



# UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

---

**“Análisis de peligrosidad mediante simulaciones de movimientos de masas y estructuras de protección. Central Hidroeléctrica de Machupicchu, Machupicchu, Urubamba, Cusco, 2022”**

---

Línea de investigación: Desarrollo y uso de software en ingeniería civil.

Presentado por:

**Bach. Follana Peralta, Harold Cristian**

0009-0002-7496-8025

**Bach. Sallo Díaz, Irving Fernando**

0009-0005-9936-9557

Para Optar el Título Profesional de  
Ingeniero Civil

Asesor:

**Mg. Ing. José Alberto Montesinos Cervantes**

0000-0002-3256-7664

Cusco – Perú

2023



<b>Datos de los autores</b>	
Nombres y apellidos	Harold Cristian Follana Peralta Irving Fernando Sallo Díaz
Número de documento de identidad	72557519 71885959
URL de Orcid	<a href="https://orcid.org/0009-0002-7496-8025">https://orcid.org/0009-0002-7496-8025</a> <a href="https://orcid.org/0009-0005-9936-9557">https://orcid.org/0009-0005-9936-9557</a>
<b>Datos del asesor</b>	
Nombres y apellidos	José Alberto Montesinos Cervantes
Número de documento de identidad	25001820
URL de Orcid	<a href="https://orcid.org/0000-0002-3256-7664">https://orcid.org/0000-0002-3256-7664</a>
<b>Datos del jurado</b>	
<b>Presidente del jurado (jurado 1)</b>	
Nombres y apellidos	Elvis Yuri Mamani Vargas
Número de documento de identidad	41610570
<b>Jurado 2</b>	
Nombres y apellidos	Carmen Cecilia Gil Rodriguez
Número de documento de identidad	23877911
<b>Jurado 3</b>	
Nombres y apellidos	Nico Yheison Gonzalez Mamany
Número de documento de identidad	41604353
<b>Jurado 4</b>	
Nombres y apellidos	Kildare Jussety Ascue Escalante
Número de documento de identidad	45246758
<b>Datos de la investigación</b>	
Línea de investigación de la Escuela Profesional	Desarrollo y uso de software en ingeniería civil.



# Análisis de peligrosidad mediante simulaciones de movimientos de masas y estructuras de protección. Central Hidroeléctrica de Machupicchu

*por* Robert Milton Merino Yopez

---

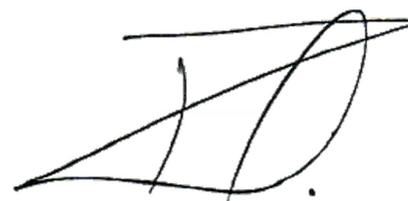
**Fecha de entrega:** 10-nov-2023 01:41p.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 2224091442

**Nombre del archivo:** T-CHM-FP-SD-45\_10-11-2023.pdf (5.15M)

**Total de palabras:** 22594

**Total de caracteres:** 128541





# UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL



TESIS

---

**“Análisis de peligrosidad mediante simulaciones de movimientos de masas y estructuras de protección. Central Hidroeléctrica de Machupicchu, Machupicchu, Urubamba, Cusco, 2022”**

---

Presentado por:

**Bach. Follana Peralta, Harold Cristian**

**Bach. Sallo Díaz, Irving Fernando**

**1**  
Para Optar el Título Profesional de Ingeniero Civil

Asesor:

**Mg. Ing. José Alberto Montesinos Cervantes**

Cusco – Perú

2023



# movimientos de masas y estructuras de protección. Central Hidroeléctrica de Machupicchu

## INFORME DE ORIGINALIDAD

20%

INDICE DE SIMILITUD

19%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

0%

TRABAJOS DEL  
ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="http://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	7%
2	<a href="http://repositorio.uandina.edu.pe">repositorio.uandina.edu.pe</a> Fuente de Internet	2%
3	<a href="http://repositorio.udh.edu.pe">repositorio.udh.edu.pe</a> Fuente de Internet	2%
4	<a href="http://repositorio.upt.edu.pe">repositorio.upt.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="http://repositorio.unsaac.edu.pe">repositorio.unsaac.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%
6	GRUPO G Y A SOLUCIONES GEOAMBIENTALES SOCIEDAD ANONIMA CERRADA - GRUPO G Y A SAC. "Actualización del PMA del Proyecto Rehabilitación II Fase Central Hidroeléctrica Machupicchu- IGA0002870", Oficio N° 1704-2009-MEM/AAE, 2020 Publicación	1%

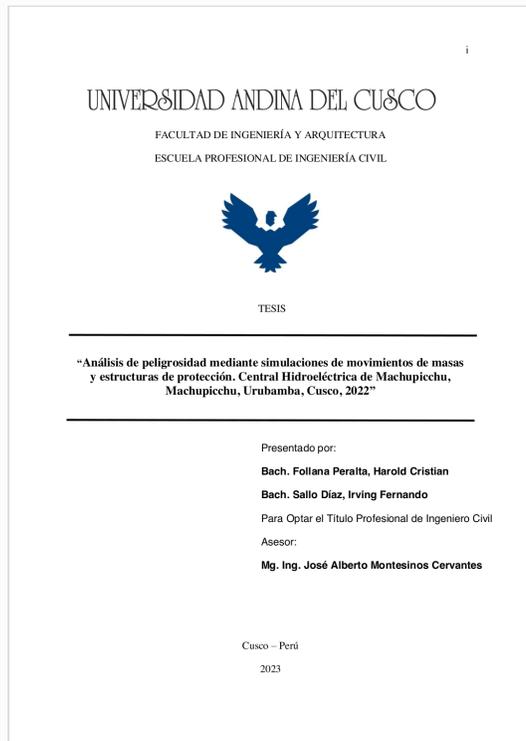


## Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por **Turnitin**. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega: Robert Milton Merino Yopez  
Título del ejercicio: tesis  
Título de la entrega: Análisis de peligrosidad mediante simulaciones de movimie...  
Nombre del archivo: T-CHM-FP-SD-45\_10-11-2023.pdf  
Tamaño del archivo: 5.15M  
Total páginas: 134  
Total de palabras: 22,594  
Total de caracteres: 128,541  
Fecha de entrega: 10-nov.-2023 01:41p. m. (UTC-0500)  
Identificador de la entre... 2224091442





