

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR
FACULTAD DE HABITAT INFRAESTRUCTURA Y CREATIVIDAD
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL



Trabajo de Integración Curricular

“ANÁLISIS DEL NIVEL DE RIESGO ANTE MOVIMIENTO DE MASAS EN TALUDES A LO LARGO DEL CAUCE DEL RÍO MONJAS (ENTRE 784488.260 M E, 9998156.726 M N - 787220.207 M E, 10002709.527 M N) MEDIANTE AHP (ANALYTICAL HIERARCHY PROCESS)”.

AUTOR

JAMES JOEL CHINGAL QUELAL

ADRIANA SALOMÉ MENA DÁVILA

DIRECTOR

ING. EDDY SÁNCHEZ

QUITO DM, ENERO DE 2026

A Dios, a mis amados padres Juan y Doris, a mis abuelitos Etelvina y Guillermo, a mis hermanos Anderson y Tomasito, y a mis tíos Jonathan y Andrea†, que son la mayor bendición que he recibido.

James Joel Chingal Quelal

A Dios, a mi mamá y a mis abuelitos, quienes siempre caminaron a mi lado.

Adriana Salomé Mena Dávila

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mis padres, Juan y Doris, y a mis abuelitos, Etelvina y Guillermo, pilares fundamentales que me han formado con amor y disciplina. Gracias por inculcarme los valores que guían mi camino. A mi padre, por ser mi ejemplo de resiliencia y compromiso; a mi madre, por su sabiduría infinita y cariño incondicional; a mi abuelita, por su inagotable cariño; y a mi abuelito, modelo de trabajo y cuidado. A mis tíos, Jonathan y Andrea por su apoyo incondicional. A mi hermano Anderson y Tomás, gracias por crecer a mi lado y por ser mis compañeros de muchas aventuras que aligeraron la carga. Todos ustedes junto al resto de mi familia, conforman el mejor equipo que la vida me pudo obsequiar.

Extiendo mi sincero agradecimiento a mi tutor, el Ing. Eddy Sánchez, por confiar en mí para colaborar en el proyecto y por compartir su experiencia en las áreas de estudio, necesarias para dar forma a esta investigación sobre el Río Monjas. Gracias a la Carrera de Ingeniería Civil y a los docentes que me enseñaron que la ingeniería es una herramienta para servir a la sociedad. Finalmente, a mis amigos y colegas, gracias por las risas, los consejos, los grupos de estudio y por hacer de la vida universitaria una experiencia inolvidable. ¡Lo logramos!

James Joel Chingal Quelal

En primer lugar, agradezco infinitamente a Dios, por haberme bendecido siempre, por ser mi guía en los momentos de incertidumbre y por darme la fortaleza necesaria para culminar esta etapa tan importante.

A mi mamá, Mónica, porque sencillamente sin ti no sería nada de lo que soy hoy. Gracias por ser mi inspiración diaria, mi raíz, mi fuerza y por haber dado todo para verme cumplir este sueño. Todo lo que he logrado lleva tu nombre.

A mis abuelitos, Celia y Víctor, siempre les agradeceré por haber estado presentes en cada paso de mi vida. Gracias por su amor incondicional, por cuidarme siempre con sus oraciones y por ser la guía en mi camino.

A mis amigos y familia, gracias por estar ahí en los momentos difíciles y, sobre todo, por siempre saber cómo sacarme una sonrisa cuando más lo necesitaba. Gracias por hacer de este proceso una experiencia inolvidable.

A nuestro tutor, Ing. Eddy Sánchez, por su acertada guía y disposición durante el desarrollo de este trabajo. Gracias por compartir su experiencia y por exigirnos la excelencia necesaria para nuestra formación profesional.

Adriana Salomé Mena Dávila

Tabla de contenido

Resumen.....	14
Abstract.....	15
1. Introducción	16
1.1. Justificación e Importancia.....	16
1.2. Planteamiento del Problema.....	16
1.3. Objetivos	17
1.3.1. Objetivo General.....	17
1.3.2. Objetivos Específicos	17
1.4. Alcance	18
2. Marco Teórico y Referencial.....	19
2.1. Conceptos Generales Sobre Estabilidad de Taludes.....	19
2.1.1. Amenaza	19
2.1.2. Peligro.....	20
2.1.3. Susceptibilidad.....	20
2.1.4. Exposición	21
2.1.5. Vulnerabilidad.....	21
2.1.6. Riesgo	21
2.1.5. Clasificación del Movimiento de Masas	22
2.1.6. Resistencia al Corte	23
2.1.6.1. Los Componentes de la Resistencia (Criterio de Mohr-Coulomb).....	24
2.1.6.2. El Principio del Esfuerzo Efectivo.....	24

2.1.6.3. Condiciones Drenadas y No Drenadas.	25
2.1.7. Límites de Consistencia.....	25
2.1.7.1 Límite Líquido (LL).....	25
2.1.7.2. Límite Plástico (LP).....	26
2.1.7.3. Índice de Plasticidad (IP).....	26
2.1.7.4. Dilatancia.	26
2.1.7.5. Tenacidad.	26
2.2. Antecedentes de Estudios en la Zona	27
2.2.1. Registro Histórico de Eventos Peligrosos	27
2.2.2. Caracterización Institucional y Zonas Críticas.....	27
2.2.3. Investigaciones Recientes en la Zona	28
2.3. Factores Condicionantes y Detonantes de los Deslizamientos	29
2.4. Variables de Análisis Consideradas en el Estudio	29
2.4.1. Variables Geomorfológicas y Geotécnicas	29
2.4.1.1. Altura del Talud.....	30
2.4.1.2. Pendiente del Talud.....	30
2.4.1.3. Litología (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos [SUCS] + Geología Local).....	30
2.4.1.3.1. <i>Caracterización Geológica</i>	30
2.4.1.3.1.1. Identificación por Medio de Manual-Visual (Norma ASTM D-2488)	31

2.4.1.3.1.2. Análisis Granulométrico Combinado (Lavado y Tamizado Mecánico bajo ASTM D6913)	32
2.4.1.3.1.3. Límites de Consistencia o de Atterberg (Norma ASTM D4318-17) ..	35
2.4.1.4. Longitud del Talud	37
2.4.2. Variables Estructurales y Antrópicas	38
2.4.2.1. Carga de la Infraestructura en Cresta del Talud	38
2.4.2.2. Distancia del Elemento Posiblemente Afectado Hasta la Cresta del Talud	38
2.4.3. Variables Hidrológicas	38
2.4.3.1. Distancia Río a la Base del Talud	39
2.4.3.2. Caudal del Río	39
2.4.4. Variables Socio-Territoriales	39
2.4.4.1. Número de Elementos Posiblemente Afectados	40
2.4.4.2. Área de protección ecológica dentro del predio	40
2.5. Descripción del Método Analytic Hierarchy Process (AHP)	40
2.6. Cálculo Para el Tamaño de Muestra Para una Población Finita	45
2.6.1. Nivel de Confianza (Z)	45
2.6.2. Margen de Error (e)	46
2.6.3. Proporción Esperada (p)	46
2.6.4. Corrección Para Población Finita	46
2.6.5. Fotogrametría	46
3. Área de Estudio	48
3.1. Localización y Delimitación del Tramo Analizado del Río Monjas	48

3.2. Amenazas	49
3.2.1. Amenazas Sísmicas.....	49
3.2.2. Amenaza por Inundaciones.....	52
3.2.3. Amenaza por Intervención Antrópica	53
3.2.4. Amenaza Volcánica.....	57
3.3. Características Geomorfológicas y Geológicas del Sector	58
3.3.1 Geología.....	58
3.3.1.1. Geología regional.....	58
3.3.1.2. Geología Local.....	59
3.3.2. Litología.....	59
3.3.3. Relieve y Limitación del Terreno a ser Evaluado.....	61
3.4. Características Hidrológicas y Climáticas.....	62
3.4.1. Hidrografía.....	62
3.4.2. Clima.....	63
3.5. Infraestructura y Ocupación del Suelo en el Entorno del Cauce.....	64
4. Metodología	65
4.1. Enfoque General del Estudio.....	65
4.2. Identificación y Descripción de Variables del Análisis Multicriterio	68
4.3. Categorización de Variables	70
4.3.1. Número de Elementos Posiblemente Afectados.....	71
4.3.2. Distancia del Elemento Posiblemente Afectado Hasta la Cresta del Talud.....	72

4.3.3. Carga de la Infraestructura en Cresta del Talud.....	73
4.3.4. Altura del Talud	73
4.3.5. Pendiente del Talud.....	74
4.3.6. Litología.....	75
4.3.7. Distancia del Río a la Base del Talud	79
4.3.8. Caudal del Río	80
4.3.9. Longitud del Talud.....	81
4.3.10. Área de Protección Ecológica Dentro del Predio	82
4.4. Herramientas SIG	82
4.4.1. Obtención y Procesamiento de Datos en QGIS.....	83
4.4.1.1. Número de Elementos Posiblemente Afectados	83
4.4.1.2. Distancia del Elemento Posiblemente Afectado Hasta la Cresta del Talud	85
4.4.1.3. Carga de la Infraestructura en Cresta del Talud	86
4.4.1.4. Altura del Talud.....	92
4.4.1.5. Pendiente del Talud.....	93
4.4.1.6. Litología.....	94
4.4.1.7. Distancia Río a la Base del Talud	97
4.4.1.8. Caudal del Río.....	98
4.4.1.9. Longitud del Talud	102
4.4.1.10. Área de protección ecológica dentro del predio	103
4.5. Construcción de la Matriz de Comparación por Pares (AHP)	104

4.6. Determinación de Pesos de Criterios	105
4.7. Verificación del Índice de Consistencia (CR)	107
4.8. Fotogrametría	109
4.8.1. Levantamiento Fotogramétrico.....	109
5. Análisis de Resultados	111
5.1. Presentación de Resultados	112
5.1.1. Resultados del Análisis AHP	112
5.1.2. Identificación los Puntos con Mayor Riesgo de Deslizamiento y Corrección	113
5.2. Verificación de Resultados	114
5.2.1. Resultados en la Observación de Campo	114
5.2.2. Mapa de Riesgo al Deslizamiento	121
5.2.3. Discusión de Resultados	122
6. Conclusiones y Recomendaciones	124
6.1. Conclusiones	124
6.2. Recomendaciones.....	126
Referencias.....	129

Índice de Tablas

Tabla 1 <i>Identificación de suelos finos inorgánicos a partir de pruebas manuales.</i>	32
Tabla 2 <i>Escala fundamental para establecer importancia</i>	42
Tabla 3 <i>Índices de consistencia aleatoria RI</i>	44
Tabla 4 <i>VARIABLES consideradas para estimar el riesgo de un talud al movimiento de masas</i>	69
Tabla 5 <i>Exposición del talud en función del número de elementos posiblemente afectados</i> ...	71

Tabla 6 <i>Exposición del talud en función de la distancia del elemento posiblemente afectado hasta su cresta</i>	72
Tabla 7 <i>Factor detonante en función de la carga en su cresta</i>	73
Tabla 8 <i>Susceptibilidad del talud en función de su altura</i>	73
Tabla 9 <i>Susceptibilidad del talud en función de la pendiente</i>	74
Tabla 10 <i>Susceptibilidad del talud en función de su litología</i>	75
Tabla 11: <i>Conductividad hidráulica de suelos saturados</i>	76
Tabla 12 <i>Exposición del talud en función de la distancia río a su base</i>	79
Tabla 13 <i>Factor detonante en función del caudal del río</i>	80
Tabla 14 <i>Susceptibilidad del talud en función de su longitud</i>	81
Tabla 15 <i>Exposición del talud en función de su área de protección ecológica dentro del predio</i>	82
Tabla 16 <i>Estimación del peso por unidad de área de vigas</i>	88
Tabla 17 <i>Estimación del peso por unidad de área de columnas</i>	89
Tabla 18 <i>Estimación del peso por unidad de área de losas</i>	89
Tabla 19 <i>Estimación de la carga por vivienda en la zona de estudio</i>	90
Tabla 20 <i>Caudales máximos en un TR 100 años, con influencia en el área de estudio</i>	100
Tabla 21 <i>Matriz de comparación por pares de 10 criterios aplicando el método AHP</i>	105
Tabla 22 <i>Vector de pesos relativos</i>	107
Tabla 23 <i>Obtención del índice de razón de consistencia</i>	108
Tabla 24 <i>Valor del LRI correspondientes a los 67 taludes analizados, Primera Iteración</i> ..	112
Tabla 25 <i>Valor del LRI correspondientes a los 67 taludes analizados, Segunda Iteración</i> ..	116
Tabla 26 <i>Ficha de resultados del talud N. °10</i>	118

Índice de Figuras

Figura 1	<i>Estructura jerárquica</i>	41
Figura 2	<i>Río Monjas</i>	48
Figura 3	<i>Río Monjas tramo del km 14 al km 21</i>	49
Figura 4	<i>Mapa de la aceleración máxima esperada para el sismo de diseño en el Ecuador (Factor de zona Z)</i>	50
Figura 5	<i>Tectónica de los andes septentrionales, modelo cinemático global, fallas importantes, movimientos relativos de las placas, anomalías magnéticas y actividad</i>	51
Figura 6	<i>Histograma de eventos morfoclimáticos en la cuenca del río Monjas</i>	52
Figura 7	<i>Botadero de basura clandestino</i>	53
Figura 8	<i>Desagües clandestinos</i>	54
Figura 9	<i>Cultivos criados con riego de aguas servidas</i>	55
Figura 10	<i>Cantera</i>	56
Figura 11	<i>Mapa de crecimiento urbano desde el año 1797 hasta el 2020</i>	57
Figura 12	<i>Depresión interandina central</i>	58
Figura 13	<i>Perfil litoestratigráfico representativo del sector San Antonio</i>	60
Figura 14	<i>Columna estratigráfica del sector Puente Viejo-Loma Catequilla 785876.85 m E, 653.23 m N UTM WGS 84 Z 17 N</i>	61
Figura 15	<i>Obtención del número de elementos posiblemente afectados</i>	85
Figura 16	<i>Obtención de la distancia del elemento más vulnerable a la cresta del talud</i>	86
Figura 17	<i>Obtención de la carga de la infraestructura en la cresta del talud</i>	92
Figura 18	<i>Obtención de la altura del talud</i>	93
Figura 19	<i>Obtención de la distancia del río a la base del talud</i>	98
Figura 20	<i>Cuenca del Río Monjas</i>	99
Figura 21	<i>Curva de regresión para obtener caudales probables con un TR de 100 años</i>	101

Figura 22 <i>Curva de regresión polinómica</i>	102
Figura 23 <i>Área de protección ecológica dentro del predio en taludes críticos</i>	103
Figura 24 <i>Levantamiento de campo</i>	111
Figura 25 <i>Taludes críticos del primer análisis</i>	114
Figura 26 <i>Taludes críticos corregidos en el área de estudio</i>	117
Figura 27 <i>Altura obtenida bajo levantamiento en estación total</i>	120
Figura 28 <i>Mapa de riesgo al deslizamiento</i>	121

Índice de Anexos

Anexo A	139
Anexo B	148
Anexo C	150
Anexo D	154
Anexo E	158
Anexo F.....	160

Resumen

El presente Trabajo de Integración Curricular evalúa el nivel de riesgo por deslizamiento de taludes a lo largo de un tramo de 7.075 km del cauce del río Monjas (Quito, Ecuador), caracterizado por alta inestabilidad geomorfológica y un crecimiento desordenado de la urbe. Se recurrió al Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) para calcular la susceptibilidad y el riesgo, que hace uso de diez variables relacionadas con elementos socio-territoriales, geomorfológicos, hidrológicos y estructurales, las cuales fueron procesadas mediante Sistemas de Información Geográfica (QGIS). La metodología se complementó con la validación de datos adquiridos a través de levantamientos fotogramétricos realizados con drones, pruebas en laboratorio para la caracterización litológica y validación en el campo. Los resultados señalaron al Talud N.º 10 como el talud más problemático, con un índice de riesgo global de 4.119, dicho medidor indica que esta es la estructura de todo el tramo estudiado con mayor vulnerabilidad al deslizamiento de masas, debido a la interacción de factores detonantes, susceptibilidad y exposición del talud. Finalmente, el estudio concluye que la vulnerabilidad social y los factores antrópicos son determinantes en la configuración del riesgo en el área, además de que dicha metodología AHP se validó como una metodología efectiva de jerarquización y priorización de obras de mitigación.

Palabras clave: Riesgo de deslizamiento, Río Monjas, Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), Estabilidad de taludes, Vulnerabilidad social, Fotogrametría.

Abstract

This Curricular Integration Project evaluates the level of landslide risk along a 7.075 km stretch of the Monjas River channel (Quito, Ecuador), an area characterized by high geomorphological instability and unplanned urban growth. To determine susceptibility and risk, the Analytic Hierarchy Process (AHP) was applied, incorporating ten variables associated with geomorphological, hydrological, structural, and socio-territorial factors, which were processed using Geographic Information Systems (QGIS). The methodology was complemented by validation through data obtained from drone-based photogrammetric surveys, laboratory tests for lithological characterization, and field verification. The results identified Slope No. 10 as the most critical slope, with a global risk index of 4.119. This indicator shows that it is the structure with the highest vulnerability to mass movement within the entire studied reach, due to the interaction of triggering factors, susceptibility, and slope exposure. The study concludes that social vulnerability and anthropogenic factors are decisive in shaping risk within the study area and confirms the AHP methodology as an effective tool for the ranking and prioritization of mitigation measures.

Keywords: Landslide risk, Monjas River, Analytic Hierarchy Process (AHP), Slope stability, social vulnerability, Photogrammetry.

1. Introducción

1.1. Justificación e Importancia

El tramo del río Monjas evidencia un significativo nivel de riesgo asociado a la inestabilidad de taludes, esto compromete infraestructuras cercanas como viviendas, vías, puentes, espacios públicos y la seguridad de la población. La falta de estudios integrales que consideren simultáneamente factores geomorfológicos, hidrológicos, estructurales y sociales dificulta la gestión efectiva del riesgo.

Los resultados del proyecto permitirán identificar y jerarquizar los taludes con mayor riesgo al deslizamiento de infraestructuras a lo largo del cauce del río Monjas desde la coordenada UTM- WGS84 17S (784488.260 m E, 9998156.726 m N) hasta la coordenada (787220.207 m E, 10002709.527 m N); siendo en total 7.075 km de tramo analizado, determinando el punto crítico donde el riesgo y la vulnerabilidad alcanzan su valor máximo ante la amenaza. Este análisis servirá como insumo técnico para priorizar intervenciones y orientar acciones de mitigación por parte de las autoridades locales. Asimismo, el trabajo busca proponer una metodología replicable que integre criterios técnicos, ambientales y sociales, mejorando la gestión del riesgo y la seguridad en áreas con características similares.

1.2. Planteamiento del Problema

El problema principal del cauce del río Monjas es su alta susceptibilidad a deslizamientos de taludes debido a factores secundarios de origen natural, como la erosión fluvial (Altamirano Tigrero, 2022), pendientes críticas que en algunos tramos llegan a ser casi verticales y litología inestable. Esta condición natural se agrava por factores antrópicos como la construcción de viviendas e infraestructuras en la cresta de los taludes y la falta de control sobre los asentamientos (El Comercio, 2018).

Las consecuencias son graves: pérdida de viviendas y vías, afectación a la seguridad de la población y riesgos para la movilidad y el transporte, como lo demuestran los eventos

registrados por el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (2020). La ocupación desordenada del territorio en zonas vulnerables ha incrementado la exposición de los habitantes a estos procesos de inestabilidad (Municipio del Distrito Metropolitano de Quito [MDMQ], 2019).

A esto se suma la falta de estudios integrales, lo que evidencia la urgencia de profundizar en el análisis de los deslizamientos asociados a la actividad fluvial (Aguirre, 2023). Por consiguiente, se plantea la necesidad de aplicar metodologías multicriterio, como el Análisis Jerárquico de Proceso (AHP), que ha demostrado ser una herramienta robusta y fiable en contextos geográficos similares en Ecuador (Cargua et al., 2024). Este método permite integrar variables geomorfológicas, hidrológicas, estructurales, antrópicas y socio-territoriales para evaluar de manera cuantitativa y cualitativa el riesgo en los taludes del río Monjas.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Evaluar el nivel de riesgo ante deslizamiento de taludes en el cauce del río Monjas, específicamente en el tramo comprendido entre las coordenadas UTM WGS84 17S (784488.260 m E, 9998156.726 m N) y (787220.207 m E, 10002709.527 m N), utilizando el método AHP (Analytic Hierarchy Process) en conjunto con herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG), imágenes satelitales obtenidas mediante Google Earth Pro y fuentes de información secundaria.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Establecer el contexto, la relevancia y los fundamentos del problema de deslizamientos en el río Monjas.

- Analizar los conceptos, antecedentes y factores que influyen en la estabilidad de taludes, identificando las variables críticas a considerar en el análisis multicriterio.
- Caracterizar las condiciones geomorfológicas, geológicas, hidrológicas, climáticas y de ocupación del suelo en el tramo analizado del río Monjas.
- Aplicar la metodología del Análisis Multicriterio (AHP) apoyada en herramientas SIG, estableciendo la ponderación de variables y el procedimiento de evaluación del riesgo de deslizamientos.
- Interpretar los resultados del análisis AHP y la verificación en campo, identificando los taludes con mayor nivel de riesgo y representarlos cartográficamente.
- Sintetizar los hallazgos principales del estudio y proponer recomendaciones técnicas y de gestión orientadas a la prevención del riesgo en el cauce del río Monjas.

1.4. Alcance

El presente estudio se limita a evaluar el nivel de riesgo por deslizamientos en los taludes del cauce del río Monjas, específicamente en el tramo comprendido entre las coordenadas (784488.260 m E, 9998156.726 m N - 787220.207 m E, 10002709.527 m N). El resultado esperado es identificar el o los taludes que representan mayor riesgo, considerando factores geotécnicos, hidrológicos, geomorfológicos, estructurales y antrópicos, obtenidos de información secundaria y de resultados de softwares como QGIS, finalmente siendo verificados con observaciones de campo. Es importante aclarar que este trabajo no contempla el diseño ni la implementación de medidas de estabilización o mitigación.

2. Marco Teórico y Referencial

2.1. Conceptos Generales Sobre Estabilidad de Taludes

Primero se debe aclarar que se llamara talud a un área de terreno cuya superficie se encuentre inclinada respecto a una horizontal, cuyo origen puede ser tanto natural como haber sido creado por la intervención humana (cortes), además puede ser permanente o temporal.

La estabilidad de taludes tiene como objetivo principal identificar parámetros críticos de topografía, geología e hidrología considerando la naturaleza, frecuencia y magnitud de posibles fallas en el talud (Abramson & Lee, 2002). Estas fallas se pueden originar por acciones sísmicas, acuíferos, cambios en la topografía o cambios en los esfuerzos aplicados sobre estos.

Según Varnes (1978) los movimientos de masa ocurren por la deformación a cortante y el deslizamiento de una superficie ya sea visible o no. Estos se clasifican en rotacional y traslacional, además de vuelcos, desprendimientos, expansiones laterales y flujos, fenómenos provocados por la interacción de procesos naturales con actividades antrópicas que modifican el equilibrio. En consecuencia, resulta indispensable que el análisis de estabilidad de taludes no solo incorpore factores geomorfológicos e hidrológicos, sino integre variables estructurales y antrópicas, para tener una perspectiva completa.

2.1.1. Amenaza

De acuerdo con el artículo 5 de la Ley Orgánica para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres (2024). En este documento, se describe a la amenaza como un "evento, fenómeno, actividad humana o condición latente que puede causar la muerte, lesiones, daños materiales, interrupción de la actividad social y económica, incremento de la vulnerabilidad, degradación ambiental, y pérdidas e impactos de diverso tipo". Esta definición es esencial para la organización del modelo de análisis jerárquico (AHP), puesto que reconoce explícitamente el

concepto de condición latente. Esto valida que no solo el estudio se enfoca en el momento del colapso, sino que se evalúan las condiciones físicas preexistentes del talud (susceptibilidad física) que permanecen latentes hasta que un factor detonante materializa el evento. Así, la amenaza no se entiende como un hecho fortuito, sino como un fenómeno predecible derivado de la inestabilidad acumulada. En este estudio, esta amenaza es el deslizamiento o movimiento de masas.

2.1.2. Peligro

Para la presente investigación se adopta la definición que se encuentra en el Manual de Riesgos por el CENEPRED, que indica que es la “probabilidad de que un fenómeno, potencialmente dañino, de origen natural o inducido por la acción humana, se presente en un lugar específico, con una cierta intensidad y en un período de tiempo y frecuencia definidos” (CENEPRED, 2014).

Gracias a esta definición se pudo categorizar las variables bajo un nivel de Peligro, el cual representa el grado en que una variable contribuye al incremento de la inestabilidad del sistema talud-río-ocupación humana, aumentando la probabilidad de sufrir daños significativos ante la amenaza.

2.1.3. Susceptibilidad

La susceptibilidad, en el contexto de la estabilidad de taludes, se refiere a la tendencia de un terreno geográfico a experimentar un fenómeno inestable, lo cual es definido por sus propios elementos condicionantes internos (tales como la geomorfología, la geología, las pendientes y el tipo de suelo), sin tomar en cuenta los factores temporales que provocan el evento. De acuerdo con el manual técnico de referencia, "la susceptibilidad se refiere a la mayor o menor predisposición a que un evento ocurra en una determinada área geográfica", lo cual depende principalmente de los factores condicionantes propios del terreno (CENEPRED,2014).

Para incorporar esta definición al estudio, se va a considerar el enfoque metodológico que usa Cargua et al. (2024), el cual fue aplicado de forma similar en la región, donde se determina la susceptibilidad integrando variables físicas que afectan la estabilidad del terreno, como la geología, la geomorfología, topografía; es decir parámetros físicos propios del talud.

2.1.4. Exposición

Para definir la exposición, según la Ley Orgánica para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres del 2024 es la “Situación en que se encuentran las personas, las infraestructuras, la producción, las áreas naturales protegidas entre otros sectores, bienes o áreas situadas en zonas donde existe una amenaza natural o antrópica”. En el presente trabajo se considerará la exposición, como el concepto que defina la cercanía espacial que tengan elementos posiblemente afectados a el talud, o bien que tan cercano se encuentra esta estructura a factores desencadenantes del movimiento de masas.

2.1.5. Vulnerabilidad

La vulnerabilidad se refiere a la situación del elemento que está expuesto ante la amenaza. Formalmente se define como "la propensión de la población, la estructura física o las actividades socioeconómicas a ser dañadas por un peligro o amenaza" (CENEPRED, 2014). Esta variable no está vinculada con el fenómeno físico en sí, sino con elementos propios del sistema expuesto, que se estudian mediante tres dimensiones fundamentales: fragilidad (resistencia física), exposición (situarse en la zona de impacto) y resiliencia (capacidad de recuperarse) (CENEPRED, 2014).

2.1.6. Riesgo

En la misma Ley de Gestión de Riesgos (2024) se define el riesgo, donde se indica que “son los probables o posibles daños materiales, ambientales y lesiones a las personas, que

se ocasionarían debido a la ocurrencia de un desastre en un determinado territorio. Está determinado por la amenaza, vulnerabilidad y capacidad de respuesta”.

Partiendo de la definición de la Ley de Gestión de Riesgos, en el modelo propuesto, el riesgo se entiende como el resultado sistémico que nace de la interacción de tres componentes diferenciados: la amenaza (el evento de deslizamiento latente), la cual está condicionada por la susceptibilidad intrínseca del terreno y la exposición a factores detonantes o factores antrópicos. Esta realidad física se interseca con el componente social, definido por la exposición de la población y su consecuente vulnerabilidad. Así, la cuantificación de las pérdidas esperadas no depende de un solo factor, sino de la convergencia dinámica de la inestabilidad del medio físico con la fragilidad del sistema habitado.

2.1.7. Clasificación del Movimiento de Masas

A continuación, se presenta el sistema de clasificación propuesto con base en base a el trabajo de Espinosa Chiliguano (2022).

- **Caídas (Falls) o Desprendimientos:** Son movimientos abruptos y veloces de material rocoso o terrestre que se precipitan desde pendientes pronunciadas, con velocidades que pueden ser de muy rápidas a extremadamente rápidas (Espinosa Chiliguano, 2022). Característico de acantilados.
- **Volcamientos (Topples) o Derrumbes:** Según Highland & Bobrowsky (2008), se definen por la rotación frontal de una masa de suelo o roca, el cual pivota sobre un punto localizado bajo su centro de gravedad. La velocidad del movimiento puede variar desde extremadamente lenta hasta extremadamente rápida, con tendencia a incrementarse conforme aumenta la distancia de desplazamiento.
- **Deslizamientos (Slides):** Corresponden al desplazamiento pendiente abajo de una masa rocosa o de suelo a lo largo de una superficie de ruptura o de zonas definidas por elevadas tensiones de cizallamiento (Espinosa Chiliguano, 2022)

- Deslizamientos Rotacionales: Suceden cuando el material se desplaza a lo largo de una superficie de falla que, comúnmente, presenta una geometría aproximadamente circular (Ruiz González, 2022).
- Deslizamientos Traslacionales: Se producen a lo largo de una superficie de ruptura plana y casi paralela a estratos menos resistentes, lo que genera un desplazamiento de la masa en sentido horizontal (Ruiz González, 2022).
- **Flujos (Flows):** Corresponden a movimientos continuos en los que las superficies de cizallamiento son de corta duración y se encuentran muy próximas entre sí (Espinosa Chiliguano, 2022). La velocidad puede ser rápida o incluso extremadamente rápida, en función del ángulo de la pendiente y de la consistencia del material.
- **Aluviones:** Se trata de flujos de lodo originados en zonas altas, constituidos por una mezcla viscosa de agua, suelo, bloques, rocas y troncos, que pueden generar daños significativos (Espinosa Chiliguano, 2022).
- **Reptación (Spreads) o Propagación Lateral:** Normalmente, se encuentran en terrenos planos o con pendientes muy suaves, donde una capa de material más competente se desliza sobre una capa subyacente más débil y de comportamiento plástico (Espinosa Chiliguano, 2022). La velocidad de este tipo de movimiento suele ser de baja a moderada.
- **Hundimientos:** Son producidos por la erosión subterránea provocada por fuertes lluvias que resultan en la ruptura del terreno y la formación gradual de una cavidad. La velocidad de ocurrencia es lenta a moderada (Espinosa Chiliguano, 2022).

2.1.8. Resistencia al Corte

La resistencia al corte de una masa de suelo se define como la resistencia interna por unidad de área que el suelo ofrece para resistir la falla y el deslizamiento a lo largo de cualquier plano en su interior (Das, 2010). Es el parámetro fundamental para analizar la

estabilidad de taludes, la capacidad de carga de cimentaciones y la presión lateral sobre estructuras de retención.

A continuación, se explican sus componentes y funcionamiento según las fuentes:

2.1.8.1. Los Componentes de la Resistencia (Criterio de Mohr-Coulomb)

La resistencia al corte se expresa típicamente mediante una función lineal que relaciona el esfuerzo normal y el esfuerzo cortante en el plano de falla, conocida como la ecuación de Coulomb (Coulomb, 1776):

$$\tau_f = c + \sigma \cdot \tan\varphi \quad (1)$$

Donde,

- Cohesión (c): Es la resistencia interna que no depende del esfuerzo normal. En suelos como arenas limpias o limos inorgánicos, la cohesión suele ser cero (Das, 2010).
- Ángulo de fricción interna (φ): Representa la resistencia friccional al deslizamiento entre las partículas. El ángulo de fricción interna varía según la densidad del suelo, la forma de los granos y su gradación.
- Esfuerzo normal (σ): Es la fuerza perpendicular al plano de falla que empuja las partículas unas contra otras.

2.1.8.2. El Principio del Esfuerzo Efectivo.

La literatura especializada establece que la resistencia al corte en suelos está gobernada por el principio de esfuerzo efectivo. Según Terzaghi et al. (1996), el esfuerzo efectivo representa la fracción del esfuerzo total que es transmitida exclusivamente a través de los puntos de contacto del esqueleto mineral sólido.

