación de los Peligros de las localidades de Callalli y Sibayo.
- Lagos, A. & Quispe, Z. 2007 Aportes al Análisis de Cuencas Sedimentarias en los alrededores de las localidades de los Baños del Inca, Cruz Blanca, Otuzco, Distrito de Cajamarca.
- Lagos, A., et al 2006, Aportes al Análisis de Cuencas Sedimentarias en los alrededores de las localidades de los Baños del Inca, Cruz Blanca, Otuzco, distrito de Cajamarca. Boletín del XIII Congreso Peruano de Geología. Publicación Especial Nº 7. Lima- Perú.
- Luis, E. 2007 Caída de bloques en el litoral de Huicha de Chiloé. Chile. SENAGEOMIN.
- Luque, G. 2018 Peligros geológicos por movimientos en masa en la región Moquegua". INGEMMET Dirección de geología ambiental y riesgo geológico
- Luque, G. 2011 Peligros Geológicos y zonas críticas en el Perú". Dirección de
- Luzi, L. 1995 GIS for slope stability zonation in the Fabriano area, Central Italy. Unpublished MSc. Thesis, ITC Enschede the Netherlands.
- Martínez, A. 1972 Análisis de Estabilidad de Taludes. Laboratorio de Geología y Geomorfología Aplicada. Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.
- Medina, J. 1991 Fenómenos geodinámicos. Estudio y medidas de tratamiento. Municipio Santiago de Cali, Colombia.
- Millán, C. 2019 Deslizamientos de tierra y avalanchas de escombros Análisis de estabilidad . Lima.
- Montrasio, L et al. 2011 Towards a real-time susceptibility assessment of rainfall-induced shallow landslides on a regional scale.
- Mora S & Vahrson G., 1991. Mitigación de Georriesgos en Centroamérica.
- Moreno, J. 2007 Deslizamiento de El Mirador, km 105 Carretera Bogotá-Villavicencio. Colombia.
- Morgenstern, N. 1997 Toward landslide risk assessment in practice. Proceeding of the international Workshop on landslide risk assessment. Honolulu, Hawaii.

- Núñez, S; Medina, L 2008 Riesgos geológicos en la región Ucayali. INGEMMET, Serie C. Geodinámica e Ingeniería Geológica, N°37.
- Ochoa, M. 2010 Peligros Geológicos en la Cuenca Alta del Río Rímac, entre Ticlio y Matucana. Lima- Perú. XIII Congreso Latinoamericano y XII Congreso Peruano de Geología.
- Pérez, A. 2014 Evaluación de los Riesgos y peligros Geológicos de la Quebrada Puyllucana, Baños del Inca- Cajamarca. Tesis para obtener el Título de ingeniero Geólogo. EAP de Ingeniería Geológica. Perú.
- PM41ZRE 2021 Informe de evaluación del riesgo de desastres por deslizamiento en la zona de Reglamentación especial ZRECU10B PP.JJ. Independencia, A.P.V. el Bosque del Distrito - Provincia y Departamento Cusco. Nupcialidad Provincial del Cuzco. Gerencia de Desarrollo Urbano y Rural. Sugerencia de Ordenamiento Territorial Provincial.
- Petak, J. & Atkisson, A. 1982. Natural Hazard Risk Assessment and Public Policy: Anticipating. New York: Springer-Verlag.
- Pierson, C. & Scott, M. 1985. Downstream dilution of a lahar: Transition from debris flow to hyperconcentrated streamflow: Water Resources Research.
- Richards, G. 1985 Geotechnical aspects of Residual Soils". Southeast Asian Geotechnical. Society, Scorpion Press, Hong Kong.
- Saaty, L. & Vargas, G. 1991 Prediction, Projection, and Forecasting: Applications of the Analytical Hierarchy Process in Economics, Finance, Politics, Games, and Sports. Boston.
- SENAMHI 2014 Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. Umbrales y precipitaciones absolutas. Subdirección de predicción Climática. Ministerio del Ambiente- Perú.
- Shuk, T. 1990 La Evolución y el Estado Actual de la Metodología Basada en Taludes Naturales para Análisis de Estabilidad en Masas de Materiales Geológicos – Parte I. SVMSIF, Caracas.
- Smith, J. 2001 Spending on safety nets for the poor: how much, for how many? The case of Malawi, African Region Working Paper Series.
- Soeters, R & Van Westen, J. 1996 "Slope Instability Recognition, Analysis and Zonation. In: Turner, A.K. and Schuster, R.L. Transportation Board, National