Mecánicamente, la presencia de presión de poros positiva (u) actúa en oposición al confinamiento, reduciendo la magnitud de las fuerzas intergranulares y, consecuentemente, disminuyendo la capacidad friccionante del material. El criterio de falla de Mohr-Coulomb, expresado en términos de esfuerzos efectivos para condiciones saturadas, se define como:

$$\tau_f = c' + \sigma' \cdot \tan\varphi' \quad (2)$$

Donde:

- c' φ' son la cohesión y el ángulo de fricción interna basados en el esfuerzo efectivo
- σ' en suelos saturados, es el esfuerzo normal efectivo que resulta de sustraer la presión intersticial (u) del esfuerzo normal; o $\sigma' = \sigma - u$.

2.1.8.3. Condiciones Drenadas y No Drenadas.

La resistencia varía drásticamente según la velocidad de la carga y la permeabilidad:

- **Resistencia Drenada:** Se alcanza cuando el suelo se carga lo suficientemente lento para que no se generen excesos de presión de agua en los poros (Terzaghi et al., 1996).
- **Resistencia No Drenada:** Ocurre cuando la carga es tan rápida que el agua no puede escapar, generando presiones de poro que pueden reducir la resistencia drásticamente (como en la licuefacción de arenas sueltas o fallas rápidas en arcillas saturadas) (Terzaghi et al., 1996).

2.1.9. Límites de Consistencia

2.1.9.1 Límite Líquido (LL)

Es el contenido de humedad que marca la transición del suelo entre el estado plástico y el estado líquido (Das, 2010). Se determina en laboratorio como el contenido de agua necesario para que una ranura estándar, realizada en una muestra de suelo remoldeada, se

cierre una distancia de 12.7 mm (0.5 pulgadas) tras recibir 25 golpes en el aparato de Casagrande (ASTM International, 2017).

2.1.9.2. Límite Plástico (LP)

Es el contenido de humedad en el punto de transición entre los estados semisólido y plástico (Das, 2010). Representa el límite inferior del rango plástico del suelo y se define como el contenido de agua con el cual el suelo comienza a desmoronarse al ser rodado manualmente en hilos delgados de aproximadamente 3 mm (1/8 de pulgada) de diámetro (ASTM International, 2017).

2.1.9.3. Índice de Plasticidad (IP)

Es la magnitud numérica del rango de contenido de agua dentro del cual el suelo presenta un comportamiento plástico.

2.1.9.4. Dilatancia.

Es el fenómeno por el cual una masa de suelo experimenta un aumento de volumen (expansión) cuando es sometida a esfuerzos de corte. Ocurre principalmente en suelos granulares densos donde las partículas, al estar muy juntas, deben "trepar" unas sobre otras para desplazarse, creando nuevos espacios de vacíos (Terzaghi et al., 1996).

En campo, se reconoce por medio de la prueba de agitación: si una muestra está saturada, al ser sacudida expulsa agua (se torna brillante) y al doblarse o presionarse la absorbe (se opaca).

2.1.9.5. Tenacidad.

Hace referencia a la firmeza o resistencia que presenta el suelo cuando su contenido de humedad está cerca del límite plástico (ASTM International, 2017). Es una característica cualitativa esencial para diferenciar entre limos y arcillas inorgánicas en el campo.

2.2. Antecedentes de Estudios en la Zona

La evaluación del riesgo de deslizamientos en la cuenca del río Monjas se sustenta en un registro histórico de eventos peligrosos, en el reconocimiento institucional de la problemática y en una creciente producción científica que relaciona la inestabilidad de los taludes con el proceso de expansión urbana del DMQ. Esta sección contextualiza la necesidad de realizar una evaluación integral de riesgo asociado al movimiento de masas, evidenciando que la amenaza no constituye una hipótesis teórica, sino una situación recurrente con repercusiones socio-territoriales de considerable magnitud.

2.2.1. Registro Histórico de Eventos Peligrosos

Según el Informe de Situación No. 002 del Sistema Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE) (2020), entre el 1 de enero de 2019 y el 27 de noviembre de 2020, se registraron 20 eventos peligrosos en la zona de influencia del río Monjas: 2 aluviones, 16 deslizamientos, 1 hundimiento y 1 inundación. El informe atribuye estos eventos a la interacción de factores antrópicos y naturales, entre los que destacan la expansión urbana irregular, los asentamientos en laderas, el manejo inadecuado de escombros y residuos, la deficiente infraestructura de drenaje pluvial y los eventos meteorológicos intensos que facilitan la movilización de sedimentos. Estos eventos han ocasionado afectaciones directas a la población, viviendas, bienes públicos y privados, establecimientos educativos e infraestructura vial.

2.2.2. Caracterización Institucional y Zonas Críticas

El río Monjas ha sido oficialmente reconocido como una zona en situación de peligro ambiental y social, reconocimiento que se sustenta tanto en los informes técnicos del Sistema Nacional de Gestión de Riesgos como en el ámbito jurídico, a partir del caso “Río Monjas”. Al respecto, la Corte Constitucional del Ecuador (2022) estableció que los derechos de la

naturaleza estaban siendo vulnerados, ya que se había verificado el deterioro gradual del cauce provocado por la ampliación de las ciudades y la ausencia de gestión integral de las autoridades competentes. La decisión judicial estableció al río como sujeto de derechos, exigiendo que se implementen acciones para su restauración ecológica, que se controle permanentemente el riesgo y que las entidades locales y nacionales trabajen juntas para asegurar la protección y recuperación del río. De igual manera, la documentación identifica como sectores críticos a El Condado, La Esperanza, Pomasqui, Ponceano, Ciudad Bicentenario (márgenes del cauce), Barrio Vintimilla, La Pampa, San Antonio y las zonas aledañas a la quebrada Caupicho (SEG y MDQ, 2016; SNGRE, 2020; EPMAPS, 2021).

2.2.3. Investigaciones Recientes en la Zona

Estudios recientes en la zona baja del río Monjas evidencian la alta susceptibilidad a procesos de remoción en masa debido a la interacción entre factores físicos, morfoclimáticos y antrópicos. Las alteraciones morfológicas responden principalmente a dos causas: las fuertes precipitaciones que modifican el caudal y la expansión urbana que impermeabiliza el suelo, reduciendo la infiltración y alterando el ciclo hidrológico (Aguirre Paladines, 2023; Barragán Kondracka & Murillo Gavilánez, 2023). En relación con los estudios de estabilidad de taludes, Cedeño Plaza (2022) evaluó el sector oeste de las Ruinas de Rumicucho y determinó que la estabilidad del bloque intermedio es deficiente al no cumplir con los factores de seguridad exigidos por la NEC-SE-GC (2015), tanto en escenarios húmedos como secos, y bajo condiciones sísmicas y no sísmicas. Esto se debe a la escasa plasticidad y cohesión de los estratos, además de una composición marcadamente heterogénea. Por otra parte, la Secretaría General de Seguridad y Gobernabilidad (SGSG) del Municipio Metropolitano de Quito (2016) determinó que, entre 2003 y 2014, el talud de la Antonia ha experimentado un deslizamiento medio anual de 2,75 m/año. En conjunto, se evidencia la

necesidad de un monitoreo constante y gestión integral del territorio para prevenir nuevos eventos peligrosos.

2.3. Factores Condicionantes y Detonantes de los Deslizamientos

La estabilidad de laderas depende de la interacción entre factores condicionantes y desencadenantes, los cuales determinan tanto las propiedades internas de los materiales como su respuesta ante agentes externos. Los factores detonantes definen las características inherentes del terreno y el grado de susceptibilidad frente a la inestabilidad; entre los factores destacan el relieve, la litología, la estructura geológica, las propiedades geomecánicas de los materiales y la cobertura vegetal (González de Vallejo et al., 2002). Estos influyen directamente en la distribución del peso del terreno, su resistencia, deformabilidad y comportamiento hidrogeológico, además de favorecer procesos como la erosión o la meteorización. En contraste, los factores desencadenantes actúan como los elementos que rompen el equilibrio existente, entre los más relevantes se encuentran las precipitaciones, los cambios en las condiciones hidrológicas, las cargas aplicadas, la erosión en la base del talud y las variaciones climáticas extremas. Estos producen incrementos en las presiones intersticiales, modificaciones en el estado tensional, pérdida de cohesión y disminución de la resistencia del material, lo que finalmente conduce al colapso o deslizamiento del talud (González de Vallejo et al., 2002).

2.4. Variables de Análisis Consideradas en el Estudio

2.4.1. Variables Geomorfológicas y Geotécnicas

Estas describen las variables que relacionan las características físicas y naturales de los taludes, las cuales determinan su equilibrio y su riesgo al deslizamiento.

2.4.1.1. Altura del Talud

La altura del talud es la variación de elevación o diferencia de nivel entre la cresta y la base, expresada en metros. Constituye un indicador geométrico fundamental de estabilidad: a mayor altura, mayor energía potencial. De acuerdo con Shiferaw (2021), el incremento de la altura representa un factor determinante en la desestabilización de los taludes, al modificar el modo de falla hacia un deslizamiento de base que moviliza una masa de suelo más extensa.

2.4.1.2. Pendiente del Talud

La pendiente del talud es el ángulo de inclinación entre la base y la cresta. Pendientes superiores a 30° aumentan la probabilidad de falla. Este criterio fue definido según la metodología del CENEPRED (2014), que propone clasificar los niveles de susceptibilidad y riesgo en función del ángulo de pendiente y su influencia en la estabilidad.

2.4.1.3. Litología (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos [SUCS] + Geología Local)

La litología describe la naturaleza y composición del material que conforma el talud. Los suelos arcillosos, limosos o coluviales suelen presentar baja resistencia al corte y alta plasticidad, lo que incrementa el riesgo de inestabilidad (Terzaghi et al., 1996). En este trabajo, la clasificación litológica se basa en la información geotécnica y geológica local, integrada según el sistema SUCS (Unified Soil Classification System).

Además, se contempla una caracterización de ciertas muestras con el fin de verificar que la información obtenida por terceros sea correcta.

2.4.1.3.1. Caracterización Geológica

Cabe aclarar que no se consideran ensayos de laboratorio enfocados en determinar parámetros mecánicos de resistencia, como el ángulo de fricción interna, la cohesión ni la ejecución de ensayos especiales como Corte Directo o Triaxiales, puesto que esto excede el

alcance definido para este trabajo.

Los ensayos descritos a continuación corresponden a la identificación en campo combinada con la verificación en laboratorio de materiales PUCE.

i. Identificación por Medio de Manual-Visual (Norma ASTM D-2488)

La identificación preliminar de las muestras de suelo se realiza mediante el procedimiento visual-manual descrito en la norma ASTM D2488. Este método permite estimar las propiedades físicas del suelo en campo sin el uso de equipo de precisión.

Procedimiento:

1. **Identificación de Partículas:** Se estima visualmente el porcentaje de partículas retenidas en el tamiz No. 200 (0.075 mm). El suelo se clasifica como grueso si más del 50% de sus partículas eran visibles individualmente, en cuyo caso se procedió a describir su angulosidad (angular, subangular, sub-redondeada o redondeada) y su forma (plana, alargada o ambas). En caso contrario, se cataloga como suelo de grano fino.
2. **Ensayos Manuales para Finos:** Se llevan a cabo tres pruebas esenciales para diferenciar entre arcillas y limos en la fracción fina:
 - **Dilatancia (Reacción al agitado):** Se fabrica una pastilla de tierra húmeda y se mueve de manera horizontal en la palma de la mano (Anexo C, ilustración C2). Se registra la velocidad de la aparición de agua en la superficie y su posterior desaparición al apretar la muestra. Una respuesta rápida es distintiva de los limos no plásticos, mientras que la falta de reacción señala arcillas (ASTM International, 2017).
 - **Resistencia en seco:** Se examina la dificultad de deshacer un terrón de tierra secada al aire cuando se presiona entre los dedos (Anexo C, Figura C1).

- Tenacidad (Plasticidad): Se busca crear rollos o filamentos de suelo de 3 mm de grosor, en las palmas, para comprobar su cohesión en las cercanías del límite plástico (Anexo C, Figura C3).

Para realizar la clasificación se usó la siguiente Tabla 1 de clasificación:

Tabla 1

Identificación de suelos finos inorgánicos a partir de pruebas manuales.

Símbolo del Grupo	Nombre Típico del Suelo	Resistencia en Seco	Dilatancia	Tenacidad
ML	Limo Baja Plasticidad	Nula a Baja	Lenta a Rápida	Baja o no se forma hilo
CL	Arcilla Baja Plasticidad	Media a Alta	Nula a Lenta	Media
MH	Limo Plástico	Baja a Media	Nula a Lenta	Baja a Media
CH	Arcilla Alta Plasticidad	Alta a Muy Alta	Nula	Alta

Nota. La tabla muestra los criterios de decisión para clasificar la fracción fina del suelo según su comportamiento físico. Adaptado de *Standard practice for description and identification of soils (visual-manual procedure)* (ASTM D2488-17), por ASTM International, 2017 (<https://www.astm.org/d2488-17.html>).

ii. **Análisis Granulométrico Combinado (Lavado y Tamizado Mecánico bajo ASTM D6913)**

Aquí se combina el método de lavado para la remoción de finos y el tamizado manual para clasificar la porción restante (Anexo D, Figura D1).

Procedimiento Estándar:

- Toma de muestra: Tal como se explica en la norma ASTM D2488-17, se puede tomar la recomendación de una muestra mínima en función del diámetro de la partícula más grande. Siendo el tamaño de las partículas encontradas en la zona de estudio, no superior a 4.75 mm se sugiere una muestra mínima de 110 g.

- Lavado de finos: Se anota la masa inicial seca. Luego se la coloca sobre el tamiz No. 200 (0.075 mm) y se lava con agua que esté corriendo, con delicadeza hasta que el agua sea transparente, habiendo eliminado los limos y las arcillas que se adhieren al resto de partículas. Cabe mencionar que para facilitar este lavado se usó un tamiz No. 40 (0.425 mm) para retener una porción de material de mayor diámetro.
- Secado de la porción gruesa: El material que se retiene en el tamiz No. 200 (arenas y gravas) se seca en horno a $110 \pm 5^\circ\text{C}$, para luego registrar su nuevo peso, esta diferencia en el peso con la masa inicial corresponde a la cantidad de finos que contenía la muestra.
- Tamizado Manual: Después de ser secada y lavada, la muestra se pasa a través de los tamices de 2", 1 1/2", 1", 3/4", 3/8", N°4, N°10, N°40 y N°200, mediante agitación manual.

Cálculo de la Curva: Se pesa el material retenido en cada tamiz. En virtud de ello, se juntan estos pesos para determinar los porcentajes totales que pasan por cada apertura, generando así la curva granulométrica completa en un diagrama semilogarítmico y poder clasificar el suelo.

Las ecuaciones que se usaron se detallan a continuación:

- Porcentaje de Humedad (w):

$$w(\%) = \frac{W_w}{W_s} * 100 \quad (3)$$

Donde,

W_w : del agua presente en la muestra (g).

W_s : Peso de los sólidos o suelo totalmente seco (g)

- Porcentaje de Finos (Lavado sobre tamiz No. 200):

$$\%Finos = \frac{W_{inicial} - W_{lavado_seco}}{W_{inicial}} * 100 \quad (4)$$

Donde,

$W_{inicial}$: Peso de la muestra seca tomada antes de realizar el lavado (g).

W_{lavado_seco} : Peso de la muestra seca después de lavar sobre el tamiz No. 200 (g).

- Porcentaje Retenido Parcial(R_p):

$$R_p(\%) = \frac{W_{ret-i}}{W_{inicial}} * 100 \quad (5)$$

Donde,

W_{ret-i} : Peso de suelo retenido en un tamiz específico (g).

R_p : Porcentaje retenido parcial en cada tamiz (%).

$W_{inicial}$: Peso de la muestra seca tomada antes de realizar el lavado (g).

- Porcentaje que Pasa (P_p):

Es el valor que se grafica en el eje Y.

$$P_p(\%) = 100 - \Sigma R_p \quad (6)$$

Donde,

P_p : Porcentaje que pasa o porcentaje de finos acumulado (%).

ΣR_p : Sumatoria de los porcentajes retenidos acumulados hasta el tamiz anterior.

- Coeficientes de Forma (Para clasificación SUCS):

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \quad (7)$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} * D_{60}} \quad (8)$$

Donde,

D_{10} (Diámetro efectivo): Tamaño de partícula para el cual el 10% del material es más fino (mm).

D_{30} : Tamaño de partícula para el cual el 30% del material es más fino (mm).

D_{60} : Tamaño de partícula para el cual el 60% del material es más fino (mm).

C_u : Coeficiente de uniformidad (adimensional).

C_c : Coeficiente de curvatura (adimensional).

iii. Límites de Consistencia o de Atterberg (Norma ASTM D4318-17)

Para complementar su clasificación SUCS, se determinan los límites líquido y plástico en lo posible.

Procedimiento:

- **Límite Líquido (LL):** Se emplea el dispositivo de Casagrande (Anexo D, Figura D2). Se coloca una muestra de suelo homogeneizada con agua destilada en la copa, procediendo a realizar una ranura central con el ranurador estandarizado. Se contabiliza el número de golpes necesarios para que el fondo de la ranura cerrara una distancia de 12.7 mm (1/2 pulgada). En el Método A (Multipunto), obteniendo al menos tres puntos de humedad en un rango de 15 a 35 golpes para construir la curva de flujo e interpolar la humedad correspondiente a los 25 golpes. O bien el método B (Uni-punto) donde se intenta llegar a la humedad necesaria para alcanzar 25 golpes o bien mediante un solo punto y las ecuaciones descritas en la norma, calcularla.
- **Límite Plástico (LP):** Se determina mediante el moldeo de cilindros de suelo de aproximadamente **3.2 mm (1/8 pulgada)** de diámetro sobre una placa de vidrio esmerilado (Anexo D, Figura D3). El límite se alcanza cuando el cilindro comienza a

agrietarse transversalmente o desmoronarse bajo la presión de la mano al alcanzar dicho diámetro. El LP se define en ese momento por el contenido de humedad.

- **Índice de Plasticidad (IP):** Es la diferencia numérica entre el LL y el LP ($IP = LL - LP$), valor que denota el rango de humedad en el cual el suelo se comporta de manera plástica.

A continuación, se detallan las fórmulas para el cálculo de los límites.

- Contenido de Humedad (ω):

Fórmula base para calcular tanto el LL como el LP en función de los pesos obtenidos en laboratorio.

$$w(\%) = \frac{W_{húmedo} - W_{seco}}{W_{seco} - W_{cápsula}} * 100 \quad (9)$$

Donde:

w : Contenido de humedad expresado en porcentaje (%).

$W_{húmedo}$: Peso de la cápsula más el suelo húmedo (g).

W_{seco} : Peso de la cápsula más el suelo seco al horno (g).

$W_{cápsula}$: Peso de la cápsula vacía o tara (g).

- Para el Límite Líquido (Método A - Multipunto):

Se utiliza la ecuación de la recta de flujo (la que se obtuvo de la regresión logarítmica) para encontrar la humedad a los 25 golpes.

$$w = -F_w * \log(N) + C \quad (10)$$

Donde:

ω = Contenido de humedad (%).

N : Número de golpes.

F_w : Índice de flujo (pendiente de la curva).

- Para el Límite Líquido (Método B - Unipunto):

Esta es la ecuación teórica que menciona la norma ASTM D4318 para calcular el LL con un solo ensayo (generalmente entre 20 y 30 golpes).

$$LL = w_n * \left(\frac{N}{25}\right)^{0.121} \quad (11)$$

Donde,

w_n : Humedad del ensayo a N golpes.

N : Número de golpes obtenidos.

0.121: Coeficiente empírico de la norma.

- Índice de Plasticidad (IP):

$$IP = LL - LP \quad (12)$$

Donde,

IP : Índice de Plasticidad (%).

LL : Límite Líquido (%)

LP : Límite Plástico (%).

2.4.1.4. Longitud del Talud

Corresponde a la extensión lineal del borde del talud paralelo al cauce, expresada en metros. Longitudes mayores indican una mayor superficie susceptible de erosión y, por tanto, un riesgo potencial más alto. Según Badavath et al. (2024), la longitud del talud guarda

relación directa con la concentración de flujo superficial y la propagación de erosión en laderas. En otras palabras, esta variable se seleccionó, la longitud del talud actúa como un factor amplificador de la inestabilidad debido al incremento en el potencial erosivo y la acumulación de flujos superficiales.

2.4.2. Variables Estructurales y Antrópicas

Relacionadas con la intervención humana y la presencia de infraestructura.

2.4.2.1. Carga de la Infraestructura en Cresta del Talud

Corresponde al peso total de las edificaciones situadas en la parte superior del talud, medido en toneladas (Ton). En este trabajo, la carga fue estimada considerando las Norma Ecuatoriana de la Construcción: Cargas (no sísmicas) (NEC-SE-CG) las cuales establecen las cargas muertas y vivas típicas de edificaciones según su ocupación.

Esta variable emula el efecto de la sobrecarga urbana sobre la estabilidad del terreno.

2.4.2.2. Distancia del Elemento Posiblemente Afectado Hasta la Cresta del Talud

Se define como la distancia espacial más corta entre la estructura y la cresta del talud; es decir, se busca ubicar el elemento con mayor exposición a la amenaza. Este parámetro fue calculado mediante mediciones espaciales en QGIS, siguiendo criterios adoptados por el MDMQ (2019), que identifican la distancia a la cresta como un factor clave de amenaza local.

2.4.3. Variables Hidrológicas

Vinculadas con la acción del agua superficial o subterránea.

2.4.3.1. Distancia del Río a la Base del Talud

Mide la separación entre la base del talud y el cauce activo del río. Una distancia corta implica una exposición directa a la erosión fluvial, lo que puede causar socavación, pérdida de soporte y aumento del riesgo de falla del talud (Crosta & Agliardi, 2003). Monteiro et al. (2016) destacan que la socavación continua puede inducir colapsos progresivos y pérdida de soporte basal.

2.4.3.2. Caudal del Río

El periodo de retorno (T) se define como el intervalo de tiempo promedio, expresado en años, en el que se espera que un evento hidrológico de una magnitud determinada sea igualado o superado al menos una vez (Chow et al., 1994). En el contexto de esta investigación, el caudal usado es aquel con un periodo de retorno de 100 años (expresado en m^3/s), mismo que representa un evento extremo con una probabilidad de ocurrencia anual del 1%. La selección de este parámetro es crítica para el análisis de erosión basal, ya que permite evaluar la estabilidad de los taludes ante escenarios que generan los mayores esfuerzos cortantes en el pie de la ladera. Esto último se justifica pues el incremento abrupto y no controlado del caudal, originado por precipitaciones intensas o descargas de origen antrópico, genera condiciones de alto riesgo, ya que incrementa la presión hidrostática y la erosión lateral del cauce, socavando la parte inferior del talud y disminuyendo su estabilidad (Barragán Kondracka & Murillo Gavilánez, 2023; Espinosa Chiliguano, 2022)

2.4.4. Variables Socio-Territoriales

Asociadas al impacto potencial sobre la población y bienes expuestos.

2.4.4.1. Número de Elementos Posiblemente Afectados

Representa el número de elementos expuestos dentro del área de influencia del talud, incluyendo edificaciones, vías, puentes, áreas verdes y parqueaderos. Su cuantificación permite determinar la magnitud de las posibles pérdidas físicas.

2.4.4.2. Área de protección ecológica dentro del predio

Se refiere al área del predio inutilizable comprendida entre la cresta del talud y el cauce del río, medida en m². Este indicador refleja la exposición directa al combinar el predio y la zona de influencia directa del talud. Su determinación se basa en el catastro predial oficial del DMQ, integrado con las delimitaciones de taludes obtenidas mediante QGIS en el presente trabajo.

2.5. Descripción del Método Analytic Hierarchy Process (AHP)

El AHP, o Proceso Analítico Jerárquico, es una metodología creada por Thomas L. Saaty en 1980 para ayudar a tomar decisiones cuando hay varios factores que influyen en el problema y no todos se pueden comparar directamente (Saaty, 1987). Es útil en situaciones donde se necesita priorizar variables con distintos niveles de importancia, algo muy común en proyectos de ingeniería civil, evaluación de riesgos, urbanismo o manejo ambiental.

El método consiste en descomponer el problema en partes más pequeñas, colocándolas en una estructura jerárquica (Figura 1). En la punta se debe definir un objetivo principal (como evaluar el riesgo de deslizamiento), en el medio se ubican los criterios que se consideren influyen en ese objetivo y que serán determinantes para la toma de decisiones (como pendiente, litología, caudal, etc.), y abajo se ponen las posibles opciones o zonas a evaluar. Esto se ejemplifica en la siguiente imagen:

Figura 1

Estructura jerárquica



Nota. Esquema de la interrelación de las 10 variables estudiadas y de las 67 alternativas de análisis. Elaboración propia de los autores.

Una parte fundamental del AHP es la comparación por pares, que se fundamenta en el mismo proceso llevado a cabo por los humanos para tomar decisiones. Se comparan dos criterios a la vez para decidir cuál de ellos es el más relevante y cuánta es la importancia de uno respecto del otro. Esto se hace con una escala del 1 al 9, propuesta por Saaty (1990) donde 1 corresponde a que los dos criterios tienen la misma importancia, hasta 9 lo que significa que uno tiene una importancia extrema respecto al otro criterio (Tabla 2).

Tabla 2*Escala fundamental para establecer importancia*

Intensity of importance on an absolute scale	Definition	Explanation
1	Equal Importance	Two activities contribute equally to the objective
3	Moderate importance of one over another	Experience and judgment strongly favor one activity over another
5	Essential or strong importance	Experience and judgment strongly favor one activity over another
7	Very Strong Importance	An activity is strongly favored and its dominance demonstrated in practice
9	Extreme Importance	The evidence favoring one activity over another is of the highest possible order of affirmation
2, 4, 6, 8	Intermediate values between the two adjacent judgments	When compromise is needed
Reciprocals	If activity i has one of the above numbers assigned to it when compared with activity j . then j has the reciprocal value when compared with i	
Rationals	Ratios arising from the scale	If consistency were to be forced by obtaining n numerical values to span the matrix

Nota. Adaptado de *How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process*, por T. L. Saaty, 1990, *European Journal of Operational Research*, 48, 9–26.

Así se logra obtener una matriz cuadrada donde los elementos diagonales siempre tienen un valor igual a 1 (puesto que se compara un criterio consigo mismo, siendo ambos igual de importantes), y los elementos por debajo de la diagonal son el recíproco del valor por encima de la diagonal. Posteriormente se construye el vector de prioridades (también llamado

“vector propio” o “eigenvector”) a partir de esta matriz que representan los pesos relativos en función de cada criterio.

Con estas comparaciones se forma una matriz, y a partir de ella se calculan los pesos de cada criterio usando vectores propios. Estos pesos muestran cuánto aporta cada criterio al objetivo final. Además, el método incluye un sistema para verificar si las comparaciones tienen sentido. Si hay contradicciones, el modelo lo detecta y calcula un índice de consistencia (CI) y un índice de razón de consistencia (CR), que deben estar dentro de ciertos valores para que el análisis sea confiable ($CR < 0.1$) (Saaty, 1990).

En este contexto, la ecuación con la que se calcula CI es:

$$CI = \frac{\lambda - n}{n - 1} \quad (13)$$

Donde, n es el número de variables analizadas y λ corresponde a el valor propio principal; y corresponde a el valor propio más grande de la matriz de comparaciones por pares (matriz recíproca). Este último concepto cuantifica la desviación de la consistencia en los juicios, y se obtiene al resolver (o aproximar) el valor propio principal de la matriz de comparaciones por pares (Saaty, 1990).

Por otro lado, para calcular CR se usa la siguiente expresión:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (14)$$

Donde, RI es el índice de consistencia aleatoria, cuyo valor se obtiene a través de un gran número de matrices recíprocas generadas de manera aleatoria de muestras con un tamaño de 500, como se ve en la Tabla 3 (Saaty, 1987).

Tabla 3*Índices de consistencia aleatoria RI*

Tamaño de Matriz (n)	Índice Aleatorio (RI)
1	0
2	0
3	0.58
4	0.9
5	1.12
6	1.24
7	1.32
8	1.41
9	1.45
10	1.49

Nota. Adaptado de "The Analytic Hierarchy Process—What It Is and How It Is Used", por R. W. Saaty, 1987, *Mathematical Modelling*, 9(3–5), p. 171.

La fase final de la metodología AHP consiste en la síntesis de las prioridades locales derivadas (vector de pesos relativos) para obtener las prioridades globales de las alternativas. De esta manera, para obtener el valor subyacente a cada alternativa se calcula mediante la suma ponderada de sus prioridades locales bajo cada criterio, véase en la Ecuación 15.

$$P_i = \sum_{j=1}^m w_j * v_{ij} \quad 15$$

Donde,

m , es el número de criterios en el nivel considerado.

w_j , es el peso o prioridad del criterio j .

v_{ij} , es la prioridad local de la alternativa i con respecto al criterio j .

P_i , es la prioridad global de la alternativa i .

En tal sentido, se puede obtener la calificación de cada alternativa estudiada, de modo que se pueda realizar una jerarquía de esta y establecer prioridades o acciones con dicha información

Este enfoque se ha usado en diferentes contextos donde no solo hay datos cuantitativos, sino también variables cualitativas o basadas en experiencia. En estudios de riesgo geológico, por ejemplo, la susceptibilidad a movimientos en masa se encuentra validada y respaldada por estudios recientes desarrollados en el contexto andino ecuatoriano (Cargua et al., 2024). Otro ejemplo puede ser la zonificación de riesgos por amenazas tanto naturales como operativa en Luruaco Colombia (Almario Guio, 2021). Finalmente, Bahrami et al. (2021) usó esta metodología para mapear la susceptibilidad a deslizamientos de tierra en la provincia de Gilan, Irán usando como variables como pendiente, litología y precipitación.

2.6. Cálculo Para el Tamaño de Muestra Para una Población Finita

De acuerdo con *Hernández-Sampieri et al. (2014)*, la muestra se define como “un subgrupo de la población de interés, seleccionado de forma que sea representativo y permita generalizar los resultados obtenidos” (p. 170). El tamaño adecuado de la muestra depende de varios factores, entre ellos el nivel de confianza, el margen de error, la variabilidad esperada y el tamaño de la población.

2.6.1. Nivel de Confianza (Z)

El nivel de confianza refleja la probabilidad de que los resultados de la muestra representen correctamente a la población. Este valor se asocia con una distribución normal y suele expresarse mediante el valor crítico Z . Para ilustrar esto, un nivel de confianza del 95% corresponde a $Z = 1.96$ (Triola, 2018).

2.6.2. Margen de Error (e)

El margen de error es la diferencia máxima aceptable entre los resultados de la muestra y los valores reales de la población. Este parámetro se expresa como un porcentaje y suele oscilar entre 1% y 10%, dependiendo de la precisión requerida (Navidi, 2019).

2.6.3. Proporción Esperada (p)

Cuando no se dispone de información previa sobre la proporción real de la característica de interés en la población, es habitual adoptar un valor de $p = 0,5$ para el cálculo del tamaño de muestra. Esta elección resulta conservadora, ya que el producto $p*(1 - p)$ alcanza su valor máximo cuando $p = 0,5$, lo que genera el mayor tamaño de muestra posible y garantiza que el margen de error especificado sea válido aun en el peor escenario de variabilidad (Briš, 2021).

2.6.4. Corrección Para Población Finita

Si el tamaño de la población (N) no es grande, debe aplicarse la corrección por población finita, ya que la variabilidad disminuye a medida que se extraen elementos de una población limitada. La fórmula general es:

$$n = \frac{N * Z^2 * p * q}{e^2 * (N - 1) + Z^2 * p * q} \quad (16)$$

Esta fórmula permite calcular el tamaño de la muestra necesario para lograr una estimación confiable en una población de tamaño conocido, reduciendo la incertidumbre y optimizando los recursos del estudio (Lohr, 2022).

2.6.5. Fotogrametría

Según Quirós Rosado (2014), la fotogrametría es un medio a través del cual es posible obtener mapas o planos con amplia información a partir de imágenes. Además, no se limita

únicamente a esta función, sino que también permite generar ortofotos georreferenciadas con un alto nivel de detalle.

La fotogrametría puede ser tanto terrestre como aérea. La primera presenta mayores limitaciones debido a que depende del acceso físico al terreno, la visibilidad del objeto a medir y las condiciones geométricas del entorno, lo que puede restringir la captura de imágenes desde los ángulos adecuados. En cambio, la fotogrametría aérea proporciona una mayor cobertura y sencillez para conseguir imágenes desde diferentes alturas y puntos de vista, lo que facilita una mejor creación de ortofotos y modelos.

La fotogrametría con drones, por su eficacia y versatilidad, ha ganado popularidad en la actualidad, particularmente en el campo de la topografía y la recopilación de datos geoespaciales. Los UAV (Unmanned Aerial Vehicle) permiten realizar vuelos a baja altitud, lo que proporciona una resolución espacial elevada y un control más exacto sobre la superposición de imágenes.

Esta superposición de imágenes consiste en obtener dos o más fotografías consecutivas que comparten zonas en común dentro del área capturada. Esta coincidencia de puntos permite al software identificar concordancias entre las imágenes, calcular la geometría del vuelo y reconstruir con precisión el modelo tridimensional del terreno.

Además, los drones pueden acceder a zonas peligrosas o de difícil entrada, reducir considerablemente el tiempo de obtención de datos y reducir los costos operativos en comparación con otras opciones.

De acuerdo con lo expuesto por Nex y Remondino (2014), los UAV constituyen una opción económica frente a la fotogrametría aérea tradicional realizada con aeronaves tripuladas, lo que permite ampliar las posibilidades para el mapeo de corta distancia y la elaboración de modelos tridimensionales.

3. Área de Estudio

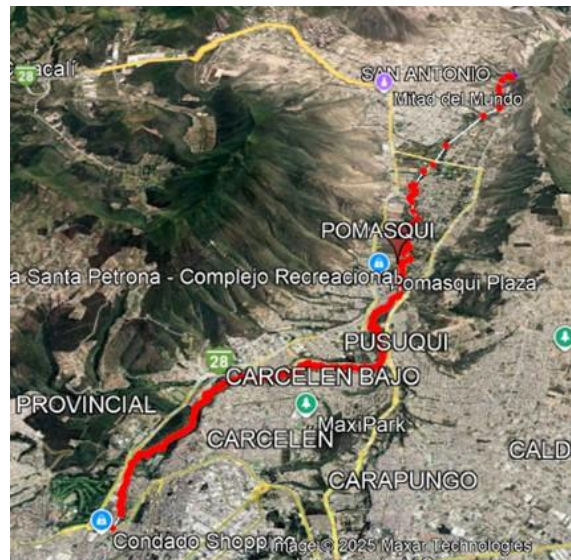
3.1. Localización y Delimitación del Tramo Analizado del Río Monjas

La región investigada se ubica al noroeste de Quito, precisamente en una franja del Río Monjas que va desde la rotonda del Condado hasta unos 21 km río abajo (Figura 2). Sin embargo, el tramo que se va a estudiar en este trabajo inicia en las coordenadas (784488.260 m E, 9998156.726 m N) UTM-WGS84 17S del río y se extiende hasta las coordenadas (787220.207 m E, 10002709.527 m N), como se ve en la Figura 2.

Dado que el trazado del tramo analizado atraviesa la línea equinoccial, se optó por unificar el sistema de referencia para asegurar que haya una integridad topológica y la continuidad espacial de los datos. Por lo tanto, todos los puntos (del 1 al 67) se presentan proyectados en el sistema UTM WGS84, Zona 17 Sur.

Figura 2

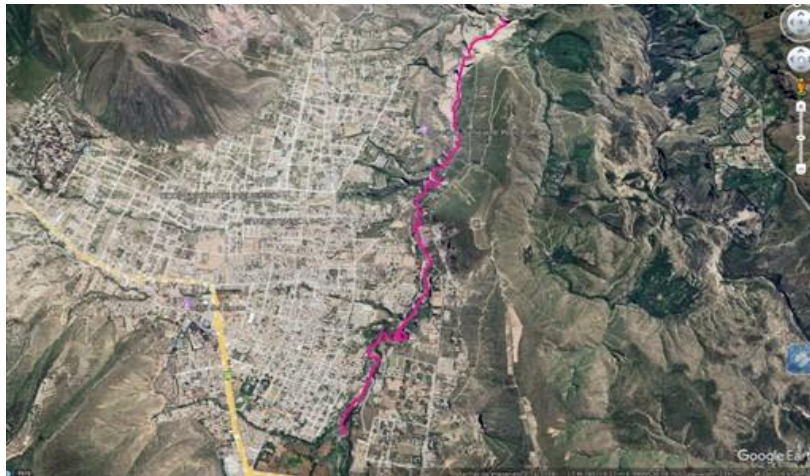
Río Monjas



Nota. Imagen satelital adaptada de Google Earth Pro (2025).

Figura 3

Río Monjas tramo del km 14 al km 21



Nota. Imagen satelital adaptada de Google Earth Pro (2025).

3.2. Amenazas

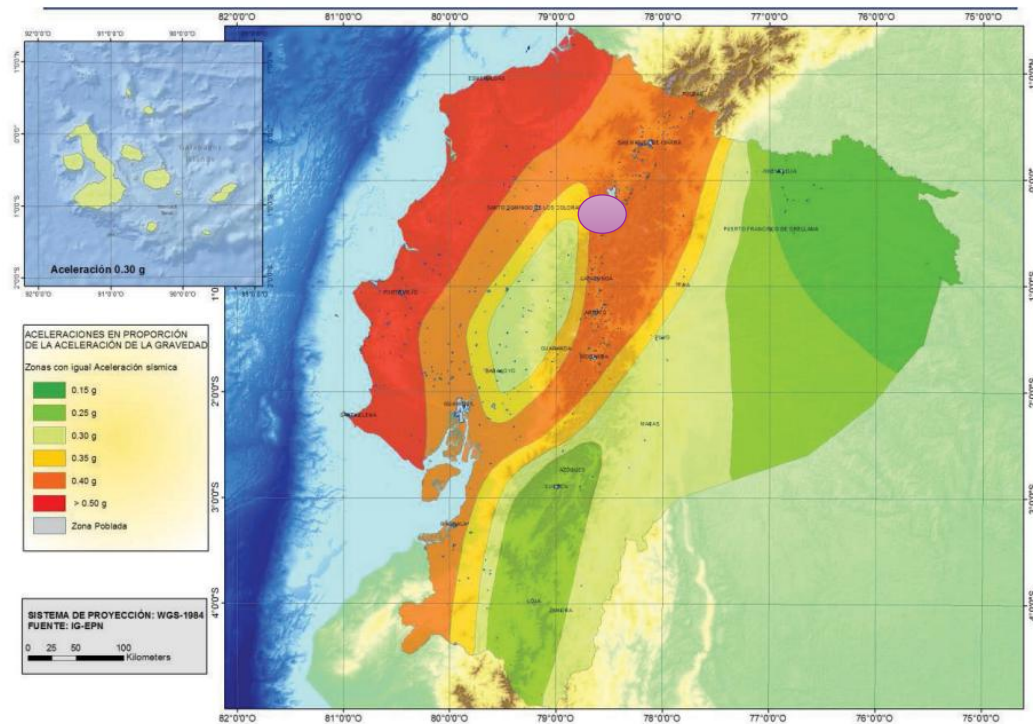
La zona de estudio presenta una alta exposición, pues en esta se pueden presentar solos o simultáneamente diferentes tipos de amenazas. Estas se pueden encapsular de la siguiente manera: amenazas geológicas (sísmicas, volcánica y fenómenos de remoción de masas), por inundaciones, por acción hídrica y por la intervención antrópica. Mismas que se explicarán más adelante y las cuales justifican la necesidad del presente trabajo.

3.2.1. Amenazas Sísmicas

De acuerdo con el mapa de la Figura 4, la zona de estudio presenta un peligro sísmico alto (zona sísmica V), con una aceleración de 0.4g para un periodo de retorno de 475 años.

Figura 4

Mapa de la aceleración máxima esperada para el sismo de diseño en el Ecuador (Factor de zona Z)



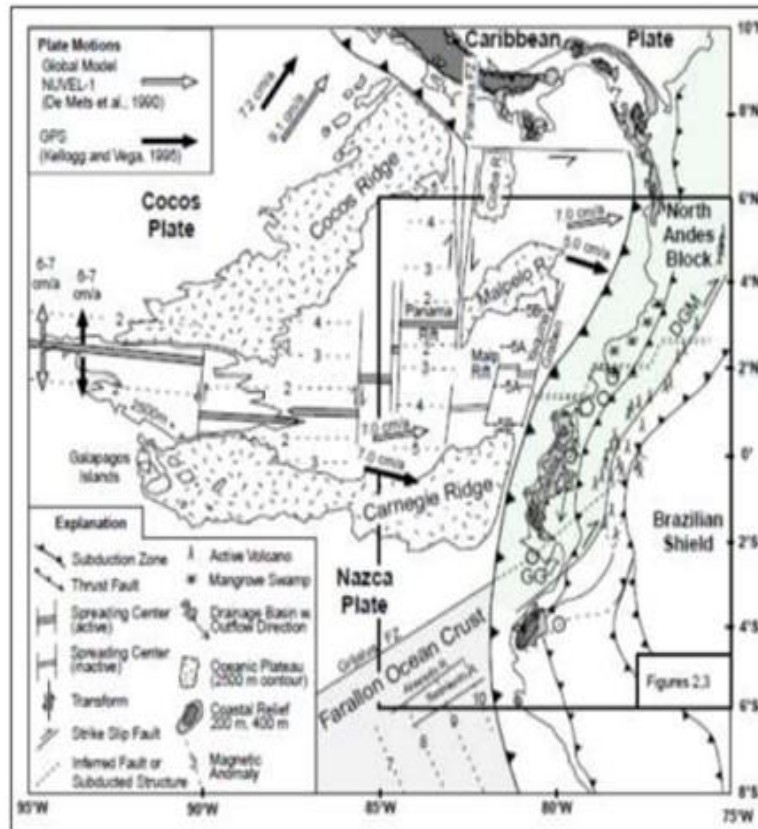
Nota. Adaptado de Norma Ecuatoriana de la Construcción: Peligro sísmico, diseño sismo resistente (NEC-SE-DS) (p. 27), por el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda (MIDUVI), 2015.

Por otro lado, la presencia de esta amenaza también se ve condicionada por la geodinámica de Quito. La región andina del norte de Ecuador se caracteriza por una elevación intermedia que oscila entre los 1000 y 4000 m, así como por un estrecho sistema de depresión interandina de entre 8 y 30 km de ancho, con orientación NE-SO entre las Cordilleras Occidental y Oriental (Alvarado et al., 2014). En el margen occidental del Ecuador, la placa oceánica de Nazca (Figura 5) ha estado subduciéndose de manera oblicua frente al Bloque Andino del Norte y la placa Sudamericana durante aproximadamente los últimos 5 millones de años, siguiendo una dirección cercana a N83°E (Kendrick et al., 2003; Nocquet et al., 2009). Dicha subducción presenta una velocidad estimada entre 55 y 58 mm

por año (Trenkamp et al., 2002; Nocquet et al., 2009). En el sector bajo la ciudad de Quito, la zona de contacto de subducción se localiza a una profundidad cercana a los 120 km.

Figura 5

Tectónica de los andes septentrionales, modelo cinemático global, fallas importantes, movimientos relativos de las placas, anomalías magnéticas y actividad



Nota. Adaptado de Tectonic segmentation of the North Andean margin: Impact of the Carnegie Ridge collision (p. 260), por M. A. Gutscher, J. Malavieille, S. Lallemand y J. Y. Collot, 1999, *Earth and Planetary Science Letters*, 168, 255–270 ([https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00060-6)). Derechos de autor 1999 por Elsevier Science B.V.

El último evento sísmico en la zona de estudio ocurrió a las 03h56, con una magnitud de 4.2 y epicentro entre Pomasqui y San Antonio de Pichincha, aproximadamente a 30 km al norte de Quito. El movimiento fue sentido principalmente en el norte de la capital, así como

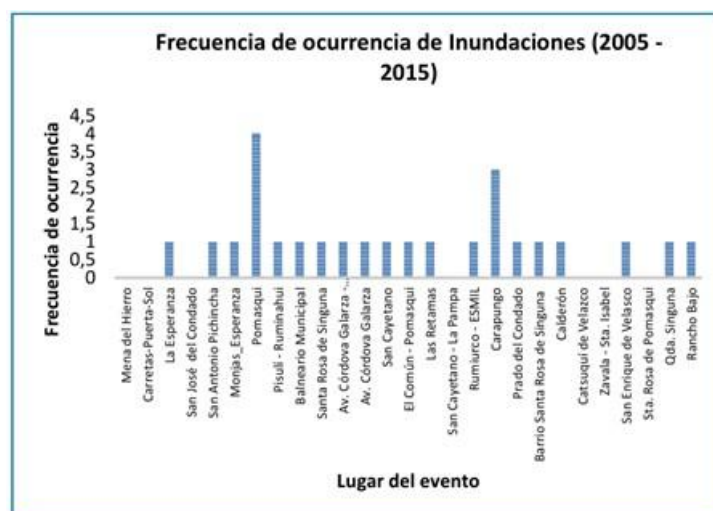
en los valles cercanos, Cayambe e Imbabura, sin que se reportaran daños (Instituto Geofísico — Escuela Politécnica Nacional [IG-EPN], 2019)

3.2.2. Amenaza por Inundaciones

En la cuenca baja del río Monjas, específicamente desde el sector El Condado, se evidencian procesos de socavación, profundización del cauce y desestabilización de taludes en ambas márgenes. Estos fenómenos se intensifican durante las crecidas asociadas a lluvias intensas (SGSG, 2016). Asimismo, tal como se aprecia en la Figura 6, el área de estudio presenta una alta susceptibilidad a inundaciones. En consecuencia, el caudal del río constituye una variable relevante, especialmente en los tramos inferiores del río Monjas.

Figura 6

Histograma de eventos morfoclimáticos en la cuenca del río Monjas



Nota. Adaptado de Eventos Morfoclimáticos por COE Metropolitano (2005-2015) como se citó en SGSG del Municipio Metropolitano de Quito (2016).

Para ilustrar esta amenaza el Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (2020) enlista los siguientes eventos ocurridos en la zona:

- **Pomasqui (16 de septiembre de 2020):** Lluvias intensas provocaron el desbordamiento de la quebrada Santa Teresa, resultando en un aluvión que obstruye

una vía de primer orden, generando daño estructural en un establecimiento educativo y viviendas aledañas.

- **Ponceano (6 de marzo de 2020):** Un hundimiento de la vía, provocado por lluvias, causó la falla estructural de una tubería principal, bloqueando completamente una calle y afectando viviendas. Días después por el colapso del alcantarillado 17 viviendas se vieron afectadas.
- **Pomasqui (27 de abril de 2020):** El desbordamiento de una alcantarilla generó un aluvión de lodo en una vía secundaria.

3.2.3. Amenaza por Intervención Antrópica

Durante el trabajo de campo, se identificaron los siguientes tipos principales de riesgos:

- **Depósitos de desechos y escombros en laderas:** La acumulación de basura y materiales de construcción en las quebradas genera, durante la temporada de lluvias, flujos de lodo y escombros (Figura 7), los cuales afectan de manera directa a las obras de infraestructura construidas por el DMQ y sobrecargan los taludes.

Figura 7

Botadero de basura clandestino



Nota. Imagen de autoría propia tomada en (785747.460 m E, 9999527.906 m N) UTM-WGS84 17S.

- **Contaminación de aguas superficiales y subterráneas:** Esta se produce en sectores ubicados bajo asentamientos humanos (invasiones), tanto de construcción formal como informal, que carecen de sistemas de alcantarillado o no están conectados a ellos (véase Figura 8). Estas aguas servidas se utilizan para el riego de cultivos de hortalizas, gramíneas e incluso frutales (Figura 9). Debido a lo anterior, este problema representa una amenaza directa para la salud pública, afectando tanto a los asentamientos ubicados en las márgenes del río y sus quebradas, como a la población general de Quito que consume estos productos.

Figura 8

Desagües clandestinos



Nota. Imagen de autoría propia tomada en (785511.337E, 9999162.622N) UTM-WGS84 17S.

Figura 9

Cultivos criados con riego de aguas servidas



Nota. Imagen de autoría propia tomada en (785025.134E, 9998818.131N) UTM-WGS84 17S.

- **Explotación y abandono de canteras:** La extracción de materiales pétreos, especialmente las ubicadas al oriente del río Monjas, ha derivado en múltiples canteras abandonadas o clausuradas sin un cierre técnico adecuado, tal como se observa en la Figura 10 (SGSG, 2016). Estas canteras generan contaminación ambiental y aumentan el riesgo de derrumbes.

Figura 10

Cantera

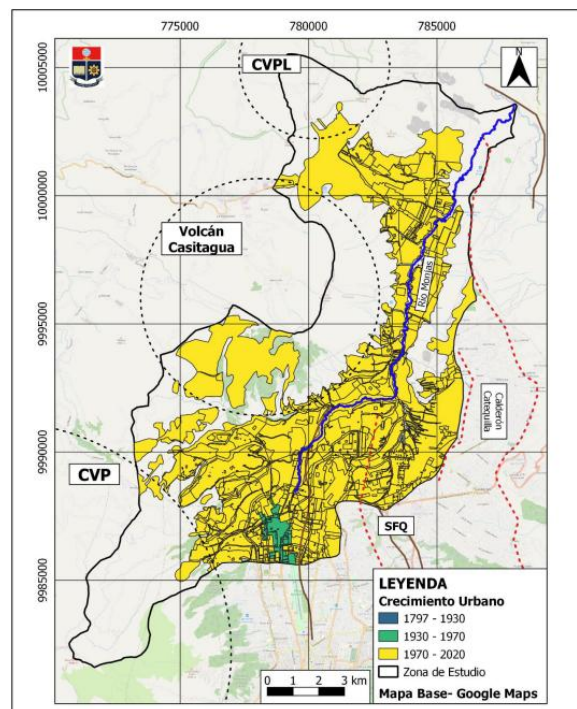


Nota. Imagen satelital obtenida de Google Earth Pro (2025). Coordenadas UTM-WGS84 17S: 785844.963 m E, 9999983.200 m N. Fuente: Google Earth.

- **Huella urbana:** Como se señala en el estudio de Espinosa Chiliguanó (2022), desde la década de 1970 los asentamientos humanos en la cuenca del río Monjas han incrementado de manera sostenida, especialmente sobre las laderas de volcanes como el Casitagua y el Pululahua (Figura 11). Asimismo, las observaciones de campo evidencian que muchos de estos asentamientos son de carácter clandestino y se encuentran ubicados sobre rellenos y en proximidad a las quebradas.

Figura 11

Mapa de crecimiento urbano desde el año 1797 hasta el 2020



Nota. Adaptado de “Crecimiento Urbano en el período 1921 a 2015” Figura 3.6, p. 44), por Secretaría de Seguridad y Gobernabilidad, 2018.

3.2.4. Amenaza Volcánica

En la zona de estudio, se encuentran cerca varios volcanes como lo es el complejo Volcánico Pululahua al oeste y al sureste del tramo estudiado el Volcán Casitagua, donde el primero tuvo su última erupción hace más de 2200 años y tiene un período de incidencia de 5000 años, y el segundo está extinto o en reposo (IG-EPN, s.f.).

Así mismo, se encuentran cerca varios volcanes, como el complejo Volcánico Pululahua al oeste y, al sureste del tramo estudiado, el Volcán Casitagua. Según Hall y von Hillebrandt (1988), el primero tuvo su última erupción hace más de 2305 años con un período de recurrencia aproximado de 5000 años, mientras que el segundo se considera extinto o en reposo.

3.3. Características Geomorfológicas y Geológicas del Sector

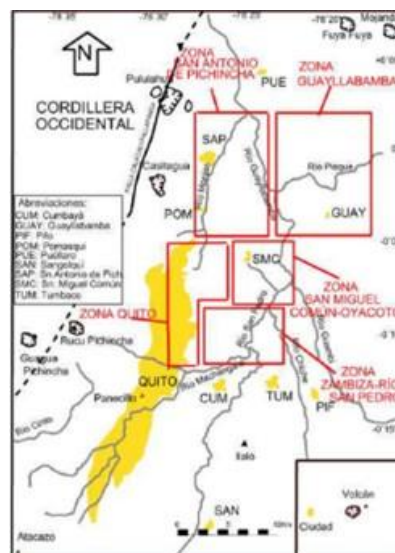
3.3.1 Geología

3.3.1.1. Geología regional

La Depresión Interandina (DI) que corresponde a Ecuador se divide en tres segmentos: DI Norte, DI Central (Quito–Guayllabamba) y DI Sur (Figura 12). El área de estudio se ubica en la DI Central cuyos límites son: al norte lo constituyen los volcanes Mojanda y Cusín; al sur, los complejos Rumiñahui, Pasochoa e Illiniza; al oeste, la Cordillera Occidental con los volcanes Casitagua, Atacazo y el complejo volcánico Pichincha; y al este, la Cordillera Real con el macizo Coturco y los volcanes Pambamarca y Puntas. Dentro de esta depresión se reconocen tres subcuencas principales: Quito, San Antonio y Guayllabamba (Villagómez, 2003).

Figura 12

Depresión interandina central



Nota. Adaptado de *Evolución Plio-Cuaternaria del Valle Interandino Central en Ecuador (zona Quito - Guayllabamba - San Antonio de Pichincha)* (p. 26), por Villagómez, D., 2003, [Tesis de ingeniería, Escuela Politécnica Nacional – Quito].

Los depósitos de la DI Central consisten primordialmente en materiales volcánicos y volcanoclásticos, que se encuentran sobreyacidos de forma discordante por tobas intercaladas con lahares, flujos piroclásticos y sedimentos de origen aluvial, fluvial, deltaico y lacustre asociados a las formaciones Pisque y San Miguel (Avilés, 2013). La secuencia sedimentaria de la cuenca Quito–San Antonio–Guayllabamba alcanza aproximadamente 1 000 m de espesor y abarca desde el Plioceno tardío hasta el Holoceno; su desarrollo temporal se estima en un intervalo de ~6–5 Ma o menos, incluyendo el área de estudio (Villagómez, 2003; Winkler et al., 2005).

3.3.1.2. Geología Local

La cuenca de San Antonio de Pichincha está limitada al occidente por el volcán Casitagua y al norte por el complejo volcánico Pululahua; hacia el oriente, la elevación Calderón–Catequilla la separa de la cuenca del Guayllabamba. En los sectores de Pomasqui y San Antonio de Pichincha afloran materiales asociados al volcán Pululahua (edad Holoceno), los cuales incluyen flujos piroclásticos, lahares, colapsos de domos y depósitos detríticos que rellenan valles adyacentes; dichos depósitos suelen estar cubiertos por niveles de cangahua (Espinosa Chiliguano, 2022). En el centro del valle se han desarrollado terrazas aluviales de edad Holoceno superior.

3.3.2. Litología

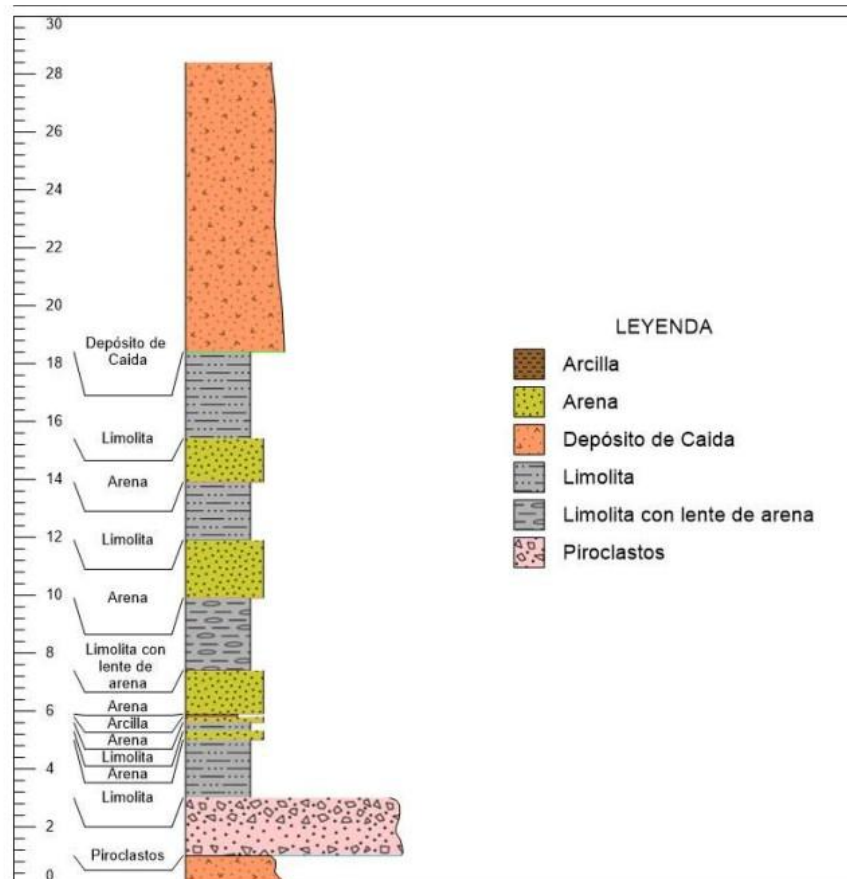
Según lo descrito por Pacheco (2013), el perfil litológico de San Antonio de Pichincha está dominado por depósitos de edad Cuaternaria, los cuales consisten en una mezcla de rocas volcánicas y sedimentos asociados. A continuación, se describen los estratos siguiendo su disposición vertical de arriba a abajo (Figura 13):

- **Formación Pululahua:** volcano sedimentos y secuencias de piroclastos que afloran en sectores concretos.
- **Formación Cangahua:** volcano sedimentos oxidados y alterados.

Por otro lado, estudios más recientes establecen una idea de la composición de la columna estratigráfica en la zona baja del Río Monjas (Figura 14).

Figura 14

Columna estratigráfica del sector Puente Viejo-Loma Catequilla 785876.85 m E, 653.23 m N UTM WGS 84 Z 17 N



Nota. Adaptado de *Estudio morfodinámico de la cuenca del río Monjas por trasvase de agua de los ríos orientales Papallacta, Tumiguina y Blanco Chico* (p. 89), por R. E. Barragán Kondracka y A. S. Murillo Gavilánez, 2023, Universidad Central del Ecuador.

3.3.3. Relieve y Limitación del Terreno para Evaluar

Esta área destaca por un terreno accidentado, típico de la transición entre los valles andinos y las faldas de la cordillera occidental. El terreno presenta variaciones significativas

en la forma, inclinación y altura del paisaje durante esta ruta, lo cual afecta directamente tanto el tipo de vegetación presente como las actividades humanas.

La forma del terreno se caracteriza por cuestas entre moderadas y pronunciadas, junto con áreas empinadas que son taludes naturales o cortes por la erosión y la acción humana. Estas condiciones del suelo podrían poner trabas al desarrollo de obras o precisar soluciones técnicas particulares, como la consolidación de laderas o sistemas de desagüe, sobre todo cerca del río, donde la erosión causada por el agua es mayor.

Estas formaciones, nacidas de erupciones volcánicas antiguas, tienen una variedad de rocas que afecta la firmeza del suelo y cómo responde a las obras. También se ven sedimentos recientes arrastrados por la lluvia y el río en las partes más bajas o cerca del lecho del río, señal de una dinámica geomorfológica activa.

La formación del relieve, además de dar carácter a la zona, presenta retos importantes para la medición del terreno y la fotogrametría, por la necesidad de adaptar los métodos y aparatos a las condiciones del lugar. En resumen, el terreno de esta área es tanto una riqueza natural como un conjunto de dificultades para su análisis y gestión. Su estudio a fondo es esencial para planificar proyectos seguros, que se puedan mantener y que respeten la dinámica natural del territorio.

3.4. Características Hidrológicas y Climáticas

3.4.1. Hidrografía

La zona de estudio pertenece a la microcuenca del río Monjas, la cual forma parte de la subcuenca del río Guayllabamba, que a su vez alimenta la cuenca del río Esmeraldas (Cedeño Plaza, 2022). Este sistema hidrográfico se origina en las laderas del Complejo Volcánico Pichincha y del volcán Casitagua, conformado por una red de quebradas con un patrón de drenaje dendrítico que fluyen predominantemente en dirección oeste-este, descargando sus aguas en el río Monjas, el principal cauce de la zona (Cedeño Plaza, 2022;

Pacheco, 2013). El río Monjas recorre aproximadamente 23 km hasta desembocar en el río Guayllabamba al noreste, captando los flujos provenientes de las quebradas que funcionan como elementos reguladores del ciclo hidrológico y aportantes a los ecosistemas locales (Santillán y Vite, 2011). La variación altitudinal de la cuenca influye directamente en las condiciones climáticas e hidrológicas, generando un gradiente de humedad que disminuye desde las partes altas hacia las bajas (SGSG, 2016).

3.4.2. Clima

La parroquia San Antonio de Pichincha presenta un clima mesotérmico templado cálido, caracterizado por condiciones secas, veranos frescos e inviernos fríos, con una temperatura media anual que oscila entre los 15.8 °C en julio y los 16.3 °C en abril (Cedeño Plaza, 2022). Debido a su relieve variable, la zona experimenta topo climas influenciados por la orientación y pendiente del terreno, que modifican la radiación solar y la circulación del viento provocando cambios en la temperatura local (Espinosa Chiliguano, 2022; Cornell University, 2009). Según Pourrut et al. (1995) la microcuenca del río Monjas presenta tres tipos de climas determinados por la altitud: Tropical Semiárido Templado en la parte baja, Mesotérmico Semi-Húmedo y Seco en la parte media, y Ecuatorial de Alta Montaña. Esta variabilidad altitudinal modula la temperatura, que oscila entre 7°C en la cabecera y 22°C en la parte baja, con una media anual de 14°C en el centroide de la cuenca (SGSG, 2016). Las precipitaciones anuales varían entre 1800 mm en las zonas altas y 400 mm en las bajas (partir de sectores como Carcelén, es decir, tendencia decreciente hacia el norte) con una precipitación media anual de 778 mm; además, se registran máximos diarios entre 30 y 50 mm/24 h, principalmente en los meses de noviembre y mayo (Cedeño Plaza 2022; Pourrut, 1995; Rivera, 2016).

3.5. Infraestructura y Ocupación del Suelo en el Entorno del Cauce

En el tramo del cauce del Río Monjas que atraviesa la parroquia de San Antonio de Pichincha presenta un uso de suelo fragmentado, caracterizado por sectores de urbanización creciente, infraestructuras viales de conexión y zonas de vocación agrícola-residencial, intercaladas con áreas de protección ecológica, urbana patrimonial y arqueológica (GADDMQ, s.f.). En las partes de pendiente más moderada y cercanas al cauce se observa una expansión de desarrollos residenciales y fraccionamientos bajo la clasificación Suelo Rural y uso “agrícola-residencial” (uso ARR) para barrios como Rumicucho, lo cual evidencia un tránsito hacia la urbanización periurbana. Por otro lado, en los márgenes más escarpados y próximos al cauce o a las quebradas se reconocen zonas de protección incluidas en el subsistema de áreas naturales protegidas del MDMQ (por ejemplo, la Reserva Geobotánica Pululahua o el Parque Recreacional y Bosque Protector Jerusalem) que sirven como corredores ecológicos, zonas de amortiguamiento frente a riesgos de erosión o deslizamiento y preservación del paisaje volcánico (GAD San Antonio de Pichincha, 2024).

Además, se da un uso patrimonial del terreno en la presencia de bienes arqueológicos (como el Centro de adoración a la luna en el periodo preincaico o el Pucará de Rumicucho), lo que significa que estas zonas tienen regulaciones especiales para su conservación (Expreso, 2025). En general, esta combinación de usos provoca que la infraestructura básica (agua potable y electricidad) y vialidad se concentren en los asentamientos residenciales cercanos al cauce. Por otro lado, la zona ribereña con taludes inestables y quebradas no recibe suficiente inversión para proteger el talud y sanearlo, lo que aumenta la vulnerabilidad del sistema territorial.

4. Metodología

4.1. Enfoque General del Estudio

La metodología aplicada en este trabajo de integración curricular combinó enfoques cuantitativos, cualitativos, espaciales y multicriterio para evaluar el riesgo de deslizamientos de taludes en el tramo del cauce del río Monjas comprendido entre las coordenadas (784488.260 m E, 9998156.726 m N) y (787220.207 m E, 10002709.527 m N).