- Suárez, J. 1996 Deslizamientos: Análisis Geotécnico. Colombia.
- Suárez, J. 1998 Deslizamientos y Estabilidad de Taludes en zonas Tropicales. Instituto de Investigaciones sobre Erosión y Deslizamientos. Colombia.
- Reyes, L. 1980 Geología de los Cuadrángulos de Cajamarca (15-f), San Marcos (15-g) y Cajabamba (16-g). Boletín N°31 INGEMMET.
- Trujillo et al. 2016 Evaluación de susceptibilidad por movimientos en masa para la empresa canteras de Colombia S.A.C. Universidad De Manizales Facultad de Ciencias e Ingeniería Programa Especialización En Sistemas De Información Geográfica Manizales.
- UNESCO, 2000 Disaster Reduction. Enviromental and Development BRIEFS.
- Valderrama, P., Fidel, L., Reginald, H., Grosse, J. 2008. Geodinámica del Nevado Huascarán, nuevos alcances sobre “el evento Matacoto.” Sociedad Geológica del Perú.
- Vargas, G. 1999 Guía técnica para la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por Movimientos de masa. Villavicencio.
- Varnes, J. 1978 Slope movement types and processes. In Landslides, Analysis and Control, Special Report N°176. Washington.
- Varnes, J. 1984 Landslide Hazard Zonation: A review of principles and practice. Natural Hazards 3, UNESCO.
- Villacorta, S.; Vásquez, J.; Núñez, S. 2011 Inventario de Peligros Geológicos en la Cuenca del Río Chillón, Lima – Perú.
- Zezere, J. 2002 Landlide susceptibility assessment considering landlide typology. A case study in the area north of Lisbon. Natural Hazards and Earhh System Sciences.

ANEXOS

- Anexo 1. Panel fotográfico.
- Anexo 2. Plano de ubicación.
- Anexo 3. Plano de pendientes.
- Anexo 4. Plano geológico.
- Anexo 5. Plano estructural.
- Anexo 6. Plano litológico - Factor litológico.
- Anexo 7. Plano geomorfológico - Factor geomorfológico.
- Anexo 8. Plano cobertura vegetal - Factor cobertura vegetal.
- Anexo 9. Plano de ubicación de los Movimientos de Masa.
- Anexo 10. Plano de susceptibilidad.

PANEL FOTOGRÁFICO



Fotografía 1 Flujo de detritos; con caída en pendiente pronunciada, susceptible a un Movimiento de masa de mayor tamaño, que se observa en la margen izquierda de la carretera de Lomas del Indio cerca al Km8+120



Fotografía 2 Medición del área de influencia de un Movimiento de Masa, se presenta rasgos de arrastre de material, con pendientes pronunciadas.



Fotografía 3 Troncos y tallos de plantas inclinados, lo que evidencia la reactivación de Movimiento de Masa. Foto tomada en el Km11+340 del tramo de carretera Lomas del Indio.



Fotografía 4 Medición del rumbo y buzamiento de los estratos de calizas de la Formación Yumagual, que en tramos aledaños están involucradas en los Movimientos de masa identificados.



Fotografía 5 Estratos delgados de calizas con intercalaciones de margas; pertenecientes a la Formación Yumagual.



Fotografía 6 Se realiza medición en campo de un Movimiento de masa identificado en el área, presencia de grietas y material de derrumbe.



Fotografía 7 Caída de rocas. Bloque de roca de 1 metro aproximadamente de diámetro (caliza), identificado en la margen izquierda de la carretera Lomas del Indio en el Km 10+20



Fotografía 8 Tronco de árbol fuertemente torcido, que evidencia la reactivación de un Movimiento de Masa. Foto tomada en la margen izquierda de la carretera del indio y cerca al Km 7+960.



Fotografía 9 Medición del grosor de la capa superior del suelo top soil (suelo orgánico). La cual suprayace a las formaciones calcáreas. Presencia de pastos naturales y considerable vegetación en el área.



Fotografía 10 Zona de arranque del deslizamiento, presencia de escarpe y grietas. Foto tomada en la margen izquierda de la carretera Lomas del Indio Km 10+20



Fotografía 11 Deslizamiento; Movimiento de masa identificado, se evidencia escarpe principal y material desplazado. Foto tomada en la margen izquierda de la carretera Lomas del Indio Km 10+20



Fotografía 12 Zona de arranque, presenta grietas que se intensifican por acción de meteorización y en época de lluvias, identificada en arcillitas calcáreas de la Formación Yumagual.



Fotografía 13 Deslizamiento; Movimiento de masa identificado. Caída de rocas y detritos, con pendiente pronunciada. Foto tomada en la margen izquierda de la carretera Lomas del Indio Km 5+780