El proceso metodológico se desarrolló en cuatro fases principales, integrando herramientas de análisis geoespacial (QGIS) y el método Analytic Hierarchy Process (AHP) a través de hojas de cálculo, complementado con verificación de campo para validar los resultados obtenidos y compararlos con registros históricos de deslizamientos.

4.1.1. Fase 1. Definición del enfoque metodológico y recopilación de información

En esta fase se estableció el enfoque general del estudio, orientado a evaluar el riesgo de deslizamiento de taludes mediante el análisis de variables físicas, geotécnicas, hidrológicas y sociales.

Se recopiló información proveniente de fuentes oficiales y estudios técnicos, entre ellos:

- *Diagnóstico de la situación de riesgo en la cuenca del río Monjas* (MDMQ, 2019).
- *Consultoría para la elaboración del plan de gestión integral de riesgos de la cuenca del río Monjas, I Fase* (SGSG, 2016).
- Normas Ecuatorianas de la Construcción (NEC-SE-CG y NEC-SE-DS) para determinar cargas estructurales.
- Mapas geológicos y topográficos del Instituto Geográfico Militar (IGM).
- Datos de campo obtenidos en visitas de verificación y observación directa de los taludes.

Estas fuentes se analizaron para definir la disponibilidad y calidad de los datos requeridos para cada variable de análisis.

4.1.2. Fase 2. Identificación, delimitación y procesamiento de variables

A partir de la información recopilada, se seleccionaron y delimitaron diez variables principales agrupadas en cuatro categorías:

- Variables geomorfológicas: altura del talud, pendiente, longitud del talud y litología.
- Variables hidrológicas: distancia río–base del talud y caudal del río.
- Variables estructurales y antrópicas: carga de la infraestructura y distancia del elemento posiblemente afectado hasta la cresta del talud.
- Variables socio territoriales: número de elementos posiblemente afectados y área de protección ecológica dentro del predio.

El procesamiento espacial se realizó en QGIS 3.40.11, donde se digitalizaron los taludes con polígonos de influencia y se hizo un análisis de distancias, pendientes y relaciones espaciales entre capas.

Así, se obtuvo una base de datos georreferenciada con el valor cuantitativo de cada variable para cada talud identificado en el tramo de estudio.

4.1.3. Fase 3. Aplicación del método Analytic Hierarchy Process (AHP)

Esta fase tuvo como objetivo determinar la ponderación de las variables mediante el método AHP, desarrollado por Saaty (1990).

El proceso se ejecutó en los siguientes pasos:

- Construcción de la jerarquía de análisis, definiendo el objetivo principal (evaluar el nivel de riesgo de los taludes), los criterios (las 10 variables) y las alternativas (los taludes del tramo).
- Elaboración de matrices de comparación por pares para cada grupo de variables, empleando la escala de Saaty (1–9), de acuerdo con la importancia relativa asignada por los grupos de análisis.
- Verificación del índice de consistencia (CR), asegurando que todas las matrices cumplieran con el criterio de coherencia ($CR < 0.1$).
- Integración de pesos finales, obteniendo una matriz general que representa la importancia relativa de cada criterio dentro del modelo de riesgo.

Esta ponderación permitió identificar qué factores tienen mayor influencia en la inestabilidad de los taludes.

4.1.4. Fase 4. Categorización, análisis espacial y validación de resultados

Con los pesos obtenidos a partir del método AHP, se procedió a la categorización de las variables según rangos de criticidad de 1 a 5, donde 1 representa una condición favorable y 5 una condición crítica.

Cada variable fue evaluada individualmente para cada talud, asignándole una calificación conforme a los intervalos definidos en el proceso de categorización.

Posteriormente, se calculó el valor final del riesgo mediante hojas de cálculo en Microsoft Excel, aplicando la ecuación general de riesgo ponderado:

$$R = \sum(W_i * V_i) \quad (17)$$

Donde,

W_i = peso obtenido por el método AHP para la variable i , y

V_i = valor categorizado asignado a la variable i para cada talud.

De esta manera, se obtuvo el índice de riesgo total para cada uno de los taludes del tramo analizado. Los valores resultantes fueron posteriormente clasificados en cinco categorías de riesgo (muy bajo, bajo, medio, alto y muy alto), lo que permitió identificar el talud con mayor riesgo de deslizamiento dentro del tramo de estudio.

Finalmente, los resultados obtenidos fueron contrastados mediante observaciones de campo, verificando la correspondencia entre los valores calculados y las condiciones físicas observadas, tales como signos de erosión, inestabilidad, presencia de grietas o afectación de infraestructuras cercanas.

4.2. Identificación y Descripción de Variables del Análisis Multicriterio

A continuación, se presentó la Tabla 4, en la que se unifican las variables estudiadas, sus indicadores, unidades de medida y las fuentes de información utilizadas. Estos parámetros fueron definidos como los criterios más relevantes y de más fácil cuantificación, a partir de una discusión técnica con el tutor del trabajo de integración curricular.

Tabla 4*Variables consideradas para estimar el riesgo de un talud al movimiento de masas*

Variable	Indicadores	Unidades	Fuente
Número de elementos posiblemente afectados	Número de infraestructuras, vías, puentes, áreas verdes y parqueaderos ubicadas en el área de influencia del talud	#	Google Open Buildings y Google Earth Pro.
Distancia del elemento posiblemente afectado hasta la cresta del talud	Medición espacial desde la infraestructura hasta la cresta del talud	m	Google Earth Pro – QGIS.
Carga de la infraestructura en cresta del talud	Peso total de las edificaciones	Ton	Visor Geográfico del Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias (SNGRE).
Altura del talud	Diferencia altimétrica entre cresta y base	m	Google Earth Pro y QGIS
Pendiente del talud	Ángulo de inclinación calculado entre base y cresta	°	Google Earth Pro y QGIS.
Litología (SUCS + geología local)	Clasificación de suelos según SUCS y descripción geológica local	SUCS / descripción	Literatura Bibliográfica y muestreo.

Distancia río a la base del talud	Medición espacial entre la línea de base del talud y el cauce activo del río	m	Google Earth Pro y QGIS.
Caudal del río	Caudal promedio estimado con base en caudales de cuencas del sector	m ³ /s	Literatura Bibliográfica y curva de regresión.
Longitud del talud	Extensión lineal del talud paralela al cauce	m	Google Earth Pro y QGIS.
Área de protección ecológica dentro del predio	Área del predio inutilizable comprendida entre la cresta del talud y el río	m ²	Catastro Municipal, Google Earth Pro y QGIS.

Nota. Se presentan las 10 variables consideradas para la obtención del índice de riesgo al deslizamiento de un talud, además sus indicadores, unidad de medida y fuente de obtención. Elaboración de los autores del presente estudio.

4.3. Categorización de Variables

A continuación, se presentan las tablas elaboradas por el equipo para la categorización de las medidas de las diferentes variables. En cada apartado se expone la justificación empleada para la definición de los rangos establecidos. Cabe señalar que, con el fin de realizar una valoración adecuada, la determinación de dichos rangos no se basó únicamente en las mediciones del área de estudio descrita, sino que también se consideraron los valores correspondientes al resto de la longitud del río definida en la Sección 3.1. Finalmente, para hacer posible el cruce de datos en el modelo AHP, todas las variables fueron homogeneizadas a una escala de cinco niveles. Esta escala refleja el grado de peligrosidad, desde muy bajo hasta muy alto, con el que cada factor aporta a la inestabilidad del talud.

4.3.1. Número de Elementos Posiblemente Afectados

Tabla 5

Exposición del talud en función del número de elementos posiblemente afectados

Variable	Unidad	Categorías	Peligro	Valor
1. Número de elementos posiblemente afectados	#	$x < 25$	Muy bajo	1
		$25 \leq x < 48$	Bajo	2
		$48 \leq x < 80$	Medio	3
		$80 \leq x \leq 120$	Alto	4
		$x > 150$	Muy alta	5

Nota. Elaboración propia.

De acuerdo con Highland y Bobrowsky (2008), en el *Manual de deslizamientos de tierra* del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), no se establece un umbral específico de viviendas afectadas para determinar cuándo un evento puede considerarse un desastre. No obstante, el documento describe los impactos que estos fenómenos pueden generar en el entorno construido, destacando que pueden ocasionar pérdidas económicas de miles de millones de dólares y provocar la muerte o lesiones de miles de personas cada año. Como referencia, presenta el caso de Mameyes, Puerto Rico, en 1985, considerado un deslizamiento devastador, en el que se destruyeron 120 viviendas. De esta manera, se establecieron rangos simétricamente espaciados, tomando en cuenta este número como el estado más crítico, ya que podría dejar de ser un problema local y pasar a un problema provincial.

4.3.2. Distancia del Elemento Posiblemente Afectado Hasta la Cresta del Talud

Tabla 6

Exposición del talud en función de la distancia del elemento posiblemente afectado hasta su cresta

Variable	Unidad	Categorías	Peligro	Valor
2. Distancia del elemento posiblemente afectado hasta la cresta del talud	m	$x > 150$	Muy bajo	1
		$50 \leq x \leq 150$	Bajo	2
		$15 \leq x < 50$	Medio	3
		$5 \leq x < 15$	Alto	4
		$x < 5$	Muy alto	5

Nota. Elaboración propia.

Los rangos presentados en la tabla fueron elaborados como una adaptación específica a las necesidades del presente estudio, estructurándolos en cinco niveles de análisis. Para su definición, se tomó como referencia el Cuadro 1, “Análisis y evaluación del riesgo”, del Informe Final: Diagnóstico de la Situación de Riesgo en la Cuenca del Río Monjas del MDMQ. En dicho documento, la vulnerabilidad física frente a fenómenos de remoción en masa, determinada por la distancia de las infraestructuras respecto al borde superior del talud, se clasifica como baja cuando es mayor a 50 m; media entre 20 y 50 m; alta entre 10 y 20 m; y muy alta cuando es inferior a 10 m (MDMQ, 2019).

4.3.3. Carga de la Infraestructura en Cresta del Talud

Tabla 7

Factor detonante en función de la carga en su cresta

Variable	Unidad	Categorías	Peligro	Valor
3. Carga de la infraestructura en cresta del talud	Ton	$x < 5000$	Muy bajo	1
		$5000 \leq x < 12000$	Bajo	2
		$12000 \leq x < 20000$	Medio	3
		$20000 \leq x \leq 30000$	Alto	4
		$x > 30000$	Muy alto	5

Nota. Elaboración propia.

Al no encontrarse una referencia específica para esta variable, en primer lugar, se procedió a medir para cada talud de manera individual (véase Sección 4.4.1.3). Una vez obtenidos estos datos, se definieron rangos de clasificación que permitieran abarcar el conjunto de valores registrados y, al mismo tiempo, generar una adecuada diferenciación en las puntuaciones asignadas.

4.3.4. Altura del Talud

Tabla 8

Susceptibilidad del talud en función de su altura

Variable	Unidad	Categorías	Peligro	Valor
4. Altura del talud	m	$x < 15$	Muy bajo	1
		$15 \leq x < 30$	Bajo	2
		$30 \leq x < 70$	Moderado	3
		$70 \leq x \leq 120$	Alto	4
		$x > 120$	Muy alto	5

Nota. Elaboración propia.

Para la elaboración de esta tabla se tomó como referencia el estudio de Shiferaw (2021), quien evidenció una relación inversamente proporcional entre la altura del talud y su factor de seguridad. Dicho resultado indica que, a medida que la altura del talud aumenta, el nivel de riesgo de falla también se incrementa; no obstante, la relación entre ambos parámetros presenta un comportamiento parabólico y no lineal a medida que la altura disminuye.

Por otro lado, no se encontraron estudios que propongan una clasificación adaptada a los amplios rangos de altura observados en el área de estudio. Por tal motivo, se procedió inicialmente a determinar la altura de todos los taludes presentes en el tramo analizado y, con base en dichos valores, se establecieron intervalos simétricos para su clasificación, conforme a los rangos presentados en la Tabla 8.

4.3.5. Pendiente del Talud

Tabla 9

Susceptibilidad del talud en función de la pendiente

Variable	Unidad	Categorías	Peligro	Valor
5. Pendiente del talud	°	$x < 10$	Muy bajo	1
		$10 \leq x < 20$	Bajo	2
		$20 \leq x < 30$	Medio	3
		$30 \leq x \leq 45$	Alto	4
		$x > 45$	Muy alto	5

Nota. Elaboración propia.

La construcción de los rangos presentados en esta tabla se realizó como una adaptación de la propuesta elaborada por el CENEPRED (2014, p. 71), en la cual se establece una relación entre la pendiente y el desplazamiento de masa. Según dicho estudio, los intervalos de 30° a

40° representan las condiciones de mayor peligro, seguidos por los rangos de 20° a 45°, 20° a 30°, 10° a 20°, mientras que las pendientes inferiores a 5° se consideran de menor peligrosidad. De manera similar, Fierro León (2023) clasifica las pendientes mayores a 45° como de peligro muy alto, las comprendidas entre 25° y 45° como de peligro alto, las de 5° a 25° como de peligro medio, y aquellas menores a 5° como de peligro bajo.

4.3.6. Litología

Tabla 10

Susceptibilidad del talud en función de su litología

Variable	Unidad	Categorías	Peligro	Valor
6. Litología (SUCS + geología local)	SUCS	Arenas (SW, SP), Gravas (GW, GP)	Muy Bajo	1
		Arenas con finos (SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC y SC-SM) y Gravas con finos (GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC y GC-GM)	Bajo	2
		Limo de baja plasticidad (ML), Limos de alta plasticidad (MH).	Media	3
		Arcillas de alta plasticidad (CH), Arcilla de baja plasticidad (CL), y Arcillo Limosa (CL-ML).	Alto	4
		Materia orgánica (PT, OL y OH).	Muy Alto	5

Nota. Elaboración propia.

Basado en el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) y la norma ASTM D2487, en el presente estudio se priorizó la permeabilidad.

La permeabilidad se define como un parámetro crítico en este análisis, ya que gobierna la respuesta hidromecánica del talud frente a sollicitaciones rápidas, como crecidas de río o fuertes precipitaciones. La magnitud de este coeficiente determina si el material tiene la capacidad de disipar el exceso de presión de poros generado (condición drenada) o si, por el contrario, el agua queda confinada (condición no drenada).

La relevancia de este mecanismo radica en el principio de esfuerzos efectivos descrito por Terzaghi et al. (1996): al impedirse el drenaje, el incremento de la presión de poros (u) reduce proporcionalmente el esfuerzo efectivo (σ') que confina las partículas del suelo. Dado que la resistencia al corte es directamente proporcional al esfuerzo efectivo (Ecuación 2), la baja permeabilidad actúa como factor clave para la inestabilidad, facilitando la falla del talud.

En consecuencia, la clasificación adoptada se rigió principalmente por los criterios de la Tabla 11. No obstante, se identificó que dicha tabla carece de una distinción explícita entre el comportamiento hidráulico del limo y la arcilla. Si bien se podría inferir cualitativamente que la presencia de limos aumenta la permeabilidad, fue necesario recurrir a la Tabla 2.1 de Cedergren (1989) para establecer una diferenciación cuantitativa clara. Según este autor, el contraste es evidente: el limo presenta un coeficiente de permeabilidad (k) de 0.001 ft/day, mientras que la arcilla posee una permeabilidad significativamente menor, de 0.00001 ft/day.

Tabla 11:

Conductividad hidráulica de suelos saturados

Soil Type	k	
	cm/sec	ft/min
Clean gravel	100-1.0	200-2.0
Coarse sand	1.0-0.01	2.0-0.02
Fine Sand	0.01-0.001	0.02-0.002
Silty clay	0.001-0.00001	0.002-0.00002
Clay	<0.000001	<0.000002

Nota. Tomado de *Principles of Geotechnical Engineering* (Tabla 7.1), por B. M. Das.

Por otro lado, a continuación, se presentan otros parámetros útiles que permiten entender la categorización establecida:

Los materiales granulares gruesos (SW, SP, GW, GP) se ubicaron en la categoría de menor peligrosidad, ya que presentan una mayor estabilidad asociada a su elevada capacidad de drenaje, la cual favorece la disipación de las presiones de poro. Según Das (2010), la permeabilidad de este tipo de suelos suele encontrarse en el rango de 100-1 cm/s, lo que permite un drenaje prácticamente libre e inmediato, en contraste marcado con los suelos finos, donde el agua tiende a permanecer retenida. Adicionalmente, su resistencia al corte se encuentra controlada principalmente por la fricción intergranular, la cual se mantiene relativamente constante incluso bajo condiciones de saturación, salvo en situaciones de socavación directa en el pie del talud (Terzaghi et al., 1996).

Las arenas con finos (SM, SC) y mezclas duales se ubicaron en un nivel de peligrosidad superior. Tal como señalan Terzaghi et al. (1996), aunque la fracción arenosa aporta resistencia por fricción, incluso una pequeña proporción de finos puede reducir de manera significativa la permeabilidad del suelo, incrementando el tiempo necesario para la disipación de las presiones de poro. En consecuencia, aumenta la vulnerabilidad frente a procesos como la erosión interna o tubificación, en los cuales el flujo de agua moviliza las partículas finas a través de los vacíos de la arena, generando conductos que debilitan la estructura interna del talud, especialmente en zonas próximas a la ribera.

Los limos (ML, MH) son suelos de grano fino que representan un nivel de riesgo intermedio, pero de comportamiento complejo. Debido a su baja permeabilidad y naturaleza fina, su respuesta en términos de resistencia al corte resulta más difícil de predecir, especialmente bajo condiciones de carga rápida, en comparación con los suelos granulares como arenas y gravas (Holtz y Kovacs, 1981). Además, cuando se encuentran sueltos y saturados, y/o están sometidos a vibraciones o a variaciones rápidas en las cargas hidráulicas,

son altamente susceptibles a procesos de licuefacción estática o cíclica (Terzaghi et al., 1996). Por otro lado, los limos de alta plasticidad (MH) son prácticamente impermeables, debido a que su LL es superior y les permite absorber mayor humedad (Holtz y Kovacs, 1981). Esto causa que las fallas ocurran mucho tiempo después de la construcción (años), debido a la muy lenta disipación de las presiones de poro o al hinchamiento gradual.

Las arcillas, en particular aquellas de alta plasticidad (CH), representan uno de los escenarios más críticos en taludes ribereños debido al fenómeno de desembalse rápido. Como consecuencia de su muy baja permeabilidad, cuando el nivel del río desciende de forma abrupta, el agua permanece atrapada dentro del talud, generando presiones de poro residuales elevadas en ausencia de la contrapresión externa del agua. Esto reduce de manera significativa el esfuerzo efectivo y favorece la ocurrencia de fallas rotacionales. Asimismo, tanto las arcillas de alta plasticidad (CH) como las de baja plasticidad (CL) presentan potencial para fenómenos de hinchamiento (swelling), fluencia (creep) y ablandamiento por deformación (strain softening) (Terzaghi et al., 1996; Das, 2010), lo que hace que sus propiedades resistentes sean complejas y se modifiquen con el tiempo.

Finalmente, los suelos orgánicos y las turbas se ubicaron en la categoría de mayor peligrosidad, ya que se consideran materiales incompetentes para la estabilidad de taludes. Su estructura fibrosa y altamente porosa les permite absorber grandes cantidades de agua, generando un estado de saturación prácticamente permanente y un incremento significativo del peso actuante sobre la ladera (Terzaghi et al., 1996). Además, presentan una resistencia al corte poco confiable (con cohesión y fricción prácticamente nulas) y experimentan grandes deformaciones o asentamientos, lo que puede desencadenar fallas ante perturbaciones relativamente pequeñas en las condiciones del cauce.

4.3.7. Distancia del Río a la Base del Talud

Tabla 12

Exposición del talud en función de la distancia río a su base

Variable	Unidad	Categorías	Peligro	Valor
7. Distancia del río a la base del talud	m	> 50	Muy Bajo	1
		$30 \leq x < 50$	Bajo	2
		$15 \leq x < 30$	Medio	3
		$5 \leq x < 15$	Alto	4
		< 5	Muy alto	5

Nota. Elaboración propia.

Para la categorización de esta variable se consideraron, en primer lugar, los hallazgos de Zhou et al. (2022), quienes señalan que aquellos taludes cuyas bases se encuentran a menos de 400 m de distancia respecto al cauce presentan una mayor susceptibilidad al deslizamiento de masas. Esto se debe a que los taludes más próximos al río experimentan una erosión lateral más intensa en su base, lo que modifica su geometría y altera la distribución de esfuerzos internos, incrementando la probabilidad de falla.

Por otra parte, en la evaluación de riesgos del río Monjas se determinó que la franja de 50 m desde el borde del talud constituye la zona de mayor exposición a la erosión lateral regresiva, donde la inestabilidad está directamente controlada por la dinámica hidráulica del cauce (MDMQ, 2019). Asimismo, las normativas de ordenamiento territorial, como la Ordenanza 0255 de Quito, establecen zonas de exclusión de entre 5 y 10 m en el coronamiento de taludes, reconociendo que dicha distancia corresponde al mínimo requerido para amortiguar el retroceso progresivo del talud por efecto de la erosión natural (Concejo Metropolitano de Quito, 2021).

Tomando en cuenta estas consideraciones y, tras realizar las mediciones correspondientes (sección 4.4.1.7 y la Tabla A1 del Anexo A), los rangos fueron ajustados a la realidad del caso de estudio, procurando una adecuada dispersión de los datos dentro de las categorías definidas en la Tabla 12.

4.3.8. Caudal del Río

Tabla 13

Factor detonante en función del caudal del río

Variable	Unidad	Categorías	Peligro	Valor
8. Caudal del río	m ³ /s	$x < 130$	Muy bajo	1
		$130 \leq x < 160$	Bajo	2
		$160 \leq x < 200$	Medio	3
		$200 \leq x \leq 235$	Alto	4
		$x > 235$	Muy alto	5

Nota. Elaboración propia.

Los rangos fueron establecidos de manera arbitraria, procurando una distribución que permitiera clasificar adecuadamente los valores de caudal obtenidos a lo largo de todo el cauce del río (sección 4.4.1.8 y la Tabla A1 del Anexo A). Además, se consideró que un mayor caudal implica un grado erosivo más elevado.

4.3.9. Longitud del Talud

Tabla 14

Suceptibilidad del talud en función de su longitud

Variable	Unidad	Categorías	Peligro	Valor
9. Longitud del talud	m	$x < 60$	Muy bajo	1
		$60 \leq x < 95$	Bajo	2
		$95 \leq x < 130$	Medio	3
		$130 \leq x \leq 165$	Alto	4
		$x > 165$	Muy alto	5

Nota. Elaboración propia.

Estos rangos fueron definidos de manera que permitieran una adecuada distribución de clases en función de los valores obtenidos al medir las longitudes de las crestas correspondientes a los diferentes taludes analizados. Esto se hizo con el objetivo de establecer una clasificación coherente para la evaluación comparativa de esta variable. En este caso se consideró que una mayor longitud corresponde a una mayor cantidad de infraestructuras afectadas.

4.3.10. Área de Protección Ecológica Dentro del Predio

Tabla 15

Exposición del talud en función de su área de protección ecológica dentro del predio

Variable	Unidad	Categorías	Peligro	Valor
10. Área de protección ecológica dentro del predio	m ²	< 1000	Muy bajo	1
		1000 ≤ x < 5000	Bajo	2
		5000 ≤ x < 15000	Medio	3
		15000 ≤ x ≤ 30000	Alto	4
		> 30000	Muy alto	5

Nota. Elaboración propia.

Estos rangos fueron definidos de manera que permitieran una adecuada distribución de clases en función de los valores obtenidos al medir las longitudes de las crestas correspondientes a los diferentes taludes analizados (Sección 4.4.1.9 y la Tabla A1 del Anexo A). Esto se realizó con el objetivo de establecer una clasificación coherente para la evaluación comparativa de esta variable. En este caso se consideró que una mayor longitud corresponde a una mayor cantidad de infraestructuras afectadas.

4.4. Herramientas SIG

Los SIG, o Sistemas de Información Geográfica, son la base tecnológica esencial para combinar y procesar los datos multidisciplinarios necesarios en el estudio de la estabilidad de taludes. Estas herramientas permiten la creación de bases de datos geoespaciales complejas (Geodatabases) que integran, en un solo sistema de referencia espacial, variables diversas como la geomorfología, la hidrología, la geología y los datos catastrales con el fin de detectar áreas de peligro y susceptibilidad. Esto posibilita la producción de mapas temáticos (de pendientes, isoyetas y uso del suelo), los cuales son insumos fundamentales para realizar modelaciones hidráulicas y geotécnicas (MDMQ, 2019).

4.4.1. Obtención y Procesamiento de Datos en QGIS

Específicamente, el software QGIS funciona como un motor de cálculo espacial perfecto para la obtención de medidas cuantitativas de las 10 variables estudiadas, que permiten la realización del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP). Esta herramienta facilita la ejecución de procesos complejos de "álgebra de mapas" y rasterización, procedimientos que son esenciales para calcular matemáticamente los factores que determinan la inestabilidad, tales como la litología, la pendiente y la distancia al río, entre otros (Cargua et al., 2024). Estos factores se supusieron conforme a los pesos definidos en la matriz de decisión. QGIS también permite agregar datos topográficos de alta resolución que se adquieren a través de fotogrametría con drones, así como la delimitación exacta de las zonas de riesgo y las franjas de áreas afectadas.

A continuación, se va a presentó una breve descripción de la obtención o medición de las diferentes variables. Además, cada uno de los resultados obtenidos por talud o sistema de talud se pueden ver reflejados en la tabla resumen del Anexo A, en la Tabla A1.

4.4.1.1. Número de Elementos Posiblemente Afectados

En primer lugar, se procedió a la digitalización de polígonos que representan las principales coberturas e infraestructuras del área de estudio, tales como el sistema vial, las áreas verdes pertenecientes a conjuntos residenciales (incluyendo parques públicos), las edificaciones y las zonas de estacionamiento (Figura 15).

La huella de las edificaciones se obtuvo en formato *shapefile* a partir del proyecto "Open Buildings", el cual genera polígonos de edificaciones con base en imágenes satelitales de alta resolución. Este proyecto tiene su sede en la oficina de Google en Ghana y se enfoca principalmente en el continente africano y, en general, en el Sur Global (Google Research,

s.f.). Mientras que el trazado de las carreteras, parques y estacionamientos fue realizado manualmente tomando como base imágenes satelitales.

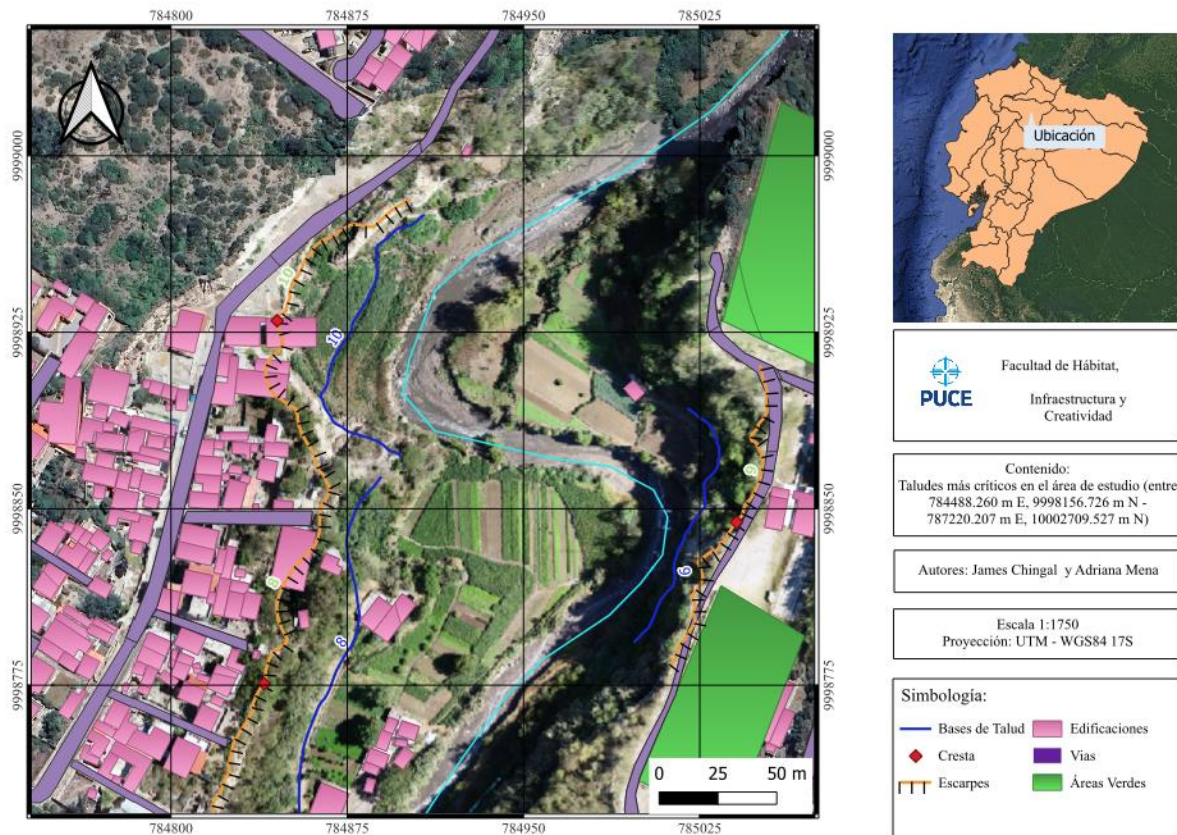
Posteriormente, dichas entidades fueron intersecadas con un buffer circular de 150 m de radio, generado a partir del eje central de la cresta del talud, con el propósito de delimitar la zona de influencia directa de las infraestructuras sobre la estabilidad de este.

Dicho criterio se definió a partir de una discusión grupal con el tutor académico y compañeros de nivel académico con temas de estudios similares; esta misma zona de influencia se consideró en próximos cálculos.

Para cada talud se cuantificaron las áreas correspondientes a cada tipo de cobertura. En el caso de sistemas de taludes compuestos o escalonados, se estimó el valor promedio de las mediciones obtenidas en cada cresta. Finalmente, la clasificación de los resultados se realizó de acuerdo con los rangos y criterios establecidos en la Tabla 5, los cuales permiten interpretar el grado de intervención antrópica en el entorno inmediato del talud.

Figura 15

Obtención del número de elementos posiblemente afectados



Nota. Elaboración de los autores del presente estudio.

4.4.1.2. Distancia del Elemento Posiblemente Afectado Hasta la Cresta del Talud

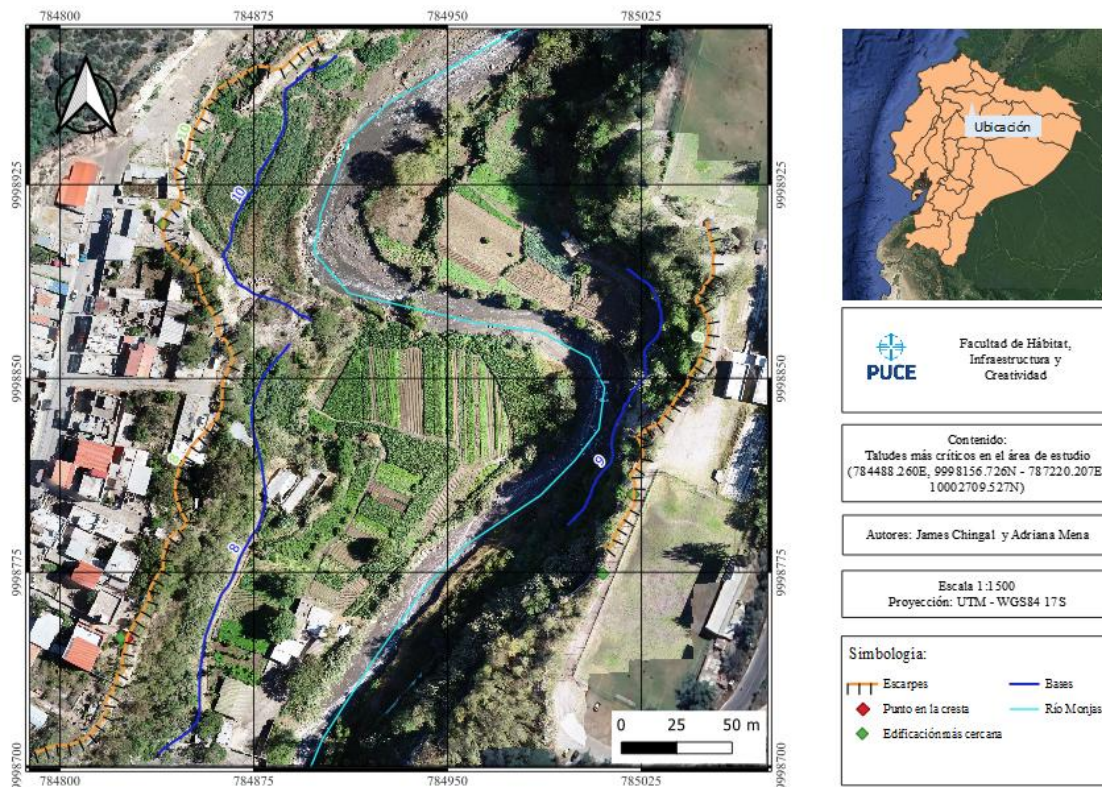
Para la obtención de esta variable se determinó la longitud tridimensional empleando las herramientas de medición geométrica disponibles en el software QGIS. En este procedimiento se midió la distancia más corta entre la infraestructura (descrita previamente en el apartado 4.4.1.1) y la cresta del talud, considerando la topografía del terreno en el modelo digital de elevación.

Las mediciones se efectuaron con el objetivo de cuantificar la proximidad física de las estructuras potencialmente vulnerables respecto al borde superior del talud, lo que permite

evaluar su nivel de exposición ante posibles procesos de inestabilidad. Finalmente, los valores obtenidos fueron clasificados conforme a los rangos y criterios establecidos en la Tabla 6.

Figura 16

Obtención de la distancia del elemento más vulnerable a la cresta del talud



Nota. Elaboración de los autores del presente estudio.

4.4.1.3. Carga de la Infraestructura en Cresta del Talud

Para obtener esta variable, primero se debe aclarar que se consideraron únicamente las cargas de edificaciones que se encuentran sobre la cresta del talud. Por este motivo, el archivo de polígonos difiere del descrito anteriormente; para ajustar la información, se delimitó un área que comprende únicamente la cresta de cada talud y se intersecó con la capa de edificaciones previa (Figura 17). Por otro lado, dado que la mayoría de estas estructuras son

viviendas, se procedió al cálculo de la carga asumiendo que la totalidad de las construcciones identificadas pertenecen a la categoría residencial.

Con el fin de abordar el problema derivado de la presencia de edificaciones de diferentes alturas, se optó por seleccionar una muestra representativa del conjunto de viviendas ubicadas a lo largo del río. Para ello, se aplicó la teoría de cálculo del tamaño de muestra para una población finita (véase Sección 2.6). Considerando una población (N) de 9 392 infraestructuras, un valor de 1,96 asociado a una distribución normal estándar (95 % de confianza Z), un margen de error tolerado (e) de 0,05 y una proporción esperada de éxito (p) de 0,5, se determinó que el tamaño de la muestra requerido (n) es de 369 viviendas.

Para la selección de las edificaciones se utilizaron las herramientas de QGIS, mediante las cuales se generó una muestra aleatoria de viviendas. El número de pisos de cada una de estas edificaciones se obtuvo al contrastar la imagen de la vivienda con la información provista del GeoVisor Catastral del DMQ. A partir de este análisis se determinó que, en la zona de estudio, aproximadamente el 1 % de las viviendas corresponde a casas de un nivel, el 86 % a viviendas de dos niveles y el 13 % a edificaciones de tres niveles.

Después, fue necesario estimar la carga correspondiente a una edificación tipo representativa del área de estudio. Para ello, se generalizaron las dimensiones de los elementos estructurales a partir de las observaciones realizadas en campo y utilizando los pesos específicos establecidos en la NEC-SE-CG.

Para el cálculo del peso por unidad de área de las vigas, se propuso una sección transversal típica y se determinó el volumen por metro cuadrado, asumiendo una disposición estándar de vigas secundarias y primarias (Tabla 16). En el caso de las columnas, se estimó un número representativo de elementos y sus dimensiones dentro de una losa determinada (Tabla 17), y se aplicó posteriormente la Ecuación 18 para obtener el peso por unidad de área.

$$D_c = \frac{n_c \cdot \gamma \cdot V}{A_p} \quad (18)$$

Donde,

- n_c , número de niveles.
- γ , peso específico del hormigón armado
- V , volumen de la columna.
- A_p , área del nivel.

Para las losas, se realizó la estimación de las dimensiones de una losa alivianada mediante bóvedas prefabricadas de hormigón (Tabla 18), a partir de la cual, mediante cálculos simples, se determinó el peso por metro cuadrado correspondiente.

Tabla 16

Estimación del peso por unidad de área de vigas

Elemento	Área (m ²)	Longitud (m/m ²)	Volumen (m ³ /m ²)	Peso Específico (kn/m ³)	Peso Específico (Ton/m ³)	Carga (Ton/m ²)
Viga: 0,2 x 0,4	0,08	1,2	0,096	24	2,447	0,235
Viga: 0,2 x 0,2	0,04	1,33	0,0532	24	2,447	0,130
Vigas Total					0,3651413376	

Nota. Los cálculos de carga muerta se basan en los valores de peso unitario para hormigón armado obtenidos de *NEC-SE-CG* (Tabla 8), por el Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda [MIDUVI], 2014. Elaboración de los autores.

Tabla 17*Estimación del peso por unidad de área de columnas*

Elemento	Volumen (m3)	Cantidad	Área/m ²	Peso Específico (kN/m3)	Peso Específico (Ton/m3)	Carga (Ton/m2)
40x30	0,35	9	94,711	24	2,447	0,0816
15x15	0,056	4	94,711	24	2,447	0,00581
Columnas Total						0,08720

Nota. Los cálculos de carga muerta se basan en los valores de peso unitario para hormigón armado obtenidos de *NEC-SE-CG* (Tabla 8), por MIDUVI, 2014. Elaboración de los autores.

Tabla 18*Estimación del peso por unidad de área de losas*

Elemento	Volumen (m3/u)	Cantidad por m ²	Volumen (m3/m2)	Peso Específico (kN/m3)	Peso Específico (Ton/m3)	Carga (Ton/m2)
Losa (1x1x0,18)	0,18	1	0,1176	24	2,447	0,2878
Bovedilla (0,2x0,6x0,13)	0,0156	4	0,0192	8,5	0,8668	0,01664
Vacío (0,18x0,1x0,2)	0,0036	12	0,0432			

Nota. Los cálculos de carga muerta se basan en los valores de peso unitario para hormigón armado obtenidos de *NEC-SE-CG* (Tabla 8), por MIDUVI, 2014. Elaboración de los autores.

Finalmente, se integraron los cálculos del peso propio de las estructuras y se adicionó la carga viva para uso residencial estipulada en la NEC-SE-CG. Posteriormente, se aplicaron las combinaciones de carga del American Concrete Institute (ACI 318-25), específicamente las de la Tabla 5.3.1 (ACI, 2025). De este conjunto, se seleccionaron las ecuaciones donde las cargas muerta y viva actúan como componentes primarios. Como se detalla en la Tabla 19, se determinó que la carga por unidad de área para una vivienda representativa del área de estudio es de 1,23 T/m², valor obtenido a partir del máximo de las combinaciones evaluadas.

Tabla 19

Estimación de la carga por vivienda en la zona de estudio

CARGAS POR PESO PROPIO DE LA ESTRUCTURA (D)	
Vigas	0,3651 t/m ²
Losas	0,2878 t/m ²
Bovedillas	0,01664 t/m ²
Columnas	0,08721 t/m ²
Total	0,7568 t/m²
CARGA VIVA DE LA ESTRUCTURA (L)	
Viviendas	0,2039 t/m ²
CARGA MAYORADA ESTIMADA	
1,4D	1,05952 t/m ²
1,2D + 1,6CV	1,2345 t/m ²

Nota. Las ecuaciones presentadas son adaptadas de *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-25) and commentary* (Tabla 5.3.1), por el American Concrete Institute, 2025. Elaboración de los autores del estudio.

Para determinar el área acumulada de edificaciones por cada talud (Figura 17), se empleó la calculadora de campos de QGIS sobre el archivo de polígonos generado previamente en el apartado 4.4.1.3. En el caso de sistemas de taludes, se promedió el área edificada obtenida en cada buffer circular, con el fin de obtener un valor representativo único.

Así, para cada talud se usó la siguiente ecuación de cálculo para obtener el valor de la carga de la cresta:

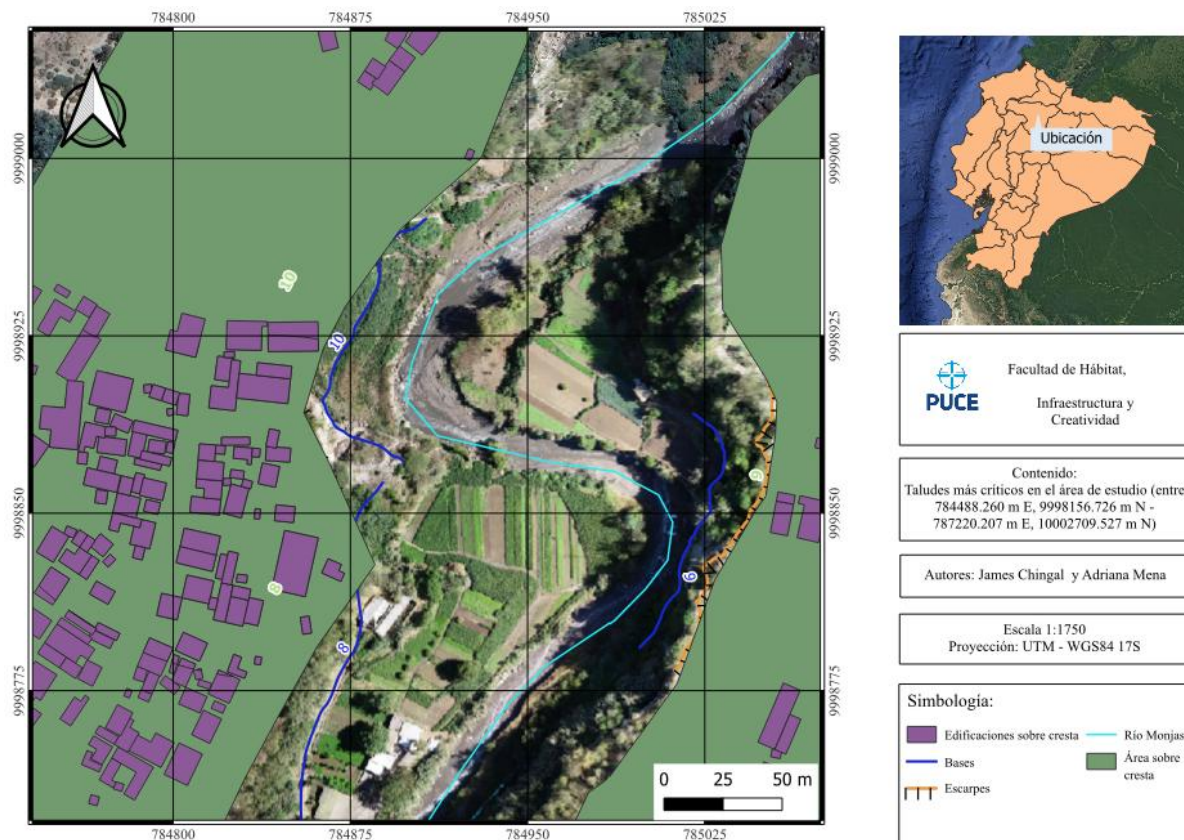
$$x3 = A * 1.23 \frac{Ton}{m^2} * (n1 * \%_1 + n2 * \%_2 + n3 * \%_3) \quad (19)$$

Donde,

- A , es el área acumulada de cada talud.
- n_i , número de niveles.
- $\%_i$, el porcentaje de casas correspondiente al número de niveles.

Figura 17

Obtención de la carga de la infraestructura en la cresta del talud



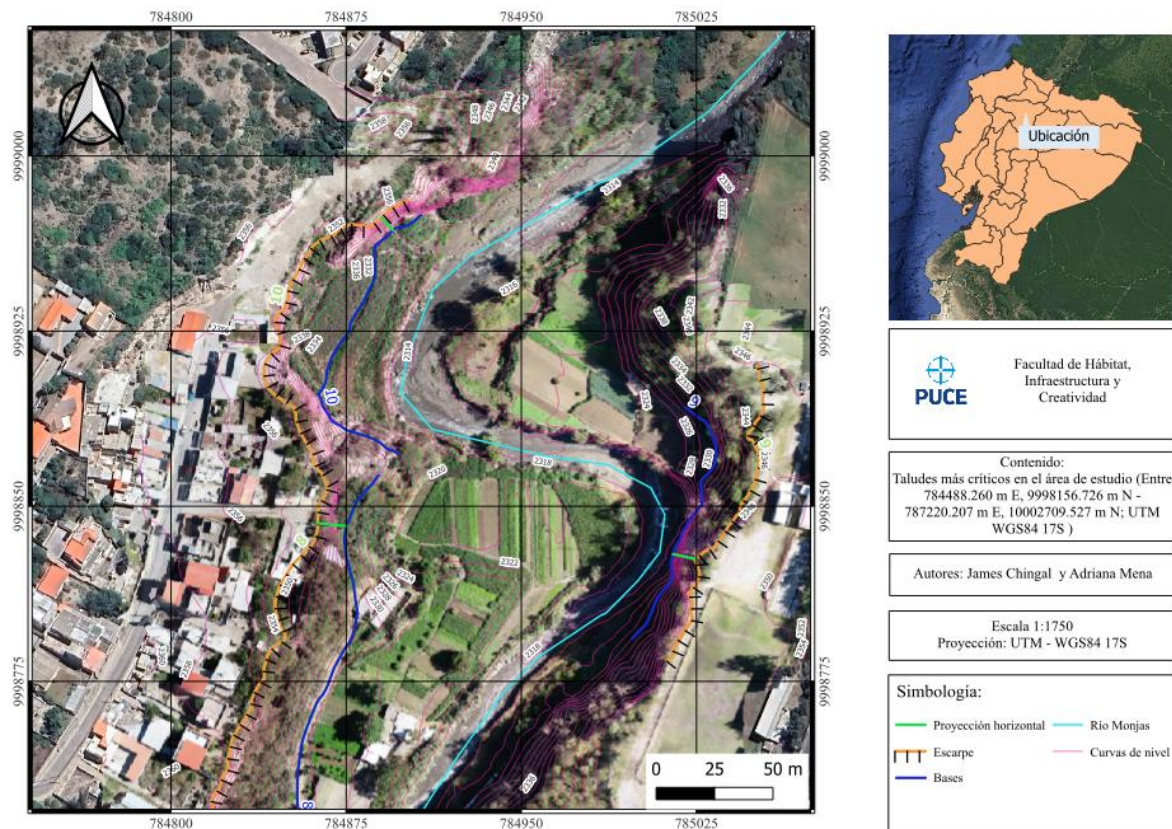
Nota. Elaboración de los autores.

4.4.1.4. Altura del Talud

Para la determinación de la altura, se analizó individualmente cada talud del área de estudio. Una vez delimitadas las líneas correspondientes a la cresta y a la base de cada talud, se procedió a calcular la diferencia altitudinal máxima empleando las curvas de nivel obtenidas a partir del Modelo Digital de Elevación (MDE). En este caso se midió la altura de los extremos de una línea trazada entre la cresta y base (proyección horizontal de la de la posible distancia más corta que uniera dichos puntos) como se aprecia en la Figura 18, buscando obtener el mayor valor posible. El valor resultante, representativo de la altura total del talud, fue registrado en la base de datos geográfica y posteriormente clasificado conforme a los rangos establecidos en la Tabla 8.

Figura 18

Obtención de la altura del talud



Nota. Elaboración de los autores.

4.4.1.5. Pendiente del Talud

Para determinar la pendiente de cada talud, se trazó una línea que siguió la misma trayectoria utilizada para la medición de la altura máxima. A partir de dicha línea se obtuvo la longitud horizontal correspondiente, la cual, combinada con la altura previamente determinada, permitió estimar una pendiente representativa mediante el uso de relaciones trigonométricas básicas (Figura 18). Finalmente, los valores calculados fueron clasificados conforme a los rangos establecidos en la Tabla 9, con el propósito de categorizar los taludes según su inclinación característica.

En cuanto a los sistemas de taludes, se realizaron proyecciones horizontales por etapas: la primera desde la base cercana al río hasta la cresta inmediata, y las siguientes tomando cada cresta como base para la proyección hacia el nivel superior. Este procedimiento se repitió sistemáticamente siguiendo los criterios descritos en la sección 4.4.1.4. Finalmente, los resultados obtenidos por cada tramo se integraron mediante un promedio ponderado para obtener un único valor representativo por sistema, el cual fue el utilizado para su categorización.

4.4.1.6. Litología

Para la caracterización del suelo en la zona de estudio se empleó un enfoque integral. Se inició con una revisión de fuentes secundarias, recopilando estudios previos del sector e investigaciones de áreas cercanas para establecer una línea base. Posteriormente, esta información se contrastó con campañas de campo para la recolección de muestras en puntos accesibles, extrayendo sustrato a una profundidad de 0.60 metros. Sobre dichas muestras se ejecutó una identificación manual-visual *in situ*, cuyos resultados fueron validados posteriormente mediante ensayos de laboratorio, siguiendo rigurosamente la normativa detallada en el marco teórico (sección 2.1.7).

Como complemento a los resultados presentados en la sección 3.3.2, se analizaron las columnas estratigráficas del sector de San Antonio obtenidas en investigaciones previas. En primer lugar, Barragán Kondracka y Murillo Gavilánez (2023) proporcionan una columna situada dentro de la zona de estudio (785876.85 m E, 653.23 m N, UTM WGS 84 Z17N), próxima al puente Viejo-Loma Catequilla; en ella se identifica un predominio de arena, limo y limolita (Figura 14). Por otro lado, el estudio de Cedeño Plaza (2022) en la ladera de Rumicucho (786203.00 m E, 1266.00 m N) indica que, entre los taludes 49 y 55, los materiales predominantes son limos arenosos (ML) y, en los extremos, limos arcillosos (CL),

siendo el primero aquel que tiene mayor aparición. Finalmente, Ortega Criollo & Quishpe Coyago (2025) determinaron en el sector de La Pampa que el 90% de los estratos evaluados corresponde a suelos arenosos con presencia de limo (clasificados como SW y SP-SM), mientras que el porcentaje restante corresponde a arena bien gradada (SW).

De acuerdo con Pacheco et al. (2014), la Formación Cangahua es la unidad geológica que cubre la mayor parte de la zona de estudio de San Antonio de Pichincha. Este material se define como una secuencia de volcano-sedimentos re TRABAJADOS de grano fino, compuesta específicamente por un conjunto de arenas y limolitas tobáceas endurecidas (Pacheco, 2013; Pacheco et al., 2014). Esta composición litológica justifica su clasificación y comportamiento como un suelo fino (limo) o granular fino (arena limosa).

En consecuencia, para la primera iteración del análisis (que se detalló en capítulos posteriores), se consideró exclusivamente la información proveniente de fuentes secundarias. Aplicando los criterios de la Tabla 10, se estableció la premisa de asignar una calificación de '2' a todos los escarpes ubicados fuera del rango entre el Talud 49 y el Talud 55, asumiendo una litología de arenas o gravas con finos (SW, SP-SM). En contraste, al tramo específico de los taludes 49 al 55 se le asignó una calificación de '3', dado que, como se expuso anteriormente, los estudios previos identifican en este sector suelos de tipo limo de baja plasticidad (ML).

Posterior para la segunda iteración, se ejecutó una campaña de campo para la extracción de muestras de 2 kg en 16 puntos de acceso seguro, a lo largo de la zona de estudio. El muestreo abarcó crestas, bases y, en algunos casos, tramos intermedios de los taludes. A un subgrupo de 13 muestras se les aplicaron ensayos *in situ* de resistencia en seco, dilatancia y tenacidad, conforme al procedimiento detallado en la sección 2.4.1.3.1.1 (véase registro completo en el Anexo D, Tabla D1). El análisis de resultados reveló que el 92% del

material corresponde a limos de baja plasticidad (ML) cuya textura sugería una cantidad no despreciable de arenas. Únicamente una muestra, cuya tenacidad fue superior, se clasificó como limo de alta plasticidad (MH), manteniendo el contenido arenoso. Estos hallazgos son consistentes con los estudios previos, que también reportan un predominio de materiales tipo ML y SM en el sector.

Finalmente, se contó con la colaboración del laboratorio de materiales de la PUCE. Bajo la guía técnica del personal, el equipo ejecutó el análisis granulométrico por lavado y la determinación de los límites de Atterberg, siguiendo los protocolos descritos en las secciones 2.4.1.3.1.2 y 2.4.1.3.1.3. Los resultados detallados de estas muestras se presentan en el Anexo E. Adicionalmente, con el fin de validar la precisión de los datos, se envió una orden de trabajo al mismo laboratorio certificado para analizar dos muestras estratégicas: una ubicada antes del talud crítico (Base del Talud N.º 7) y otra posterior al mismo (Cresta del Talud N.º 17); dichos informes se adjuntan en el Anexos L y M respectivamente. A partir de los ensayos propios, se procesaron las curvas granulométricas y se calcularon los coeficientes C_c , C_u , así como los límites de consistencia (LL, LP, IP). El análisis indica que el 88% de las muestras corresponden a suelos de grano grueso, predominando la fracción arenosa sobre la grava. Asimismo, se observó un Índice de Plasticidad (IP) entre nulo y 4, lo que caracteriza al suelo como no plástico o de muy baja plasticidad. Con estos resultados, se aplicaron los criterios de las tablas de la norma ASTM D2487-17 para categorizar el suelo según el SUCS. En conclusión, la clasificación final determinó que el 81% de las 16 muestras son arenas limosas (SM), el 13% limos arenosos (ML) y el 6% arenas mal gradadas con limo y grava (SP-SM).

Con base en los resultados expuestos, se procedió a realizar la comparación y clasificación según los parámetros de la Tabla 10. Para ello, se utilizaron principalmente las clasificaciones SUCS obtenidas en laboratorio. No obstante, se aplicaron dos criterios

complementarios: primero, para el tramo comprendido entre los taludes 49 y 55, se integró la información bibliográfica referenciada (suelos ML), asignándoles una categoría de '3'.

Finalmente, para los sectores restantes que no contaban con una descripción específica, se adoptó un valor de '2' (correspondiente a arena con contenido de finos). Esta extrapolación se justifica estadística y geológicamente, dado que este es el perfil de suelo predominante en los hallazgos generales de la zona; tanto conseguido en el laboratorio, campo y documentación.

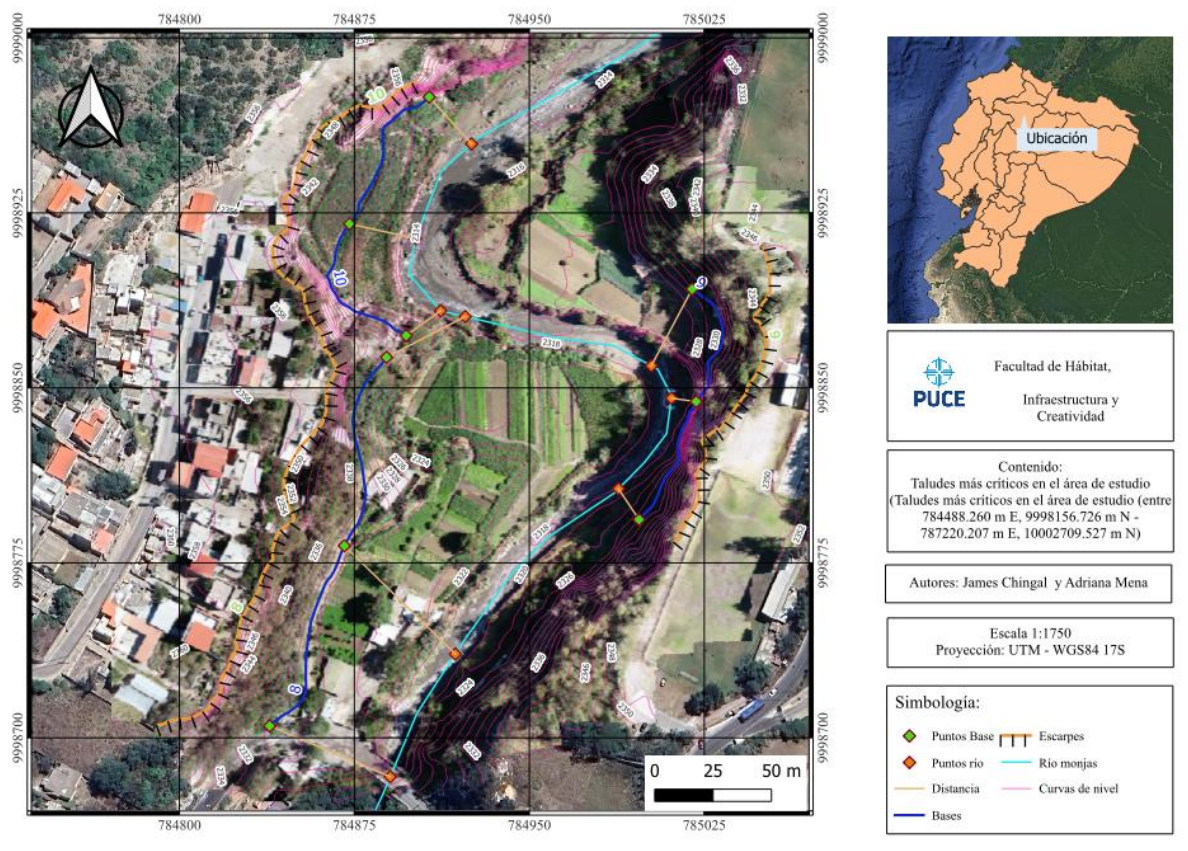
4.4.1.7. Distancia Río a la Base del Talud

Para la obtención de esta variable, se seleccionaron tres puntos representativos a lo largo de la línea de base de cada talud (su centro y dos extremos), los cuales fueron conectados mediante las trayectorias más cortas hacia el cauce del río (Figura 19). Utilizando el Modelo Digital de Elevación (MDE) y/o curvas de nivel, se determinaron las cotas correspondientes a los puntos superior e inferior de cada una de las tres líneas trazadas.

Posteriormente, se calcularon las longitudes de dichas líneas mediante las herramientas de medición disponibles en QGIS. Con los valores de elevación y distancia horizontal obtenidos, se estimó la pendiente y, en consecuencia, la distancia tridimensional de cada línea. Finalmente, se promedió el resultado de las tres mediciones para obtener un único valor representativo por talud analizado; el cual se clasificó según la Tabla 12. Este procesamiento es el mismo para los sistemas de taludes, pues solo se hace el trazado desde la base más cercana al río.

Figura 19

Obtención de la distancia del río a la base del talud



Nota. Elaboración de los autores.

4.4.1.8. Caudal del Río

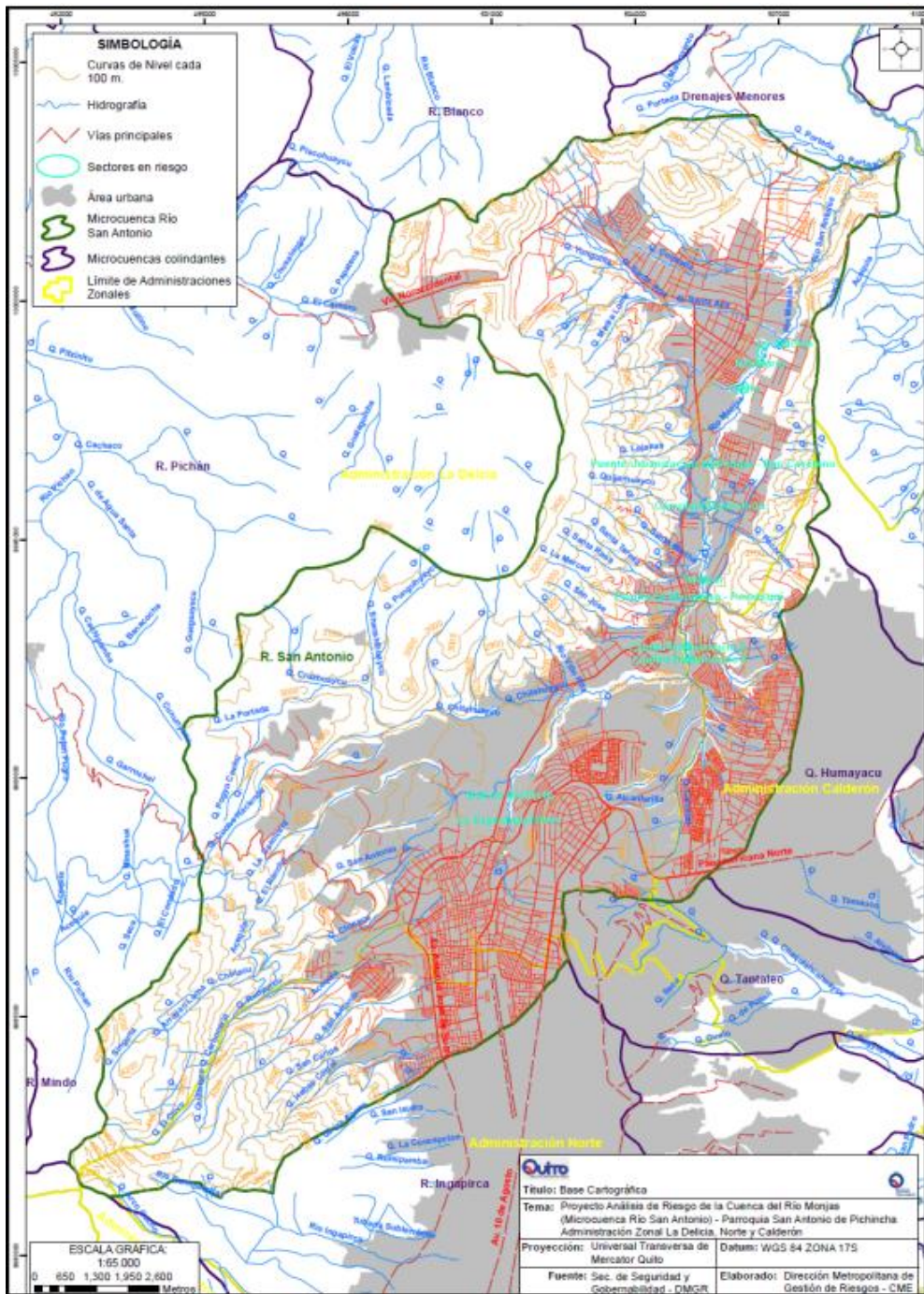
Para la determinación del caudal máximo estacionario, se procedió inicialmente a construir una curva basada en datos reales. En este estudio se utilizaron los caudales correspondientes a un período de retorno de 100 años, generados en distintos puntos del río Monjas por la empresa TECNOSUELOS, mediante la aplicación del modelo hidrológico HEC-HMS.

De este conjunto de información, se seleccionaron los registros que corresponden al tramo completo del río, comprendido entre las coordenadas (783405.340109 m E, 9992471.423732 m N) y (787220.207 m E, 10002709.527 m N). Dado que los datos

originales no incluían coordenadas exactas, se realizó una georreferenciación aproximada utilizando el mapa de la cuenca del Río Monjas de la Figura 20. Los valores empleados se presentaron en la Tabla 20.

Figura 20

Cuenca del Río Monjas



Nota. Adaptado de *Consultoría para la elaboración del plan de gestión integral de riesgos de la cuenca del río Monjas. I Fase: Diagnóstico de la situación actual de amenazas, vulnerabilidades y riesgos. Informe final* (p. 65) por la Secretaría General de Seguridad y Gobernabilidad, 2016. Fuente de la figura: Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos (DMGR).

Con estos datos, se construyó en Microsoft Excel una curva de regresión que permitió extrapolar los caudales hasta el kilómetro 21.40 del recorrido del río. El análisis de ajuste determinó que la relación más representativa corresponde a una ecuación polinómica de segundo orden (véase en la ecuación 20) en función de la distancia acumulada del cauce, con un coeficiente de determinación $R^2 = 0.9759$ (véase Figura 21) lo que evidenció un alto grado de correlación entre las variables analizadas.

Tabla 20

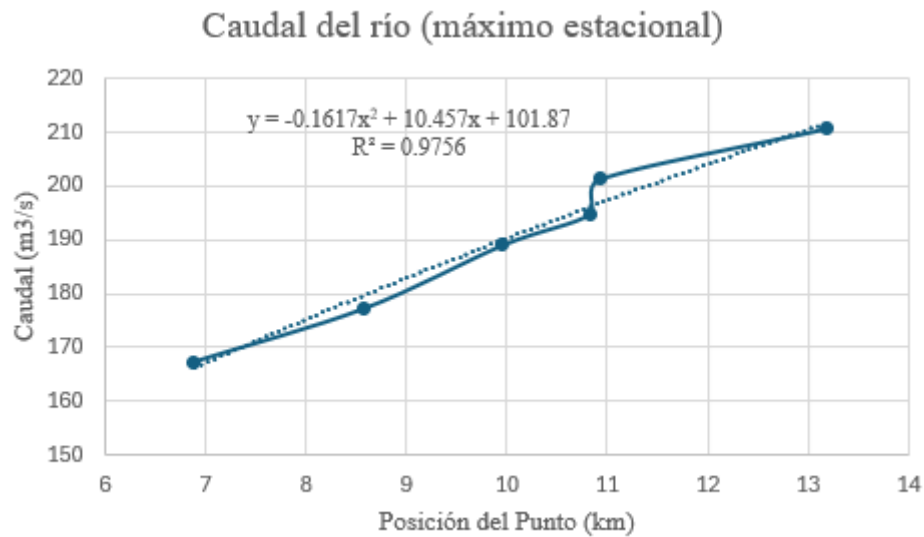
Caudales máximos en un TR 100 años, con influencia en el área de estudio

Dist_Punto (km)	Q(m3/s)
6.8834912	167.35
8.57521615	177.23
9.95958904	189.03
10.8326308	194.84
10.9243989	201.27
13.1809474	210.7

Nota. Adaptado de Estudio de Factibilidad para Estabilización de Taludes Río Monjas, Volumen 1 (p. [36]), por TECNOSUELOS CÍA. LTDA., 2012, citado en el Informe Final de la Cuenca Río Monjas: Diagnóstico Situación de Riesgo (p. [36]), por Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, 2019.

Figura 21

Curva de regresión para obtener caudales probables con un TR de 100 años



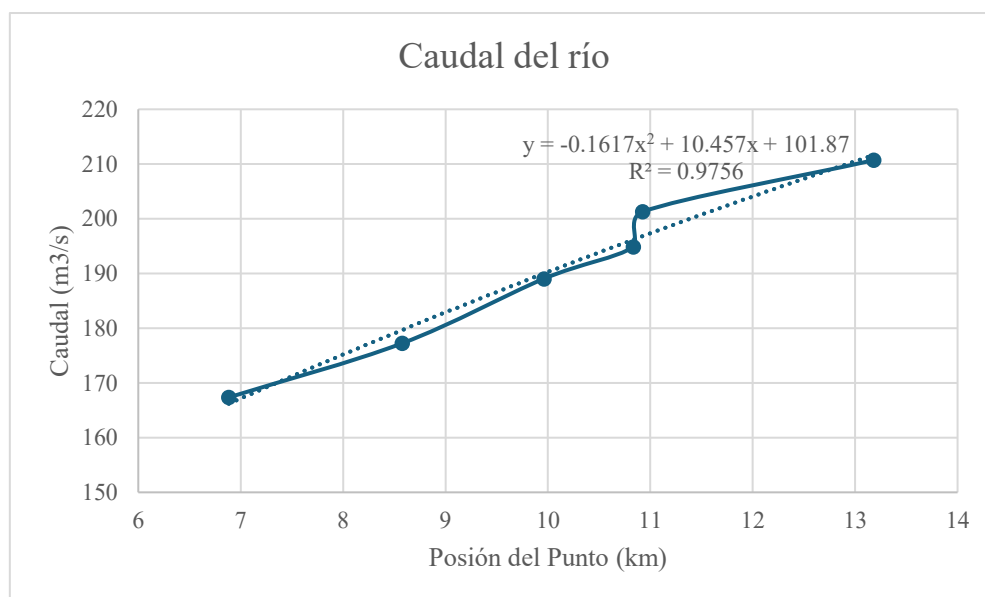
Nota. Elaboración de los autores usando el software Microsoft Excel.

$$y = -0.1617 \cdot x^2 + 10.457 \cdot x + 101.87 \quad (20)$$

Para obtener la variable de estudio, se utilizó QGIS para determinar la longitud acumulada correspondiente a cada uno de los tres puntos previamente definidos sobre el cauce del río para cada talud (véase sección 4.4.1.7). Estos valores fueron reemplazados en la ecuación 20 con la cual se obtuvo una curva de regresión que estimó los caudales máximos estacionarios desde el kilómetro 14 hasta el 21.3 (véase la Figura 22).

Figura 22

Curva de regresión polinómica



Nota. Elaboración de los autores.

A partir de estos valores se promedió los tres resultados con el fin de obtener un valor representativo único por talud. Finalmente, el nivel de peligro asociado fue clasificado conforme a lo indicado en la Tabla 13.

4.4.1.9. Longitud del Talud

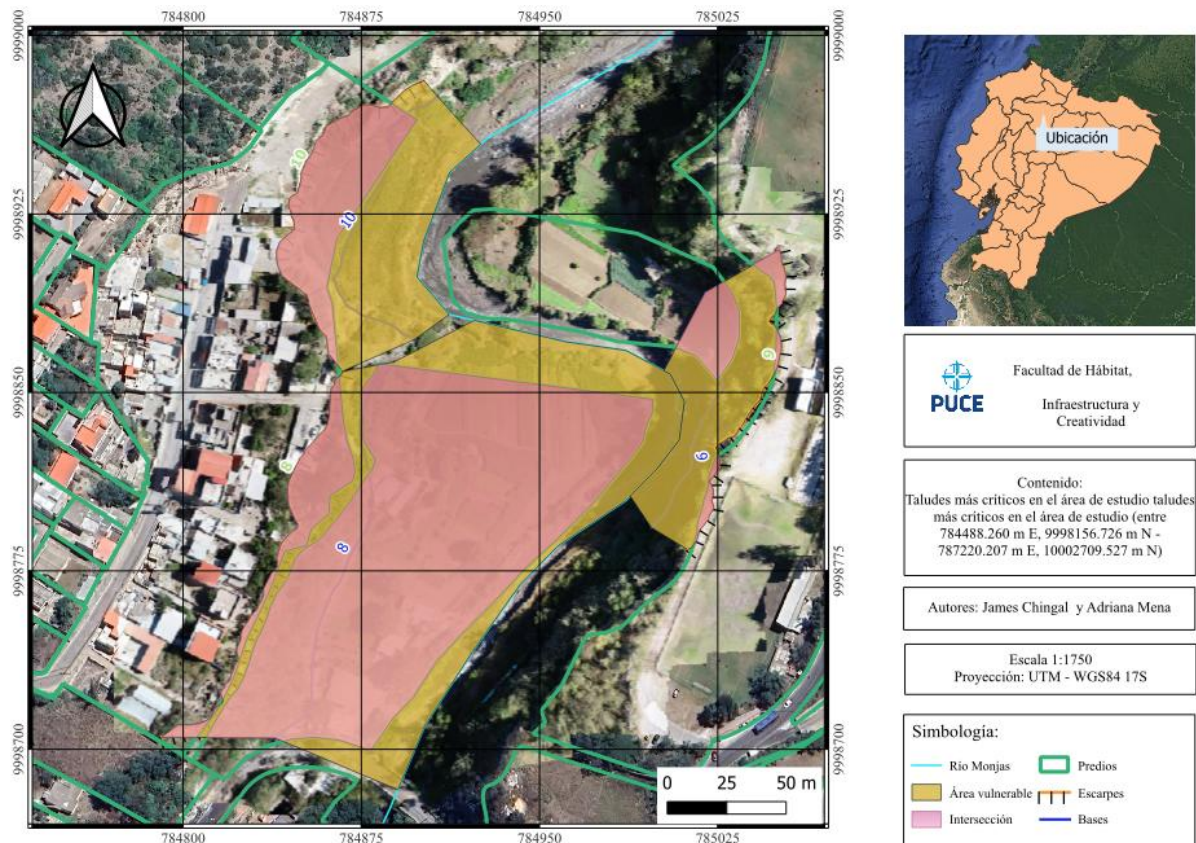
Para obtener este valor, se trazó en QGIS una cadena de líneas que representara la cresta, considerando la forma de las curvas de nivel, especialmente en las zonas donde estas se aplanaban y presentaban una configuración en forma de medialuna. Como criterio adicional, se procuró que la longitud de cada trazado no superase los 150 m, correspondiente al área de influencia estimada para el estudio. Posteriormente, mediante las herramientas de cálculo de QGIS, se obtuvo la longitud bidimensional de cada cresta del talud; en el caso de sistemas de taludes, se promediaron las longitudes de las crestas correspondientes para obtener un único valor representativo. Finalmente, estos valores fueron clasificados conforme a lo establecido en la Tabla 14.

4.4.1.10. Área de protección ecológica dentro del predio

Para la obtención de esta variable, se extrajo del GeoVisor Catastral del DMQ un archivo shapefile que contiene los predios correspondientes al área de estudio. Esta información fue incorporada al software QGIS, además, se creó una nueva capa destinada al trazado de polígonos que representan el área comprendida entre la cresta del talud y el cauce del río. En el caso de los sistemas de taludes, el polígono se extendió desde la cresta más alta hasta su proyección sobre el río. Posteriormente, se realizó una operación de intersección espacial entre dichas áreas y los polígonos de los predios, obteniéndose así la superficie de terreno expuesta a peligro directo (véase en la Figura 23). Finalmente, el nivel de peligro asociado se clasificó conforme a los rangos establecidos en la Tabla 15.

Figura 23

Área de protección ecológica dentro del predio en taludes críticos



Nota. Elaboración de los autores.

4.5. Construcción de la Matriz de Comparación por Pares (AHP)

Para la construcción de la matriz de comparación por pares, en primer lugar, se llevó a cabo una discusión técnica orientada a establecer, con base en el criterio de los autores, la experiencia y el grado de fiabilidad de las fuentes de datos, una jerarquización de las variables consideradas. Además, cabe aclarar que esta se definió con el objetivo de priorizar aquellas variables que inciden directamente en la seguridad de la población. Bajo este criterio, aunque se integraron los factores físicos expuestos, se determinó que la vulnerabilidad social debía prevalecer en el modelo. En tal sentido, para la generación del mapa de riesgo, las variables asociadas a la susceptibilidad física del talud se ponderaron en un nivel secundario frente a aquellas que representan una amenaza directa para los habitantes. A partir de este análisis, se determinó que el número de elementos posiblemente afectados (C1) constituye la variable de mayor peso en la evaluación. En segundo lugar, se ubicó la carga de infraestructura sobre la cresta (C3), seguida por la pendiente del talud (C5).

Posteriormente, se asignó una misma prioridad a la distancia del río a la base del talud (C7), la altura del talud (C4) y la litología del talud (C6). Con menor influencia relativa se ubicaron el caudal (C8) y la distancia del elemento posiblemente afectado hasta la cresta (C2), seguidos por la longitud del talud (C9). Finalmente, se consideró con el peso más bajo la variabilidad del área de protección ecológica dentro del predio (C10).

Es relevante destacar que el modelo asignó un peso apreciablemente superior a la variable “C1. Número de Elementos” (29.4%) frente a la “Carga de Infraestructura” (15.4%). Esta jerarquización es consecuencia directa del enfoque de riesgo social adoptado en la investigación. En el tramo analizado, la amenaza crítica no reside únicamente en la potencial falla geotécnica por sobrecarga estática, sino en la elevada exposición de múltiples familias habitando estructuras precarias. En este sentido, la ponderación priorizó la salvaguarda de vidas

humanas (representada implícitamente por la densidad poblacional) por encima de la magnitud física de las cargas actuantes sobre el talud.

Con esta jerarquización definida, se empleó la escala propuesta en la Tabla 2 para realizar la comparación por pares entre las variables, obteniéndose así la matriz de ponderación presentada en la Tabla 21.

Tabla 21

Matriz de comparación por pares de 10 criterios aplicando el método AHP

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10
C1	1.00 0	5.000	2.00 0	4.000	3.00 0	4.000	4.000	5.000	6.000	7.000
C2	0.20 0	1.000	0.25 0	0.500	0.33 3	0.500	0.500	1.000	2.000	3.000
C3	0.50 0	4.000	1.00 0	3.000	2.00 0	3.000	3.000	4.000	5.000	6.000
C4	0.25 0	2.000	0.33 3	1.000	0.50 0	1.000	1.000	2.000	3.000	4.000
C5	0.33 3	3.000	0.50 0	2.000	1.00 0	2.000	2.000	3.000	4.000	5.000
C6	0.25 0	2.000	0.33 3	1.000	0.50 0	1.000	1.000	2.000	3.000	4.000
C7	0.25 0	2.000	0.33 3	1.000	0.50 0	1.000	1.000	2.000	3.000	4.000
C8	0.20 0	1.000	0.25 0	0.500	0.33 3	0.500	0.500	1.000	2.000	3.000
C9	0.16 7	0.500	0.20 0	0.333	0.25 0	0.333	0.333	0.500	1.000	2.000
C10	0.14 3	0.333	0.16 7	0.250	0.20 0	0.250	0.250	0.333	0.500	1.000
SUM	3.29	20.83	5.36	13.58	8.61	13.58	13.58	20.83	29.50	39.00
A	3	4	7	3	7	3	3	3	0	0

Nota. Elaboración de los autores del presente estudio.

4.6. Determinación de Pesos de Criterios

Posterior a la conformación de la matriz de comparación por pares, se llevó a cabo el proceso de normalización. Esta operación consistió en dividir cada elemento individual (a_{ij}) entre la sumatoria total de su respectiva columna. Este paso es fundamental para estandarizar

los valores, asegurando que la suma vertical de los elementos en cada columna resulte en la unidad (1). Finalmente, para determinar el vector propio normalizado o vector de prioridad, que representa los pesos relativos asignados a cada variable, se calculó el promedio de los valores de cada fila, tal como se presenta en la Tabla 22.

Tabla 22*Vector de pesos relativos*

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	PESO (W)
C1	0.30 4	0.24 0	0.37 3	0.29 4	0.34 8	0.29 4	0.29 4	0.240	0.203	0.179	0.277
C2	0.06 1	0.04 8	0.04 7	0.03 7	0.03 9	0.03 7	0.03 7	0.048	0.068	0.077	0.050
C3	0.15 2	0.19 2	0.18 6	0.22 1	0.23 2	0.22 1	0.22 1	0.192	0.169	0.154	0.194
C4	0.07 6	0.09 6	0.06 2	0.07 4	0.05 8	0.07 4	0.07 4	0.096	0.102	0.103	0.081
C5	0.10 1	0.14 4	0.09 3	0.14 7	0.11 6	0.14 7	0.14 7	0.144	0.136	0.128	0.130
C6	0.07 6	0.09 6	0.06 2	0.07 4	0.05 8	0.07 4	0.07 4	0.096	0.102	0.103	0.081
C7	0.07 6	0.09 6	0.06 2	0.07 4	0.05 8	0.07 4	0.07 4	0.096	0.102	0.103	0.081
C8	0.06 1	0.04 8	0.04 7	0.03 7	0.03 9	0.03 7	0.03 7	0.048	0.068	0.077	0.050
C9	0.05 1	0.02 4	0.03 7	0.02 5	0.02 9	0.02 5	0.02 5	0.024	0.034	0.051	0.032
C10	0.04 3	0.01 6	0.03 1	0.01 8	0.02 3	0.01 8	0.01 8	0.016	0.017	0.026	0.023
	1.00 0	1.00 0	1.00 0	1.00 0	1.00 0	1.00 0	1.00 0	1.000	1.000	1.000	1.000

Nota. Elaboración de los autores del presente estudio.

4.7. Verificación del Índice de Consistencia (CR)

Para obtener la variable deseada es necesario, en primer lugar, evaluar el grado de consistencia de los juicios subjetivos empleados en el método AHP. Para ello, se calcula el valor propio principal o λ_{max} .

Este valor se obtiene realizando una multiplicación matricial entre la matriz de comparación (véase la Tabla 21) y el vector de pesos relativos (W) (véase la Tabla 22), lo que genera un nuevo vector denominado M . A continuación, cada componente de este vector se divide para el valor correspondiente del vector de pesos relativos (m_{ij} / w_{ij}). Posteriormente, se calcula el promedio de todos los cocientes obtenidos, y el resultado final se interpreta como el valor de λ_{max} (véase la Tabla 23).

Con λ_{max} determinado, y siguiendo lo indicado en la Sección 2.5, se considera que $n=10$, correspondiente al número de variables analizadas, y un valor de índice aleatorio (RI) igual a 1,49 asociado a dicho n (véase la Tabla 3). Con estos datos, se aplican la Ecuación 1 y la Ecuación 2 para obtener el valor del índice de consistencia (CI) y, posteriormente, el coeficiente de razón de consistencia (CR), cuyo resultado es $CR = 1,66\%$ (Tabla 23). Al ser menor al umbral del 10 %, se concluye que el grado de inconsistencia en los juicios y, por tanto, la subjetividad asociada al análisis es muy reducido.

Tabla 23

Obtención del índice de razón de consistencia

M=N*W	COCIENTE=M/W
2.883	10.404
0.502	10.093
2.021	10.418
0.830	10.207
1.349	10.347
0.830	10.207
0.830	10.207
0.502	10.093
0.326	10.086
0.231	10.159
$\lambda=$	10.222
$n=$	10.000
$RI=$	1.490
$CI=(\lambda-n)/(n-1)$	0.025
$CR=CI/RI$	0.017
$\%CR$	1.656

Nota. Elaboración de los autores.

Una vez comprobada la consistencia de la valoración por pares, es correcto asumir la validez de los valores obtenidos en el vector de pesos relativos por variable evaluada. Con esta información se realizó la calificación de cada alternativa, es decir se adaptó la Ecuación 15. Así, el peso por alternativa (cada uno de los taludes o sistema de taludes del presente trabajo) se denomina el

Índice de Riesgo al Deslizamiento (Landslide Risk Index, LRI) y se expresa como dicta la Ecuación 21.

$$LRI_i = \sum_{j=1}^m w_j * v_{ij} \quad (21)$$

Donde,

m , es el número de variables del estudio (un total de 10, descritos en la Tabla 4).

w_j , es el peso o prioridad del criterio j (Tabla 22).

v_{ij} , es el valor de la categorización de cada variable (escala del 1 al 5) con respecto al criterio j y perteneciente a la alternativa i .

LRI_i , es el Índice de Riesgo al Deslizamiento de la alternativa i .

4.8. Fotogrametría

4.8.1. Levantamiento Fotogramétrico

Fue esencial llevar a cabo un proceso organizado para garantizar la calidad de los datos obtenidos y aprovechar al máximo la fotogrametría con dron. Para empezar, se determinaron las coordenadas de los taludes que se iban a construir, teniendo en cuenta la facilidad de acceso a cada uno. Con estos datos se pudo establecer un plan de vuelo inicial. Una vez en campo, se verificaron las condiciones climáticas, ya que factores como el viento pueden impedir la ejecución del vuelo o comprometer la estabilidad del dron.

Se eligió un área despejada, sin árboles, construcciones ni otros impedimentos que pudieran obstaculizar la maniobra para el despegue.

Se configuró el plan de vuelo en la aplicación móvil *Map Pilot*, empleando un dispositivo compatible (una Tablet, para ser exactos). En esta plataforma, se estableció el recorrido que realizaría el UAV, dando prioridad a cubrir por completo la zona determinada

por el polígono de estudio y optimizando al máximo el consumo de batería del equipo, un dron *DJI Phantom 4 Pro*.

Previo al encendido del dron, este fue colocado sobre una superficie limpia y nivelada. Esto facilitó que las hélices se desplegaran de manera apropiada y que el sistema GPS calibrara correctamente con el dispositivo. Después de comenzar la misión, el dron continuó con el plan de vuelo previamente definido, tomando cerca de 150 fotos por vuelo. Esta cantidad era adecuada para asegurar la superposición necesaria y permitir una reconstrucción apropiada del nuevo modelo de elevación.

Al finalizar la ruta programada, el dron regresó automáticamente al punto de despegue, dando por concluida el vuelo. Inmediatamente después, se realizó la transferencia de todas las imágenes desde la memoria SD hacia una computadora. Posteriormente, se llevó a cabo el procesamiento de las imágenes en el software *Agisoft Meta Shape PhotoScan Pro*, mediante el cual se reconstruyó el modelo digital del terreno y se generó la ortofoto correspondiente (véase el Anexo B Figura B1 y B2). Este producto fotogramétrico permitió, finalmente, la elaboración de nuevas curvas de nivel con mayor precisión.

Figura 24

Levantamiento de campo



(a)

(b)

Nota. Fotografía (a) de los autores del estudio y el tutor de acompañamiento; (b) se muestra el dron modelo DJI Phantom 4 Pro, utilizado en el desarrollo del proyecto. Elaboración de los autores.

5. Análisis de Resultados

5.1. Presentación de Resultados

5.1.1. Resultados del Análisis AHP

El procedimiento descrito en la Sección 4.7 se aplicó de manera individual a cada talud, de modo que los valores correspondientes al riesgo de deslizamiento de masas para cada uno de ellos quedaron registrados en la Tabla 24. En dicha tabla, los valores más elevados se asocian a una mayor probabilidad de ocurrencia del fenómeno analizado. Bajo este criterio, los taludes N° 8 (784823.6663 m E, 9998749.506 m N), 10 (784839.8751 m E, 9998909.687 m N) y 21(785492.901 m E, 9999410.34 m N) se identifican como aquellos con mayor riesgo al deslizamiento.

Tabla 24

Valor del LRI correspondientes a los 67 taludes analizados, Primera Iteración

N° de Talud	Valor	N° de Talud	Valor	N° de Talud	Valor
1	2.0270902	24	2.2414963	47	2.4214778
2	3.5897566	25	2.3207586	48	2.4214778
3	3.5408084	26	2.6374485	49	2.42611095
4	3.5340068	27	2.2746330	50	2.403365406
5	3.4760694	28	2.0962068	51	2.5317079
6	2.7455974	29	2.2588423	52	2.44190169
7	2.9325121	30	2.1955050	53	2.368940404
8	3.7831418	31	2.1623475	54	2.490849946
9	3.0629101	32	2.2588423	55	2.514362316
10	4.1450063	33	2.1270426	56	2.5371079
11	2.9731039	34	2.1270426	57	2.4191561
12	2.4380285	35	2.1270426	58	1.9476964
13	2.1278091	36	2.1789262	59	2.3228145

14	2.8130146	37	2.2278745	60	2.3228145
15	2.4869833	38	2.2421316	61	2.2083604
16	3.4126043	39	2.0290141	62	2.4041322
17	3.0989277	40	2.3228145	63	2.1935335
18	3.4939221	41	2.3771627	64	2.2241511
19	2.7099091	42	2.2091272	65	2.3675387
20	2.4773528	43	2.1594121	66	2.3737055
21	3.6879421	44	2.1103319	67	2.4873928
22	2.8488141	45	2.2414967		
23	2.1767573	46	2.2407299		

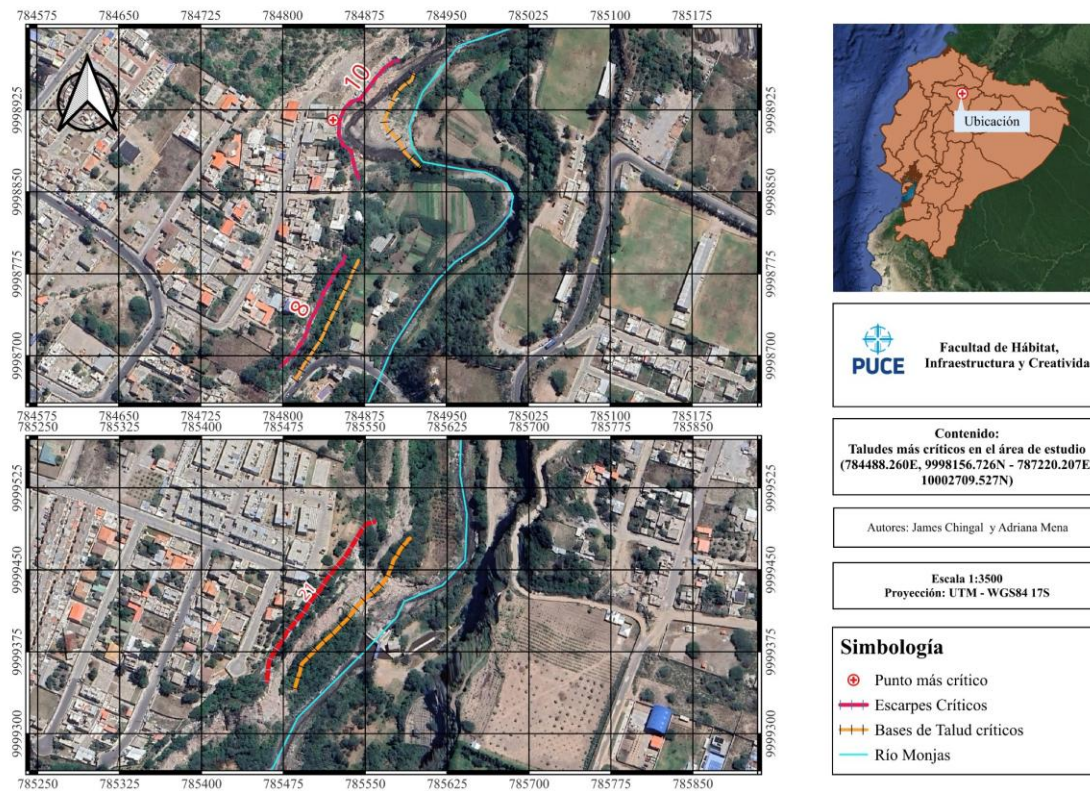
Nota. Elaboración de los autores.

5.1.2. Identificación los Puntos con Mayor Riesgo de Deslizamiento y Corrección

Considerando todas las variables y supuestos metodológicos establecidos en el presente estudio, los tres taludes más críticos son el N.º 10, el N.º 8 y el N.º 21, en orden descendente. Estos se localizan en el tramo inicial del sector analizado. A continuación, se presenta la ubicación de cada talud con el fin de facilitar su identificación (véase la Figura 24).

Figura 25

Taludes críticos del primer análisis



Nota. Elaboración de los autores.

5.2. Verificación de Resultados

5.2.1. Resultados en la Observación de Campo

Una vez identificados los taludes con mayor nivel de riesgo, se efectuaron visitas de campo, con énfasis en el talud N.º 10, con el objetivo de obtener registros fotogramétricos mediante el uso de un dron y como se mencionó en la sección 4.4.1.6., una salida para lograr un muestreo representativo del tramo de estudio. A partir de estas imágenes, y aplicando la metodología descrita en la Sección 4.8.1, se generó un nuevo Modelo Digital de Elevaciones, del cual se derivaron curvas de nivel actualizadas. En consecuencia, fue necesario corregir el trazado y recalcular cada una de las variables analizadas. En este proceso se consideró pertinente ajustar los taludes N.º 8 (784823.6663 m E, 9998749.506 m N), 9 (785022.1084 m

E, 9998804.97 m N), 10, 16 (785369.3754 m E, 9999040.668 m N), 17 (785503.2309 m E, 9999142.095 m N) y 18 (785375.5541 m E, 9999302.993 m N). Asimismo, se actualizó la información de los taludes para que refleje la categorización litológica establecida en el laboratorio, campañas de campo y documentación existente. Se asignó a todos los taludes la clasificación '2' (suelos granulares con finos), excepto el Talud 49 (786269.1402 m E, 10001238.26 m N) y la sección entre el 51 (786487.0256 m E, 10001346.29 m N) y el 55 (786570.5548 m E, 10001587.79 m N), que conservan la categoría '3' de finos no plásticos (se describe de manera más detallada en la sección 4.4.1.6).

Los resultados actualizados se presentan en la Tabla 25, donde se observa que el talud N.º 10 sigue siendo el más crítico. Esto se debe a que la distancia de la base del talud al río es más corta que la del talud N.º8, siendo esto el factor detonante para que incremente su ponderación final.

Tabla 25*Valor del LRI correspondientes a los 67 taludes analizados, Segunda Iteración*

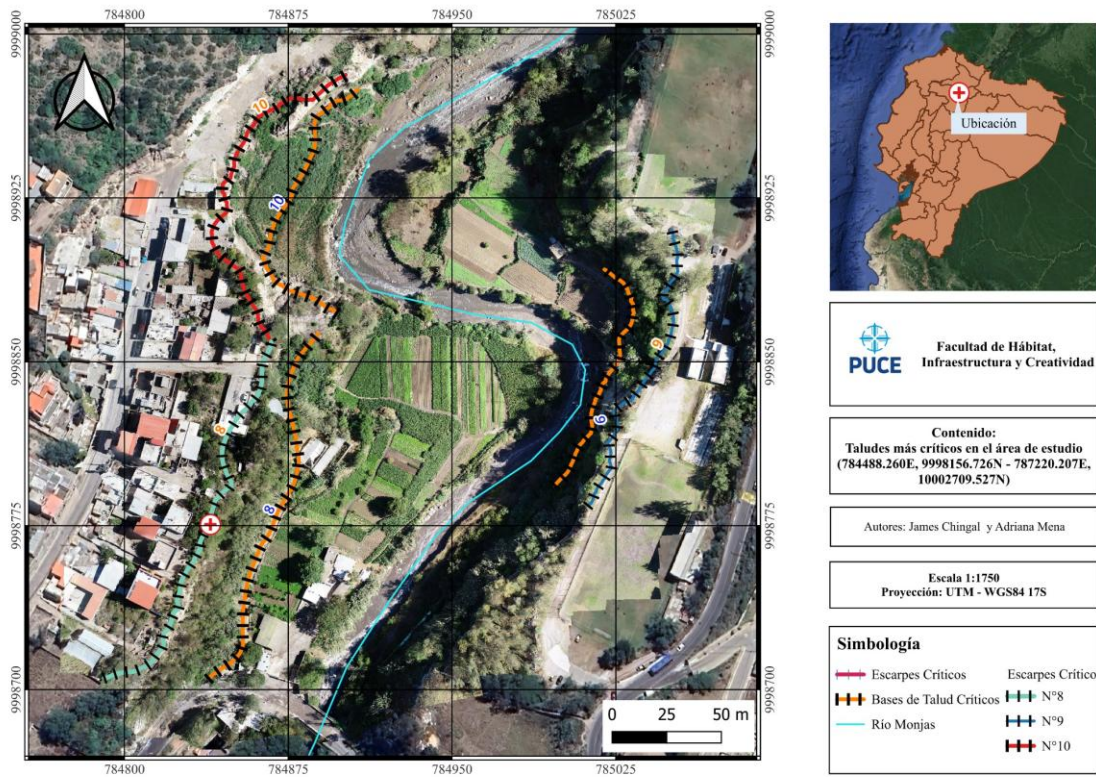
N.º de Talud	Valor	N.º de Talud	Valor	N.º de Talud	Valor
1	2.02709024	24	2.2414963	47	2.4214778
2	3.58975665	25	2.3207586	48	2.4214778
3	3.67120639	26	2.6374485	49	2.4261110
4	3.53400677	27	2.2746330	50	2.3220477
5	3.4760694	28	2.0962068	51	2.5317079
6	2.82691512	29	2.2588423	52	2.4419017
7	2.93251207	30	2.1955050	53	2.3689404
8	3.92034144	31	2.1623475	54	2.4908499
9	3.04016453	32	2.2588423	55	2.5143623
10	4.11880361	33	2.1270426	56	2.5371079
11	2.97310386	34	2.1270426	57	2.4191561
12	2.43802855	35	2.1270426	58	1.9476964
13	2.12780908	36	2.1789262	59	2.3228145
14	2.81301465	37	2.2278745	60	2.3228145
15	2.48698325	38	2.2421316	61	2.2083604
16	3.65633942	39	2.0290141	62	2.4041322
17	3.29294771	40	2.3228145	63	2.3875535
18	3.44420701	41	2.3771627	64	2.2241511
19	2.70990914	42	2.2091272	65	2.3675387
20	2.47735285	43	2.1594121	66	2.3737055
21	3.6879421	44	2.1103319	67	2.4873928
22	2.8488141	45	2.2414967		
23	2.1767573	46	2.2407299		

Nota. Elaboración de los autores.

En la Figura 25. se muestra la nueva forma del talud N°8 y N°10, dada su relevancia

Figura 26

Taludes críticos corregidos en el área de estudio



Nota. Elaboración de los autores.

A continuación, en la Tabla 26 se muestra la ficha del talud N°10, donde detallan las mediciones de las 10 variables estudiadas al igual que su respectivo valor de categorización:

Tabla 26*Ficha de resultados del talud N. °10*

Variable	Unidad	10	Categorización
1. Número de elementos posiblemente afectados	#	137	5
2. Distancia del elemento posiblemente afectado hasta la cresta del talud	m	0	5
3. Carga de la infraestructura en cresta del talud	Ton	23980.71158	4
4. Altura del talud	m	28	2
5. Pendiente del talud	°	75.63069	5
6. Litología (SUCS + geología local)	SUCS	ML, MH	3
7. Distancia río a la base del talud	m	26.8915	3
8. Caudal del río	m ³ /s	224.7103691	4
9. Longitud del talud	m	169.08434	5
10. Área de protección ecológica dentro del predio	m ²	2330.867	2
CALIFICACIÓN FINAL			4.11880361

Nota. Elaboración de los autores.

En las visitas de campo se llevaron a cabo tres procesos. En primer lugar, se inspeccionó la mayoría de los puntos previamente definidos en el software QGIS 3.40.11, con el objetivo de contrastar la información generada con la situación real y evaluar la necesidad de realizar ajustes en su localización.

Durante la primera visita, se comparó el trazado de las curvas de nivel con el relieve existente y se verificó la correspondencia de las diferencias de altura con los valores de las curvas de nivel provenientes de un modelo digital de elevación con resolución 10x10, proporcionado por el IGM. Adicionalmente, se evaluó la viabilidad de rutas de acceso a cada punto, con el fin de optimizar el trabajo de la segunda campaña

En la segunda visita se buscó optimizar tanto el tiempo en terreno como el tiempo de vuelo del dron. Para ello, se diseñaron dos planes de vuelo que abarcaron tres taludes cada uno. El primer plan vuelo se ejecutó desde la cresta del talud N.º 10, cubriendo adicionalmente los taludes N.º 8 y N.º 9, con prioridad en el talud N.º 10, que se calculó como el más crítico. Mientras que el segundo plan de vuelo se llevó a cabo en los taludes N.º 16, 17 y 18. Esta ruta se consideró indispensable incluir, debido a que como se mencionó en la sección 2.2.3, el talud N.º 16 presenta deslizamientos significativos de manera recurrente cada año, lo que requiere un monitoreo constante.

Durante esta visita se utilizó una estación total con el fin de corroborar las alturas previamente estimadas a partir de las curvas de nivel disponibles. Se empleó fotogrametría en este procedimiento debido a que surgieron incongruencias entre los valores obtenidos y los que se derivaron de las curvas existentes. El software Agisoft Metashape (Photoscan Pro) fue utilizado para procesar una gran cantidad de imágenes del área que se adquirieron mediante el vuelo realizado. Este procesamiento produjo una ortofoto del área, que fue utilizada para crear nuevas curvas de nivel. Se encontró coincidencia entre los resultados obtenidos y las mediciones realizadas a través de la estación total, validando la actualización geométrica.

Figura 27

Altura obtenida bajo levantamiento en estación total



Nota. Imagen tomada por los autores. Resultado de medición de la altura del Talud N°10 mediante el equipo Leica TS09 plus.

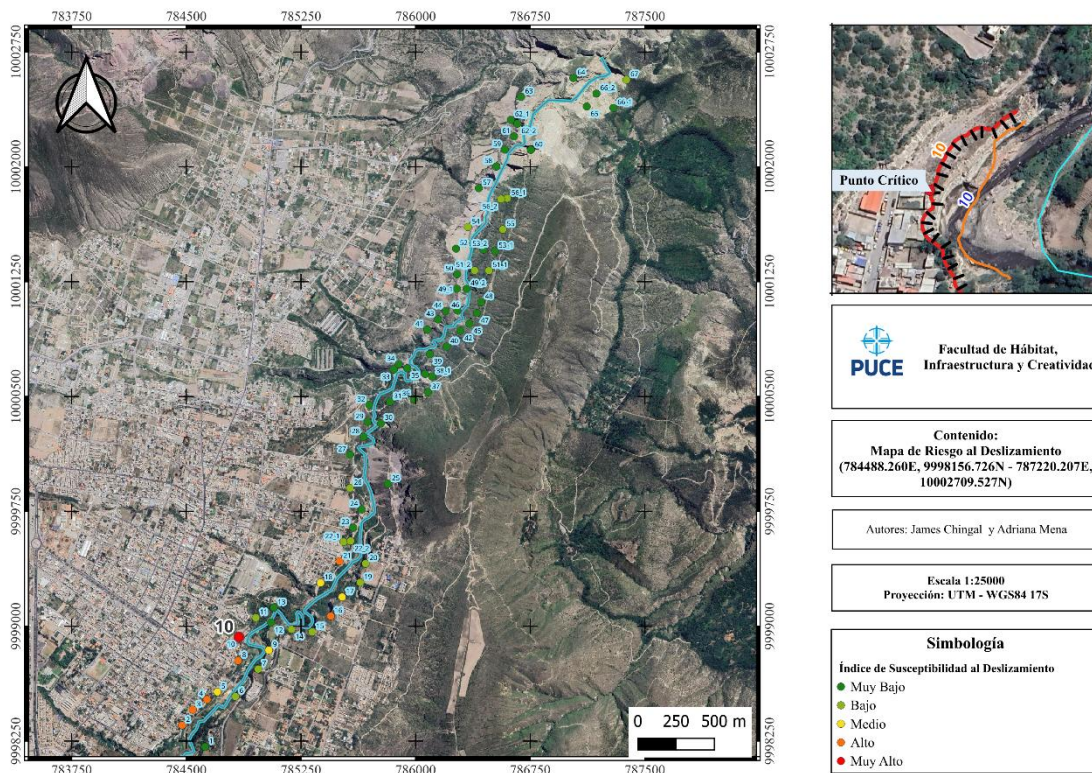
Finalmente, tras la evaluación integral de los taludes monitoreados durante este proceso, se identificó al Talud N.º 10 como el caso con mayor deterioro visible y nivel de riesgo. Como se evidencia en el reporte fotográfico del Anexo F (Figura F1), este sitio presenta una afectación severa: se documentó el colapso parcial de dos viviendas, de las cuales solo permanecen estructuras remanentes tras el deslizamiento de sus cimientos. Adicionalmente, previo al fallo, la cresta del talud presentaba un agrietamiento tensional significativo, síntoma claro de su inestabilidad natural. Cabe destacar que, tras la temporada invernal ocurrida durante el periodo de estudio, se desencadenaron los movimientos de masa previstos. Como respuesta reactiva, la comunidad procedió a rellenar nuevamente el talud empleando material heterogéneo no controlado, tal como se detalla en el Anexo F (véase la Figura F2).

5.2.2. Mapa de Riesgo al Deslizamiento

Después de haber establecido la ponderación a cada punto se generó la Figura 28 que ayude a ver de manera gráfica los resultados y su zonificación (la Tabla A1 del Anexo A contiene los resultados de la calificación de cada talud tras la segunda iteración). Donde se puede ver todo el tramo de análisis y su índice de riesgo, siendo Muy Bajo ponderaciones entre 1.95-2.46, Bajo entre 2.46-2.98, Medio entre 2.98-3.48, Alto de 3.49-4.01 y Muy Alto de 4.01 a 4.53, entrando en este último rango sólo el punto crítico. Estos rangos se establecieron utilizando la desviación estándar de la calificación como medida de dispersión de todos los puntos, la cual muestra que tan dispersos están los datos respecto a su media aritmética.

Figura 28

Mapa de riesgo al deslizamiento



Nota. Elaboración Propia

5.2.3. Discusión de Resultados

Después de comparar los resultados obtenidos inicialmente mediante la metodología AHP con aquellos corregidos a partir del levantamiento fotogramétrico, se observa que el orden de los taludes con mayor riesgo se mantuvo. Sin embargo, algunos valores sí experimentaron variaciones apreciables, especialmente en los taludes N.º 8 y N.º 10.

La variable que presentó el mayor impacto fue la distancia al río desde la base del talud. El talud N.º 8 tenía una medida de 70,03 m y el N.º 10, de 14,98 m antes de la corrección; tras el procesamiento fotogramétrico, las cifras cambiaron a 55,06 m y a 28,90 m., respectivamente.

En un principio, la variable que mide el número de elementos que podrían verse afectados también presenta una diferencia apreciable. Los taludes N.º 8 y N.º 10 contaban con 206 y 135 elementos expuestos, respectivamente. Después de la verificación, estos números cambiaron a 192 y 137 elementos.

En cuanto a la distancia del elemento posiblemente afectado hasta la cresta del talud, los valores iniciales eran de 9,64 m y 2,98 m, pero después de la corrección, el talud N.º 8 presentó 2,23 m y el N.º 10 llegó a 0 m, lo que indica una condición de riesgo más crítica.

La variable carga sobre la cresta también experimentó modificaciones. En la pendiente número 8, el valor inicial era de 26.690,03 toneladas y después de la corrección aumentó a 29.803,17 toneladas. Mientras que para el talud N.º 10 experimentó un aumento de este valor, pues pasó de 21 823,57 toneladas a 23 980,71 toneladas.

El levantamiento también permitió la actualización de la altura del talud. El talud N.º 8 aumentó de 15 m a 20 m, pero el N.º 10 bajó de 37 m a 28 m, lo que alteró su ponderación dentro de la categorización final.

La pendiente promedio del talud también presentó variaciones relevantes. En el talud N.º 8 aumentó de 48,56° a 58,06°, mientras que en el talud N.º 10 pasó de 55,16° a 71,43°.

La longitud de los taludes fue la variable con mayor cambio. En el talud N.º 8 pasó de 118,18 m a 190,23 m, lo que le asigna ahora una calificación crítica de 5. En el talud N.º 10, la longitud se incrementó de 138,91 m a 169,08 m, elevando su categoría dentro de la escala de clasificación.

A su vez, la diferencia en la categorización de litología al talud N.º 10, incrementó su ponderación a “3”, mientras que el talud 8 conservó la de “2”.

Finalmente, el área de protección ecológica dentro del predio también mostró un aumento significativo. En el talud N.º 8 el valor creció de 7.566,3 m² a 15734 m², mientras que en el talud N.º 10 se incrementó de 948,89 m² a 2330,87 m².

Del mismo modo, el incremento en el área de protección ecológica dentro del predio amplifica las implicaciones de susceptibilidad, ya que un posible deslizamiento afectaría una superficie considerablemente mayor de infraestructura o población.

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

- La inestabilidad de los taludes del río Monjas, tal como se evidenció en esta investigación, responde a la interacción de múltiples factores. Además de las características físicas del talud entre ellas las de tipo geológico, geomorfológico, estructural e hidrológico, la inclusión de los factores antrópicos resultó determinante. En particular, se identificó que el crecimiento desordenado de la huella urbana constituye la variable de mayor peso, siendo clave en la identificación de los taludes más críticos frente a la ocurrencia de deslizamientos de masa.
- Al contrastar el Talud N.º 10, identificado con el mayor Índice de Riesgo de Deslizamiento (LRI), con las observaciones realizadas en las campañas de campo, se logra corroborar la precisión del modelo. En efecto, esta estructura es la que exhibe el mayor grado de deterioro y con mayor grado de afectación a la población, dentro de la muestra estudiada. Las inspecciones *in situ* permitieron identificar movimientos en masa activos, tipificados como derrumbes y deslizamientos rotacionales. Adicionalmente, se documentó un agrietamiento tensional significativo en la cresta, así como una erosión severa (socavación) en el pie del talud, situación tan crítica que obligó a la comunidad a implementar sus propias medidas de mitigación. Finalmente, esta correspondencia evidencia que el modelo de calificación basado en el método AHP es funcional y posee una alta eficacia para predecir zonas de alto riesgo de inestabilidad.
- Una vez verificado que el resultado obtenido es satisfactorio, se concluye que la caracterización propuesta para las distintas variables estudiadas fue adecuada. En este sentido, las consideraciones adoptadas para la definición de los rangos, en función de las particularidades del área de estudio, resultaron efectivas. Por lo tanto, se evidencia

la robustez y flexibilidad del método, al poder ser ajustado según las complejidades propias de los diferentes casos de estudio que se presenten en el ámbito de la ingeniería civil.

- El análisis de los resultados evidencia la consistencia del modelo: tanto la primera como la segunda iteración demuestran una alta precisión, manteniendo inalterable la jerarquización de los taludes con mayor Índice de Riesgo (LRI). Esto confirma que la metodología propuesta es capaz de identificar y priorizar eficazmente las zonas críticas dentro de áreas extensas, requiriendo un procesamiento de datos accesible y eficiente. No obstante, se validó que la implementación de la fotogrametría aporta un valor sustancial cuando se requiere una caracterización más rigurosa y detallada de las variables geométricas. Cabe aclarar que un criterio bien formado en una base técnica y experiencia es necesario, pues el peso que se le otorgue a una variable en la matriz de comparación por pares es determinante en los resultados.
- Se concluye que, en el área de estudio, un 12% de los taludes representan un riesgo al deslizamiento alto, los cuales se concentran en la zona más poblada, siendo el número de infraestructuras, la carga sobre la cresta y la pendiente las variables determinantes para esta clasificación. Por otro lado, un 6% representa un riesgo medio y la diferencia un riesgo bajo.
- Se concluye que la identificación de la "Carga de infraestructura" y el "Número de elementos afectados" como variables determinantes confirma que la inestabilidad en el Río Monjas no es un fenómeno puramente geológico, sino también un problema de carácter socio-técnico. Por lo tanto, se establece que las soluciones exclusivamente estructurales podrían resultar insuficientes a largo plazo si no se articulan con estrategias efectivas de ordenamiento territorial.

- El Talud 10 representa el escenario más crítico del tramo analizado, alcanzando un LRI de 4.119. El análisis desagregado de sus variables evidencia un mecanismo de falla inminente impulsado por dos frentes. En la componente social, los indicadores superan holgadamente los umbrales máximos establecidos: se contabilizan 137 edificaciones afectadas (superando el límite crítico de 120) y una carga de infraestructura que alcanza el nivel 4. Simultáneamente, las características físicas configuran un escenario de alta inestabilidad: la distancia al elemento posiblemente afectado es nula (0 m), la pendiente supera los 55° y la proximidad al cauce (< 27 m) expone el pie del talud a una socavación activa. A este cuadro se suma la presencia de viviendas informales en la corona, las cuales no solo aportan una sobrecarga estática no controlada, sino que, al carecer de drenaje, favorecen la saturación del suelo (SP-SM), incrementando la probabilidad de colapso ante eventos de precipitación extrema.

6.2. Recomendaciones

- El método se nutre del conocimiento de expertos; en consecuencia, se sugiere que, para incrementar su precisión, se amplíe el número de especialistas consultados en la temática. De esta manera, será posible obtener una valoración más robusta y representativa para cada una de las variables consideradas.
- El desarrollo de estudios hidrológicos más profundos permitiría incorporar nuevas variables a la metodología propuesta, tales como la precipitación especializada y el monitoreo del caudal en tiempo real del río Monjas. Esto mejoraría la predicción de nivel de riesgo a movimiento de masas en los taludes, ya que permitiría cuantificar con mayor precisión el efecto de la erosión basal en la estabilidad de los taludes
- Aunque la metodología AHP ofrece resultados muy precisos, la validación en campo sigue siendo esencial. Las visitas y mediciones directas permitieron corregir y ajustar varios parámetros del modelo, confirmando que el análisis multicriterio debe

complementarse siempre con verificación in situ para garantizar conclusiones más confiables.

- Se recomienda mantener una actualización constante de la topografía de los taludes y del eje del cauce con fotogrametría, para tener un control sobre el avance del río con las infraestructuras y así poder prevenir con tiempo cualquier suceso fatal.
- A través de la implementación de modelación geotécnica numérica mediante los métodos FEM o LEM (empleando software como PLAXIS o GeoStudio), podrían validarse con mayor precisión los escenarios de falla en taludes con pendientes superiores a los 60°. Esto permitiría contrastar de manera técnica las condiciones críticas de estabilidad observadas mediante fotogrametría, facilitando simultáneamente la determinación de los factores de seguridad en los puntos de mayor riesgo identificados en el presente estudio.
- Dada la criticidad recurrente documentada en los taludes N.º 8, 10 y 16, resulta fundamental establecer un esquema de monitoreo técnico que integre sensores de precisión. El uso de inclinómetros para el control de desplazamientos profundos, piezómetros para el nivel freático y GNSS diferencial para la deformación superficial, proporcionaría una base de datos dinámica que permita validar el comportamiento geomecánico de estos puntos específicos analizados previamente en la sección 5.2.3.
- Se sugiere crear una cartografía de zonificación de riesgo como instrumento técnico para respaldar la toma de decisiones y la planificación territorial a nivel municipal. En zonas como la cercana al talud N.º 10, donde hay infraestructura que está en contacto directo con la cresta, esta necesidad es especialmente crucial. Se necesita una delimitación exacta de las áreas excluidas y la creación y ejecución de medidas de mitigación prioritarias. Además, se propone la necesidad de imponer limitaciones al

uso del suelo y mecanismos de control sobre los asentamientos informales en áreas con vulnerabilidad social creciente, como es el caso del talud N.º 8.

- Se recomienda el diseño e implementación de obras de protección hidráulica y de control de la erosión fluvial en los sectores donde existe una interacción dinámica significativa entre el cauce y la base de los taludes. Estas intervenciones resultan prioritarias para mitigar la socavación basal y prevenir la pérdida de soporte lateral, identificada como uno de los principales mecanismos desencadenantes de la inestabilidad en los taludes críticos del área de estudio.

Referencias

- Abramson, L. W. (2002). *Slope stability and stabilization methods*. John Wiley & Sons.
- Aguirre Paladines, M. A. (2023). *Evaluación temporal de movimientos en masa asociados a la actividad fluvial del Río Monjas* [Tesis de pregrado]. Escuela Politécnica Nacional. Repositorio Digital EPN. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/24881>
- Almario Guio, D. P. (2021). *Uso de la metodología AHP (Análisis de procesos jerárquicos) para la zonificación de riesgos de la variante Luruaco - Arroyo de Piedra en los municipios de Luruaco y Repelón del Departamento del Atlántico* [Tesis de Especialización]. Universidad Militar Nueva Granada.
- Alvarado, A., Audin, L., Nocquet, J. M., Lagreulet, S., Segovia, M., Font, Y., Lamarque, G., Yepes, H., Mothes, P., Rolandone, F., Jarrín, P., & Quidelleur, X. (2014). *Active tectonics in Quito, Ecuador, assessed by geomorphological studies, GPS data, and crustal seismicity*. *Tectonics*. <https://doi.org/10.1002/2012TC003224>
- Altamirano Tigrero, M. A. (2022). *Evolución geomorfológica fluvial reciente en ríos tropicales andinos del Ecuador: evolución geomorfológica y fluvial de la quebrada El QEC (río Monjas), a partir del crecimiento de la mancha urbana* [Tesis de pregrado]. Escuela Politécnica Nacional. Repositorio Digital EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23381>
- American Concrete Institute. (2025). *Building code requirements for structural concrete (ACI 318-25) and commentary*.
- Asamblea Nacional del Ecuador. (2024). *Ley Orgánica para la Gestión Integral del Riesgo de Desastres. Registro Oficial Suplemento 488*.

- ASTM International. (2017). *Standard test methods for liquid limit, plastic limit, and plasticity index of soils* (ASTM D4318-17e1). <https://doi.org/10.1520/D4318-17E01>
- ASTM International. (2017). *Standard test methods for particle-size distribution (gradation) of soils using sieve analysis* (ASTM D6913/D6913M-17). https://doi.org/10.1520/D6913_D6913M-17
- ASTM International. (2017). *Standard practice for classification of soils for engineering purposes (Unified Soil Classification System)* (ASTM D2487-17). <https://doi.org/10.1520/D2487-17>
- ASTM International. (2017). *Standard practice for description and identification of soils (visual-manual procedure)* (ASTM D2488-17). <https://doi.org/10.1520/D2488-17>
- Avilés, L. (2013). *Caracterización geológica-geotécnica del sur de la ciudad de Quito* [Tesis de grado]. Universidad Central de Ecuador. Repositorio Digital UCE. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/2752>
- Badavath, N., Sahoo, S., & Samal, R. (2024). *Unveiling Meghalaya topography: Slope length gradient (LS) factor estimation for insightful soil erosion evaluation*. *Journal of Engineering and Applied Science*, 71(1). <https://doi.org/10.1186/s44147-024-00508-5>
- Bahrami, Y., Hassani, H., & Maghsoudi, A. (2021). *Landslide susceptibility mapping using AHP and fuzzy methods in the Gilan province, Iran*. *GeoJournal*. <https://doi.org/10.1007/s10708-020-10162-y>
- Barragán Kondracka, R. E., & Murillo Gavilánez, A. S. (2023). *Estudio morfodinámico de la cuenca del río Monjas por trasvase de agua de los ríos orientales Papallacta, Tumiguina y Blanco Chico* [Tesis de pregrado]. Universidad Central del Ecuador. Repositorio UCE. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/29612>

- Birkmann, J. (2006). *Measuring vulnerability to promote disaster-resilient societies: Conceptual frameworks and definitions*. United Nations University Institute for Environment and Human Security (UNU-EHS).
https://www.researchgate.net/publication/313569981_Measuring_vulnerability_to_promote_disaster-resilient_societies
- Briš, R. (2021). *Probability & statistics for engineers*. VŠB – Technical University of Ostrava.
- Burrough, P. A., & McDonnell, R. A. (1998). *Principles of geographical information systems*. Oxford University Press.
- Cargua, C., Espin, R., Valencia, B., Simbaña, M., Araujo, S., Cornejo, C., & Ocampos, A. (2024). *Análisis de susceptibilidad a deslizamientos empleando el proceso de jerarquía analítica en una carretera amazónica del Ecuador*. La Granja: Revista de Ciencias de la Vida, 39(1), 116–136. <https://doi.org/10.17163/lgr.n39.2024.07>
- Cedeño Plaza, F. A. (2022). *Análisis de estabilidad del talud en el margen izquierdo del cauce del río Monjas, sector ruinas de Rumicucho* [Tesis de pregrado]. Universidad Central del Ecuador. Repositorio Institucional UCE. <http://www.dspace.uce.edu.ec/handle/25000/26829>
- Centro Nacional de Estimación Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED), (2014). *Manual para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales*. Lima, Perú. https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf
- Cedergren, H. R. (1989). *Seepage, drainage, and flow nets* (3.^a ed.). John Wiley & Sons.
- Chow, V. T., Maidment, D. R., y Mays, L. W. (1994). *Hidrología aplicada*. McGraw-Hill Interamericana.

- Concejo Metropolitano de Quito. (2008, 20 de junio). *Ordenanza Metropolitana No. 0255*. Municipio del Distrito Metropolitano de Quito.
- Corte Constitucional del Ecuador. (2022). *Sentencia No. 2167-21-EP/22. Caso Río Monjas*. Quito, Ecuador. <https://www.corteconstitucional.gob.ec/sentencia-2167-21-ep-22/>
- Cornell University (2009). Microclimates No. 4, 432.
- Crosta, G. B., & Agliardi, F. (2003). *Failure forecast for large rock slides by surface displacement measurements*. Canadian Geotechnical Journal, 40(2), 176–191. <https://doi.org/10.1139/T02-085>
- Cruden, D. M., & Varnes, D. J. (1996). *Landslide types and processes*. In A. K. Turner & R. L. Schuster (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation* (Transportation Research Board Special Report 247, pp. 36–75). National Academy Press. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-003.pdf>
- Coulomb, C. A. (1776). *Essai sur une application des règles de maximis et minimis à quelques problèmes de statique, relatifs à l'architecture. Mémoires de mathématique et de physique, présentés à l'Académie royale des sciences, par divers savans, & lus dans ses Assemblées, 7, 343–382.*
- Das, B. M. (2010). *Principles of geotechnical engineering* (7th ed.). Cengage Learning.
- El Comercio. (2018, 10 de noviembre). Los taludes del río Monjas registran una mayor erosión. El Comercio. <https://www.elcomercio.com/actualidad/quito/taludes-rio-monjas-erosion-quito/>
- Espinosa Chiliguano, T. C. (2022). *Estudio de los movimientos en masa como eventos morfoclimáticos en el periodo 1900 a 2020 sector norte del Distrito Metropolitano de Quito* [Proyecto de investigación]. Escuela Politécnica Nacional Repositorio Digital EPN. <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/22841>

Expreso. (2025, 14 de septiembre). Quito: Zonas turísticas en San Antonio de Pichincha en riesgo por erosión. *Expreso*. <https://www.expreso.ec/quito/quito-zonas-turisticas-en-san-antonio-de-pichincha-en-riesgo-por-erosion-256975.html>

Fierro Leon, F. (2023). *Evaluación de riesgos ante deslizamiento de taludes en el diseño geométrico del camino vecinal Pampahuasi - Huariños - Santa Virginia distrito de Panao, provincia de Pachitea - Huánuco, 2021* (Tesis de título profesional, Escuela Académico Profesional de Ingeniería Civil)

GAD San Antonio de Pichincha. (2020). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de San Antonio de Pichincha (PDOT 2020-2024)*. <https://gadsap.gob.ec/wp-content/pdf/pdot-san-antonio-2020-2024.pdf>

GAD San Antonio de Pichincha. (2024). *Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de San Antonio de Pichincha (PDOT 2024-2027)*. <https://gadsap.gob.ec/RENDICI%C3%93N%20DE%20CUENTAS%202024/Documentaci%C3%B3n%20de%20an%C3%A1lisis%20ciudadano/PDOT%20SAN%20ANTONIO%20DE%20PICHINCHA%20FINAL%20ABRIL..pdf>

Gobierno Autónomo Descentralizado del Distrito Metropolitano de Quito (GADDMQ). (s.f.). *GeoVisor Catastral del Distrito Metropolitano de Quito* [Mapa interactivo]. Sitio oficial del Municipio de Quito. Recuperado el [09, 11, 2025], de <https://geoquito.quito.gob.ec/portal/apps/webappviewer/index.html?id=4a554c6f046349ea84929f6ebb99d514>

Google Research. (s. f.). *Open Buildings: A dataset of building footprints to support social good applications*. <https://sites.research.google/gr/open-buildings/>

González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería geológica*. Prentice Hall.

- Gutscher, M. A., Malavieille, J., Lallemand, S. y Collot, J. Y. (1999). Tectonic segmentation of the North Andean margin: Impact of the Carnegie Ridge collision. *Earth and Planetary Science Letters*, 168(3-4), 255–270. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(99\)00060-6](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(99)00060-6)
- Hall, M. L., & von Hillebrandt, C. (1988). *Mapa de amenaza volcánica del volcán Pululahua, provincia de Pichincha* [Mapa]. Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. Escala 1:50 000.
- Hernández-Sampieri, R., Fernández-Collado, C., & Baptista-Lucio, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.ª ed.). McGraw-Hill Education.
- Highland, L. M., & Bobrowsky, P. (2008). *Manual de derrumbes: Una guía para entender todo sobre los derrumbes* (Circular 1325). Servicio Geológico de los Estados Unidos. Reston, Virginia.
- Holtz, R. D., & Kovacs, W. D. (1981). *An introduction to geotechnical engineering*. Prentice-Hall.
- Instituto Geofísico de la Escuela Politécnica Nacional. (s.f.). *Volcán Pululahua*. Recuperado el 28 de diciembre de 2025, de <https://www.igepon.edu.ec/pululahua>
- Instituto Geofísico — Escuela Politécnica Nacional. (8 de diciembre, 2019). *Informe Sísmico Especial N° 17 - 2019 - SISMO EN SAN ANTONIO DE PICHINCHA*. Instituto Geofísico - EPN. <https://www.igepon.edu.ec/tag/San%20Antonio%20de%20Pichincha>
- Kendrick, E., Bevis, M., Smalley, R., Brooks, B., Vargas, R. B., Lauria, E. y Fortes, L. P. S. (2003). El vector de Euler de Nazca-Sudamérica y su tasa de cambio. *Journal of South American Earth Sciences*, 16(2), 125–131.
- Lohr, S. L. (2022). *Sampling: Design and analysis* (3rd ed.). Chapman & Hall/CRC.

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2014). *Norma Ecuatoriana de la Construcción: Cargas (no sísmicas) (NEC-SE-CG)*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>

Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda. (2015). *Norma Ecuatoriana de la Construcción: Peligro Sísmico, Diseño Sismo Resistente (NEC-SE-DS)*. <https://www.habitatyvivienda.gob.ec/documentos-normativos-nec-norma-ecuatoriana-de-la-construccion/>

Monteiro, J. S., Padilha, D. G., & Cruz, J. C. (2016). *Protocol of factors assessment influential in susceptibility to erosion of river slopes*. *Revista Árvore*, 40(5), 815–823. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000500005>

Municipio del Distrito Metropolitano de Quito. (2019). Diagnóstico de la situación de riesgo cuenca Río Monjas. [https://www7.quito.gob.ec/mdmq_Ordenanzas/Administraci%C3%B3n%202019-2023/Sesiones%20de%20Concejo/2019/Sesi%C3%B3n%20Ordinaria%202019-09-10/IV.%20Informe%20R%C3%ADo%20Monjas/DIAGNOSTICO%20SITUACI%C3%93N%20DE%20RIESGO_CUENCA%20R%C3%8DO%20MONJAS/2_ANEXOS/Anexo%206%20%20Identificaci%C3%B3n%20de%20Actores/Anexo%206.%20\(3\).pdf](https://www7.quito.gob.ec/mdmq_Ordenanzas/Administraci%C3%B3n%202019-2023/Sesiones%20de%20Concejo/2019/Sesi%C3%B3n%20Ordinaria%202019-09-10/IV.%20Informe%20R%C3%ADo%20Monjas/DIAGNOSTICO%20SITUACI%C3%93N%20DE%20RIESGO_CUENCA%20R%C3%8DO%20MONJAS/2_ANEXOS/Anexo%206%20%20Identificaci%C3%B3n%20de%20Actores/Anexo%206.%20(3).pdf)

Municipio del Distrito Metropolitano de Quito, Secretaría Técnica / EPMAPS. (2021). Plan de acción propuestas por la dirección metropolitana de gestión de riesgos (DMGR) para ejecutar en la cuenca baja del río monjas. https://www7.quito.gob.ec/mdmq_ordenanzas/Administraci%C3%B3n%202019-2023/Sesiones%20de%20Concejo/2021/Sesi%C3%B3n%20132%20Ordinaria%202021-03-30/V.%20Informe%20R%C3%ADo%20Monjas/Seguridad/2.-_plan_de_acciones_propuesto_a_ejecutar_en_sitios_criticos_cuenca_rio_monjas.pdf

- Navidi, W. (2019). *Statistics for engineers and scientists* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
- Nex, F., & Remondino, F. (2014). *UAV for 3D mapping applications: A review*. *Applied Geomatics*, 6(1), 1–15.
https://www.researchgate.net/publication/260529522_UAV_for_3D_mapping_applications_A_review
- Nocquet, J. M., Mothes, P. y Alvarado, A. (2009). Geodesia, geodinámica y ciclo sísmico en Ecuador. En J.-Y. Collot, V. Sallares y N. Pazmiño (Eds.), *Geología y Geofísica Marina y Terrestre del Ecuador: Desde la Costa Continental Hasta las Islas Galápagos* (págs. 83–95). Comisión Nacional del Derecho del Mar (CNDM).
- Ortega Criollo, R. D., & Quishpe Coyago, J. W. (2025). *Breve estudio geotécnico del talud de coordenadas (783998.71 E, 9996547.08N) en el barrio La Pampa, Pomasqui, Ecuador* [Trabajo de integración curricular]. Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Pacheco, D., Andrade, D., & Alvarado, A. (2014). Estratigrafía Cuaternaria de la Cuenca San Antonio de Pichincha. *Revista Politécnica*, 33(1), 1-9.
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=688773656026>
- Pacheco, D. (2013). *Estudio geológico de las formaciones cuaternarias en la zona San Antonio de Pichincha – Pomasqui* [Tesis de ingeniería]. Escuela Politécnica Nacional.
<https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/6450>
- Quirós Rosado, E. M. (2014). *Introducción a la fotogrametría y cartografía aplicadas a la ingeniería civil*. Universidad de Extremadura.
<https://dehesa.unex.es/entities/publication/40093d39-be17-485a-a5e7-4306efdeb71c>
- Ruiz González, J. A. (2022). Proyecto de estabilización del talud en el sector Santa Ana abscisa (0+060 a 0+100), mediante el diseño de una pantalla atirantada con análisis tridimensional y

cargas sísmicas [Trabajo de titulación]. Universidad Politécnica Salesiana.

<https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/22312>

Saaty, R. W. (1987). The analytic hierarchy process—what it is and how it is used. *Mathematical Modelling*, 9(3–5), 161–176. [https://doi.org/10.1016/0270-0255\(87\)90473-8](https://doi.org/10.1016/0270-0255(87)90473-8)

Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process. *European Journal of Operational Research*, 48(1), 9–26. [https://doi.org/10.1016/0377-2217\(90\)90057-I](https://doi.org/10.1016/0377-2217(90)90057-I)

Santillán, S. y Vite, P. (2011). Interrelaciones urbanas alrededor de la quebrada La Raya en la ciudad de Quito. Tesis de grado. EPN/Quito.

Secretaría General de Seguridad y Gobernabilidad del Municipio Metropolitano de Quito. (2016). I fase: Diagnóstico de la situación actual de amenazas, vulnerabilidades y riesgos – Informe final. Dirección Metropolitana de Gestión de Riesgos.

<https://es.scribd.com/document/491527045/Informe-Final-Cuenca-Rio-Monjas-Texto-1-150>

Servicio Nacional de Gestión de Riesgos y Emergencias. (2020, 27 de noviembre). *Informe de Situación No. 02 - Eventos peligrosos, Río Monjas*. <https://www.gestionderiesgos.gob.ec/wp-content/uploads/2021/08/Informe-de-Situacion-No-02-Eventos-Monjas-27112020.pdf>

Shiferaw, H. M. (2021). *Study on the influence of slope height and angle on the factor of safety and shape of failure of slopes based on strength reduction method of analysis*. Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences, 10, 31. <https://doi.org/10.1186/s43088-021-00115-w>

Trenkamp, R., Kellogg, J., Freymueller, J. y Mora, H. (2002). Wide Plate Margin deformation, Southern Central America and Northwestern South America, CASA GPS observations. *Journal of South America Earth Science*, 15(2), 157–171.

Terzaghi, K., Peck, R. B., & Mesri, G. (1996). *Soil mechanics in engineering practice (3rd ed.)*. John Wiley & Sons.

Triola, M. F. (2018). *Elementary statistics (13th ed.)*. Pearson Education.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction. (2015). *Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015–2030*. Geneva: UNDRR. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>

Varnes, D. J. (1978). Slope movement types and processes. In R. L. Schuster & R. J. Krizek (Eds.), *Landslides: Analysis and control (Special Report 176, pp. 11–33)*. Transportation Research Board, National Academy of Sciences.

Villagómez, D. (2003). Evolución Plio-Cuaternaria del Valle Interandino Central en Ecuador (zona Quito - Guayllabamba - San Antonio de Pichincha) [Tesis de ingeniería]. Escuela Politécnica Nacional. [10.13140/RG.2.2.18366.43843](https://doi.org/10.13140/RG.2.2.18366.43843)

Zhou, X., Wen, H., Zhang, Y., Xu, J., & Zhang, W. (2022). Landslide susceptibility assessment using the certainty factor and deep neural network. *Frontiers in Earth Science*, 10, 1091560. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.1091560>

Anexos

Anexo A

Tabla A1

Resumen de calificación por variable de análisis

	Coordenadas (X/Y)		Variable Unidad	C1 #	C2 m	C3 Ton	C4 m	C5 °	C6 SUCS	C7 m	C8 m3/s	C9 m	C10 m2	LRI
Pto. 1	784640.7895	9998251.258	Medición	13	9.44978	1655.45775	18	41.04936	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	62.55 19	219.288279	192.158	12944.713	2.0270902 4
			Categorización	1	4	1	2	4	2	1	4	5	3	
Pto. 2	784476.5159	9998361.497	Medición	137	3.20127	19153.05957	31	38.78571	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	55.37 53	219.7252961	98.74203	5715.346	3.5897566 49
			Categorización	5	5	3	3	4	2	1	4	3	3	
Pto. 3	784537.3049	9998451.13	Medición	124	4.10244	19664.92494	24	52.85938	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	56.97 4	220.3683523	162.22413	11234.774	3.6712063 92
			Categorización	5	3	3	2	5	2	1	4	4	3	
Pto. 4	784636.5644	9998522.78	Medición	132	6.94049	18534.98286	27	47.15227	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	55.23 61	221.0313778	69.3174	4148.001	3.5340067 69
			Categorización	5	4	3	2	5	2	1	4	2	2	
Pto. 5	784729.0648	9998587.826	Medición	130	3.02204	19945.53909	19	42.87741	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	61.80 09	221.6121513	80.7464	8120.886	3.4760693 97
			Categorización	5	5	3	2	4	2	1	4	2	3	
Pto. 6	784809.4235	9998509.135	Medición	77	22.6146	11455.29261	13	31.64832	ML, MH	9.757 5	221.9464577	78.86217	507.262	2.8269151 23
			Categorización	3	3	2	1	4	3	4	4	2	1	

Coordenadas (X/Y)		Variable Unidad	C1 #	C2 m	C3 Ton	C4 m	C5 °	C6 SUCS	C7 m	C8 m3/s	C9 m	C10 m2	LRI
Pto. 7	785010.3816	9998774.27	Medición	60	2.58952	8602.0119	24	40.20222	19.82 61	223.269257	144.38142	1164.189	2.9325120 74
			Categorización	3	5	2	2	4	2	3	4	4	2
Pto. 8	784823.6663	9998749.506	Medición	192	2.23364	29803.16666	20	58.03832	55.00 64	222.9075359	190.23268	15734.35204	3.9203414 38
			Categorización	5	5	4	2	5	2	1	4	5	4
Pto. 9	785022.1084	9998804.97	Medición	56	0	9391.208301	28	71.43489	22.58 76	223.9225599	148.16089	897.66041	3.0401645 28
			Categorización	3	5	2	2	5	2	3	4	4	1
Pto. 10	784839.8751	9998909.687	Medición	137	0	23980.71158	28	75.63069	26.89 15	224.7103691	169.08434	2330.867	4.1188036 13
			Categorización	5	5	4	2	5	3	3	4	5	2
Pto. 11	784951.1393	9999046.335	Medición	61	43.75606	9961.46172	20	52.86378	27.24 78	225.4432304	200.21843	275.595	2.9731038 62
			Categorización	3	3	2	2	5	2	3	4	5	1
Pto. 12	785056.4683	9999025.827	Medición	34	10.03191	2811.03264	7	54.64222	16.87 92	225.8936742	131.66977	488.229	2.4380285 48
			Categorización	2	4	1	1	5	2	3	4	4	1
Pto. 13	785095.5767	9999127.453	Medición	23	29.18687	3788.99181	15	52.18117	16.22 49	226.1676558	92.89331	0	2.1278090 83
			Categorización	1	3	1	2	5	2	3	4	2	1
Pto. 14	785199.2516	9998979.726	Medición	36	1.09571	3078.94653	31	67.88231	3.602 4	226.9179561	147.5875	739.566	2.8130146 48
			Categorización	2	5	1	3	5	2	5	4	4	1

	Coordenadas (X/Y)		Variable Unidad	C1 #	C2 m	C3 Ton	C4 m	C5 °	C6 SUCS	C7 m	C8 m3/s	C9 m	C10 m2	LRI
Pto. 15	785355.7266	9998995.206	Medición	24	1.07133	4747.01319	49	73.43237	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	8.536	228.4798991	272.71462	949.864	2.486983251
			Categorización	1	5	1	3	5	2	4	4	5	1	
Pto. 16	785369.3754	9999040.668	Medición	90	3.18825	20954.23284	44	64.94604	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	88.5005	229.7009715	193.52812	165.85255	3.65633942
			Categorización	4	5	4	3	5	2	1	4	5	1	
Pto. 17	785503.2309	9999142.095	Medición	74	24.36118	21287.05403	46	60.32661	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	77.0068	230.3491052	152.6313	5364.97863	3.292947705
			Categorización	3	3	4	3	5	2	1	4	4	3	
Pto. 18	785375.5541	9999302.993	Medición	98	19.70178	16938.14728	30	65.5031	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	38.5496	230.3100456	171.87128	80.25624	3.444207006
			Categorización	4	3	3	3	5	2	2	4	5	1	
Pto. 19	785613.4807	9999244.944	Medición	25	9.5231	6595.97373	30	60.68962	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	92.9371	231.2343343	168.80869	9570.033	2.709909138
			Categorización	2	4	2	3	5	2	1	4	5	3	
Pto. 20	785682.1915	9999446.006	Medición	35	5.40763	2853.36423	38	68.46766	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	42.7432	231.7523725	83.65032	1978.824	2.47735285
			Categorización	2	4	1	3	5	2	2	4	2	2	
Pto. 21	785492.901	9999410.34	Medición	109	5.5847	25318.19538	49	60.41129	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	38.0366	231.2497399	180.48963	41.08	3.687942092
			Categorización	4	4	4	3	5	2	2	4	5	1	
Pto. 22	785530.9106	9999525.706	Medición	43	8.99884	15319.81391	55	45.52468442	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM,	65.8613	232.2968987	131.31084	2706.624	2.848814099

	Coordenadas (X/Y)	Variable Unidad	C1 #	C2 m	C3 Ton	C4 m	C5 °	C6 SUCS	C7 m	C8 m3/s	C9 m	C10 m2	LRI
								GP-GC, GW-GC, GC-GM 2					
		Categorización	2	4	3	3	5	2	1	4	4	2	
Pto. 23	785576.1655 9999619.158	Medición	18	45.92246	2416.39542	63	60.32369	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM 2	15.74 73	232.7261705	58.93014	251.06	2.1767573 4
		Categorización	1	3	1	3	5	2	3	4	1	1	
Pto. 24	785627.1856 9999726.008	Medición	5	15.48014	0	68	56.26748	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM 2	15.29 9	233.1423768	123.50305	841.124	2.2414963 36
		Categorización	1	3	1	3	5	2	3	4	3	1	
Pto. 25	785812.777 9999974.848	Medición	2	4.10471	0	78	37.29157	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM 2	34.39 57	234.4203306	417.92661	10984.564	2.3207585 86
		Categorización	1	5	1	4	4	2	2	4	5	3	
Pto. 26	785596.5874 9999846.298	Medición	47	26.67382	8158.02741	63	66.68366	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM 2	64.01 23	234.4276129	195.07079	1083.428	2.6374485 11
		Categorización	2	3	2	3	5	2	1	4	5	2	
Pto. 27	785582.3927 10000052.45	Medición	10	33.31807	403.41204	44	64.32277	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM 2	48.31 15	235.3160708	206.26658	0	2.2746330 47
		Categorización	1	3	1	3	5	2	2	5	5	1	
Pto. 28	785647.3909 10000262.33	Medición	3	33.68822	0	23	54.58172	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM 2	32.84 36	236.5320345	61.89186	0	2.0962067 98
		Categorización	1	3	1	2	5	2	2	5	2	1	
Pto. 29	785684.0763 10000328.72	Medición	6	48.10692	0	19	53.54631	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM 2	11.54 19	237.1386364	69.95401	0	2.2588423 07
		Categorización	1	3	1	2	5	2	4	5	2	1	

Coordenadas (X/Y)		Variable Unidad	C1 #	C2 m	C3 Ton	C4 m	C5 °	C6 SUCS	C7 m	C8 m3/s	C9 m	C10 m2	LRI
Pto. 30	785772.6784	10000334.16	Medición	5	3.97142	0	23	39.96598	9.631 9	237.1457829	40.80946	0	2.1955049 74
			Categorización	1	5	1	2	4	2	4	5	1	1
Pto. 31	785813.6264	10000449.38	Medición	5	1.07468	0	31	44.03003	57.30 69	238.4239273	184.97539	0	2.1623474 58
			Categorización	1	5	1	3	4	2	1	5	5	1
Pto. 32	785695.0631	10000431.85	Medición	7	20.56761	39.27267	26	45.34373	12.11 47	237.8293618	72.80919	0	2.2588423 07
			Categorización	1	3	1	2	5	2	4	5	2	1
Pto. 33	785867.3722	10000688.54	Medición	1	278.87586	0	45	66.858	16.24 41	239.0417098	36.83031	19.105	2.1270426 44
			Categorización	1	1	1	3	5	2	3	5	1	1
Pto. 34	785893.782	10000712.47	Medición	1	244.12104	0	65	69.23715	25.33 18	239.1431181	51.28464	243.347	2.1270426 44
			Categorización	1	1	1	3	5	2	3	5	1	1
Pto. 35	785930.8599	10000694.03	Medición	0	286.05382	0	34	62.04633	18.45 48	239.2748055	34.61838	0	2.1270426 44
			Categorización	1	1	1	3	5	2	3	5	1	1
Pto. 36	785991.364	10000483.83	Medición	2	0.71981	0	66	43.39367	44.29 07	239.6070346	118.41603	0	2.1789262 16
			Categorización	1	5	1	3	4	2	2	5	3	1
Pto. 37	786079.6945	10000527.73	Medición	2	2.29769	0	74	41.53211	43.03 73	239.7887738	92.72492	0	2.2278744 73

Coordenadas (X/Y)		Variable Unidad	C1 #	C2 m	C3 Ton	C4 m	C5 °	C6 SUCS	C7 m	C8 m3/s	C9 m	C10 m2	LRI
Pto. 38	786094.5511	10000597.58	Categorización	1	5	1	4	4	2	5	2	1	2.2421315 61
			Medición	2	30.22363	0	80	40.710905	21.13 19	239.9614006	116.97883	0	
Pto. 39	786118.08	10000777.44	Categorización	1	3	1	4	4	2	5	3	1	2.0290141 44
			Medición	0	164.92876	0	31	42.55855	15.17 3	241.3131295	71.2141	0	
Pto. 40	786208.8549	10000834.62	Categorización	1	1	1	3	4	2	5	2	1	2.3228144 77
			Medición	1	140.54701	0	66	54.30993	8.977 1	241.6999486	97.71067	0	
Pto. 41	786039.0839	10000902.02	Categorización	1	2	1	3	5	2	5	3	1	2.3771626 94
			Medición	0	165.58628	0	85	47.98028	9.194 1	241.7414172	118.78609	3140.248	
Pto. 42	786295.58	10000933.69	Categorización	1	1	1	4	5	2	5	3	2	2.2091272 25
			Medición	1	116.21129	0	91	65.97995	31.79 65	242.5329055	68.17095	0	
Pto. 43	786145.58	10001002.44	Categorización	1	2	1	4	5	2	5	2	1	2.1594121 42
			Medición	0	234.3137	0	67	46.49103	23.93 58	242.2071669	63.92485	938.738	
Pto. 44	786180.58	10001037.44	Categorización	1	1	1	3	5	2	5	2	1	2.1103318 98
			Medición	0	256.2832	0	73	40.38633	23.25 79	242.4833615	89.28514	874.397	
			Categorización	1	1	1	4	4	2	5	2	1	

Coordenadas (X/Y)			Variable Unidad	C1 #	C2 m	C3 Ton	C4 m	C5 °	C6 SUCS	C7 m	C8 m3/s	C9 m	C10 m2	LRI
Pto. 45	786372.6729	10000990.43	Medición	1	64.36515	0	83	59.46963	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	33.31 69	242.7679507	98.86436	0	2.2414967 23
			Categorización	1	2	1	4	5	2	2	5	3	1	
Pto. 46	786274.6349	10001064.15	Medición	0	355.56584	0	73	72.37019	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	20.34 03	242.9686166	68.96526	0	2.2407298 97
			Categorización	1	1	1	4	5	2	3	5	2	1	
Pto. 47	786406.3327	10001055.38	Medición	1	42.34008	0	86	50.09018	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	8.781 4	243.1165514	65.91079	0	2.4214778 16
			Categorización	1	3	1	4	5	2	4	5	2	1	
Pto. 48	786437.2467	10001142.44	Medición	1	32.52147	0	99	50.83405	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	10.81 77	243.3798199	79.202	0	2.4214778 16
			Categorización	1	3	1	4	5	2	4	5	2	1	
Pto. 49	786269.1402	10001238.26	Medición	1	338.82628	0	94	57.944235	ML, MH	8.602	243.7052733	94.57077	1787.054	2.4261109 5
			Categorización	1	1	1	4	5	3	4	5	2	2	
Pto. 50	786272.2467	10001297.44	Medición	0	340.95317	0	100	63.24692	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	11.45 86	244.0928725	84.56346	806.009	2.3220476 51
			Categorización	1	1	1	4	5	2	4	5	2	1	
Pto. 51	786487.0256	10001346.29	Medición	1	36.55286	0	105	46.94872	ML, MH	20.61 3	244.2720976	132.962125	14072.081	2.5317079
			Categorización	1	3	1	4	5	3	3	5	4	3	
Pto. 52	786270.58	10001492.44	Medición	0	305.9108	0	118	58.28047	ML, MH	24.57 82	244.7871304	171.33054	1367.223	2.4419016 9
			Categorización	1	1	1	4	5	3	3	5	5	2	
Pto. 53	786516.6935	10001439.12	Medición	1	48.61469	0	102	40.802195	ML, MH	22.05 57	245.0225166	107.765515	11072.845	2.3689404 04
			Categorización	1	3	1	4	4	3	3	5	3	3	
Pto. 54	786321.83	10001582.44	Medición	0	407.79378	0	117	63.7888	ML, MH	12.20 19	245.3470014	139.66863	1534.917	2.4908499 46
			Categorización	1	1	1	4	5	3	4	5	4	2	
Pto. 55	786570.5548	10001587.79	Medición	1	60.9271	0	98	58.05196	ML, MH	29.29 62	245.646992	193.4367	13755.878	2.5143623 16
			Categorización	1	2	1	4	5	3	3	5	5	3	

Coordenadas (X/Y)		Variable Unidad	C1 #	C2 m	C3 Ton	C4 m	C5 °	C6 SUCS	C7 m	C8 m3/s	C9 m	C10 m2	LRI	
Pto. 56	786598.9926	10001783.15	Medición	1	74.81482	0	111	52.42739	ML, MH	26.94 18	246.3330705	183.48969	16798.239	2.5371078 61
			Categorización	1	2	1	4	5	3	3	3	5	5	4
Pto. 57	786400.58	10001842.44	Medición	0	447.51849	0	118	67.97582	ML, MH	18.82 69	246.5375242	228.8273	711.73	2.4191561 46
			Categorización	1	1	1	4	5	3	3	3	5	5	1
Pto. 58	786535.9561	10002011.89	Medición	0	193.97206	0	30	40.61875	ML, MH	76.85 83	247.2203592	90.23444	0	1.9476963 89
			Categorización	1	1	1	3	4	3	1	1	5	2	1
Pto. 59	786585.58	10002117.44	Medición	1	111.70653	0	132	77.6576	ML, MH	114.3 509	247.7224522	128.02132	0	2.3228144 77
			Categorización	1	2	1	5	5	3	1	1	5	3	1
Pto. 60	786725.58	10002072.44	Medición	1	115.03202	0	151	72.78307	ML, MH	50.13 34	247.9877099	96.14236	0	2.3228144 77
			Categorización	1	2	1	5	5	3	1	1	5	3	1
Pto. 61	786640.58	10002192.44	Medición	1	151.53129	0	158	70.79116	ML, MH	62.81 72	248.2912422	57.45717	0	2.2083603 99
			Categorización	1	1	1	5	5	3	1	1	5	1	1
Pto. 62	786613.1324	10002282.65	Medición	2	85.9981	0	176	65.56924	ML, MH	33.19 33	248.5175176	102.764395	853.093	2.4041322 32
			Categorización	1	2	1	5	5	3	2	2	5	3	1
Pto. 63	786698.4449	10002474.38	Medición	1	89.8511	0	241	69.02165	ML, MH	80.72 76	249.2724078	282.7072	0	2.3875534 74
			Categorización	1	2	1	5	5	3	1	1	5	5	1
Pto. 64	787020.58	10002570.77	Medición	0	392.10586	0	164	71.29185	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	105.2 264	250.5425736	150.84091	782.738	2.2241511 39
			Categorización	1	1	1	5	5	2	1	1	5	4	1
Pto. 65	787128.633	10002397.63	Medición	0	498.49136	0	147	69.87285	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	21.48 32	250.2272554	77.86077	6094.902	2.3675387 4
			Categorización	1	1	1	5	5	2	3	3	5	2	3
Pto. 66	787279.3279	10002370.83	Medición	0	286.57403	0	254	50.617365	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	31.51 67	250.7730652	142.398535	26110.004	2.3737055 26
			Categorización	1	1	1	5	5	2	2	2	5	4	4
Pto. 67	787320.0648	10002465.64	Medición	0	354.78681	0	203	55.04719	SM, SC, SW-SM, SP-SM, SW-SC, SP-SC, SC-SM, GM, GC, GW-GM, GP-GM, GP-GC, GW-GC, GC-GM	25.22 69	251.1680702	263.67941	16387.202	2.4873927 78
			Categorización	1	1	1	5	5	2	3	3	5	5	4

Nota. Se presentan la medida cualitativa de cada variable de estudio y además su correspondiente categoría, finalmente su calificación final ponderada con los pesos considerados por los autores. Elaboración de los autores.

Anexo B

Vuelo sobre taludes 8, 9 y 10

Figura B1

Ortofoto del primer vuelo realizado sobre taludes 8, 9 y 10



Nota. Elaboración de los autores.

Vuelo Sobre Taludes 16, 17 Y 18

Figura B2

Ortofoto del primer vuelo realizado sobre taludes 16, 17 y 18



Nota. Elaboración de los autores.

Anexo C

Resultados de clasificación de Manual Visual de muestras

Tabla C1

Resultados de la clasificación Manual-Visual en la campaña de campo

N°	MUESTRA				Color	GRANOS TEXTURA				RESISTENCIA EN ESTADO SECO				DILATANCIA				TENACIDAD				OLOR	IDENTIFICACIÓN
	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Talud	Altura		Rugosa	Harina	Talco	Jabonosa	Nula	Baja	Media	Alta	Nula	Baja	Media	Alta	Nula	Baja	Media	Alta		
1	784843,01	9998566,98	6	Cresta	Café	X				X				X				X			No	SM-ML	
2	784985,26	9998758,37	7	Cresta abajo Cancha	Blanco		X			X				X				X			No	ML	
3	785002,58	9998763,04	7	Cresta arriba cancha	Blanco	X				X				X				X			No	SM-ML	
4	784963,33	9998749,44	7	Mitad	Blanco		X			X				X				X			No	ML	
5	784964,55	9998767,71	7	Base	Café-rojizo			X		X				X				X			No	ML	
6	784863,22	9998852,29	8	Cresta	Blanco	X					X				X			X			No	ML	
7	785050,19	9998855,08	9	Cresta	Café-blanco		X			X						X		X			No	ML	
8	785029,02	9998839,8	9	Base	Café	X				X				X				X			No	ML	
9	784845,55	9998944,22	10	Cresta	Café		X				X			X					X		No	MH	
10	785047,71	9998992,66	12	Cresta	Blanco		X			X						X		X			No	ML	
11	785529,98	9999165,67	17	Cresta	Café-Blanco		X			X					X				X		No	ML	
12	785612,63	9999727,14	24	Cresta	Café-Blanco	X				X				X					X		No	SM-ML	
13	785850,72	9999732,62	25	Cresta	Blanco	X				X					X				X		No	SM-ML	

Nota. Se presenta la clasificación realizada en los distintos puntos de análisis, con sus coordenadas de extracción y el resultado obtenido en base a la clasificación expuesta en el marco teórico. Elaboración de los autores.

Figura C2

Imagen representativa de la Prueba de Resistencia en Seco realizada en campo



Nota. Elaboración de los autores.

Figura C2

Imagen representativa de la Prueba de Dilatancia realizada en campo



Nota. Elaboración de los autores.

Figura C3

Imagen representativa de la Prueba de Tenacidad realizada en campo



Nota. Elaboración de los autores.

Anexo D

Resultados y Procedimientos de los Ensayos de Laboratorio

Tabla D1

Resultados de procedimiento de los ensayos de Laboratorio

#	Coordenada X (m)	Coordenada Y (m)	Talud	Altura	%Gravas	%Arenas	%Finos	%Humedad	IP	Cc	Cu	SUCS
1	784843,01	9998566,98	6	Cresta	2,49%	41,39%	56,12%	11%	1	1,47	10,88	Limo arenoso (ML)
2	784985,26	9998758,37	7	Cresta abajo Cancha	0,98%	83,56%	15,46%	3%	NP	0,58	34,97	Arena Limosa (SM)
3	785002,58	9998763,04	7	Cresta arriba cancha	4,77%	62,34%	32,89%	10,00%	NP	0,63	34,76	Arena Limosa (SM)
4	784963,33	9998749,44	7	Mitad	3,65%	72,58%	23,78%	9,00%	NP	0,60	34,46	Arena Limosa (SM)
5	784964,55	9998767,71	7	Base	6,50%	54,17%	39,33%	8,00%	NP	0,62	35,87	Arena Limosa (SM)
6	784863,22	9998852,29	8	Cresta	9,82%	67,28%	22,90%	2,00%	1	0,66	34,85	Arena Limosa (SM)
7	785050,19	9998855,08	9	Cresta	4,89%	73,02%	22,08%	4,00%	NP	0,60	34,79	Arena Limosa (SM)
8	785029,02	9998839,8	9	Base	20,23%	72,01%	7,76%	7,00%	NP	0,62	34,48	Arena pobremente gradada con Limo y grava (SP-SM)
9	784845,55	9998944,22	10	Cresta	3,98%	22,51%	73,51%	22,00%	4	0,61	35,00	Limo con arena (ML)
10	785047,71	9998992,66	12	Cresta	11,26%	62,29%	26,44%	3,00%	NP	0,59	34,00	Arena Limosa (SM)
11	785529,98	9999165,67	17	Cresta	1,55%	50,82%	47,63%	6,00%	NP	0,55	31,80	Arena Limosa (SM)
12	785612,63	9999727,14	24	Cresta	5,22%	72,64%	22,13%	4,00%	NP	0,58	33,46	Arena Limosa con Grava (SM)
13	785850,72	9999732,62	25	Cresta	16,78%	61,27%	21,95%	2,00%	NP	0,61	33,46	Arena Limosa (SM)
14	785796,25	10000437,41	31	Cresta	4,96%	76,21%	18,83%	13,00%	NP	0,58	33,21	Arena Limosa (SM)
15	786104,15	10000599,4	38	Cresta	0,00%	83,76%	16,24%	4,00%	NP	0,61	34,74	Arena Limosa (SM)
16	786069,93	10001243,32	50	Cresta	4,12%	62,65%	33,23%	8,00%	NP	1,47	10,88	Arena Limosa (SM)

Nota. Elaboración de los autores.

Figura D1

Imagen que ejemplifica el proceso de pesado, luego de haber realizado el tamizado por lavado



Nota. Elaboración de los autores.

Figura D2

Imagen que ejemplifica el ensayo de laboratorio para obtener el Límite Líquido



Nota. Elaboración de los autores.

Figura D3

Imagen que ejemplifica el ensayo de laboratorio para obtener el Límite Plástico



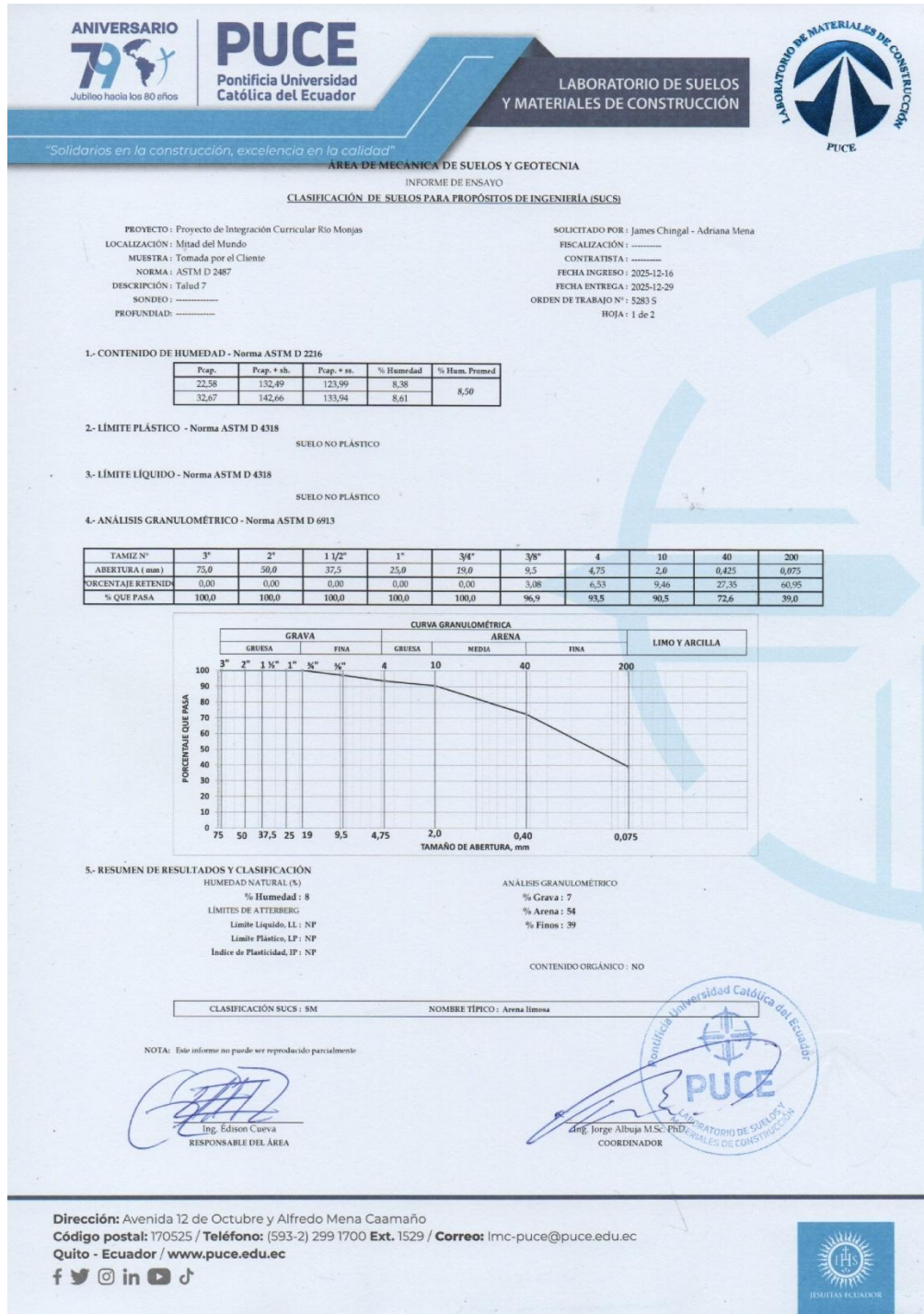
Nota. Elaboración de los autores.

Anexo E

Informes por Parte del Laboratorio PUCE

Figura E1

Informe sobre SUCS obtenido para el Talud 7



Nota. Informe entregado por parte del laboratorio de suelo de la PUCE

Anexo F

Evidencia del desgaste del talud más crítico

Figura F1

Casas que fueron afectadas por la erosión del talud



Nota. Diferentes perspectivas del talud 10, donde se aprecia el desgaste de este al igual que la afectación sobre una vivienda que antes se encontraba en su cresta. Elaboración de los autores.

Figura F2

Talud 10 al final del estudio



Nota. Esta imagen muestra como el talud 10 es aquel que presenta la mayor inestabilidad de los taludes analizados. Elaboración de los autores.