## DEDICATORIA

Dedico este trabajo a mis maravillosos padres Francisco y Graciela a quienes agradezco su constante apoyo frente a las dificultades.

A mi hermana Jackeline Idania, que gracias a su paciencia e increíble vocación de servicio estuvo para mí cuando más lo necesitaba.

A mi abuela Paula que está en el cielo, a mis abuelos Roberto y Alejandrina y mis tíos Abel y Manuel Alberto quienes siempre estaban atentos a mis estudios.

Al Ingeniero David Baumann quien me brinda sabios consejos dentro y fuera de la universidad.

A mis amigos de la infancia: Fred, Neil, Jair, Eduardo, Julio, Jairo, Gerald y Gonzalo quienes están ahí siempre, en los buenos y malos momentos.

A Ana, mi amiga de toda la vida.

A mis amigos de la universidad: Josué, Antonio, Dayana, José, Wily, Asdrubal, Nuria y Hugo quienes fueron mi apoyo fundamental en los estudios y la vida universitaria.

Irving Fernando Sallo Díaz



## Dedicatoria

Este trabajo está dedicado a mi familia en particular a mis padres Verónica y Eileen a quienes agradezco su apoyo a lo largo de toda mi vida.

A mi abuela Hermila, a mi Hermana Estephany, a mi tía Regia y a mi tío Víctor Hugo que están en el cielo, a mis abuelos Nazario, Jesús y María y mis tíos Mercedes, Yoni, Neysha y Antonio quienes siempre me apoyaron en las dificultades.

A mis profesores: Renan, Walter, Miguel, Liz, Marcela, Henry, Fernando, Washington, que siempre me guiaron por el buen camino y con su ejemplo.

A mis primos: Rocio, Emilia, Kiara, Diego, Jocelyne, Fabrizio, Johan, Isaac quienes siempre están en las buenas y malas.

A mis amigos: Ricardo, Majo, Karito, Melanie, Josué, Aroon, Luis, Rodrigo, July, Alejandra, Nicole, Daniela, Camila, quienes fueron mi apoyo fundamental en toda mi vida universitaria.

Harold Cristian Follana Peralta



## AGRADECIMIENTOS

A Dios y a nuestro santo patrono San Francisco de Asís, por bendecirnos con salud y esta amistad de más de 20 años que nos ha permitido realizar esta investigación.

A nuestras familias, en especial a nuestros padres quienes nos brindaron el apoyo necesario en todo momento a lo largo de nuestras vidas.

A nuestro asesor de tesis el ingeniero José Alberto Montesinos, por el aporte de su conocimiento, su constante apoyo y motivación durante todo el proceso de esta investigación.

A la Universidad Andina del Cusco y la Escuela Profesional de Ingeniería Civil, por ser nuestra alma mater y lugar de nuestra formación profesional como ingenieros civiles.

A la Asociación Nacional de Estudiantes de Ingeniería Civil (ANEIC) de Perú, la Asociación Latinoamericana Estudiantil de Ingeniería Civil (ALEIC) y el Centro Cultural Pukara por complementar nuestra formación universitaria para llegar a ser profesionales íntegros.

A todos nuestros amigos y compañeros en todos estos años de aprendizaje.

A todos los que estuvieron involucrados en la realización de este proyecto



## RESUMEN

En esta investigación se evaluaron las obras de protección planteadas por EGEMSA a partir de la peligrosidad del área identificada como susceptible a la ocurrencia de deslizamientos en el sector 1 del proyecto “Obras de protección del patio de llaves de la central hidroeléctrica Machupicchu” ubicada en el distrito de Machupicchu de la provincia de Urubamba.

La metodología consistió en caracterizar geotécnicamente al talud del sector 1 en el cerro El Calvario, evaluar su estabilidad mediante una simulación de los movimientos de masa presentes, luego se procedió a estimar la peligrosidad frente a deslizamientos en la zona mediante el análisis jerárquico. Por lo que se consideró los factores condicionantes del área de estudio (geología, geomorfología y pendientes) y como factor desencadenante un porcentaje de las precipitaciones en el lugar en relación a su normal climatológico (escenario promedio de condiciones meteorológicas del lugar). Luego se procedió a evaluar las estructuras de protección propuestas por la empresa EGEMSA para estabilizar el talud del sector 1 del proyecto con criterio de estados límites tanto estado límite de servicio (Cuando la estructura ya no cumple con su función) como el estado límite último (Cuando la estructura colapsa).

En el análisis de los resultados se logró determinar que el área tiene una muy alta peligrosidad a la ocurrencia de deslizamientos, se determinó que el talud más crítico tiene  $FS=0.426$ , este talud es el que se está tratando de reforzar con las obras de protección, se determinó que las obras de protección refuerzan el talud, pero solo en su área de influencia, en el área de influencia el  $FS=0.691$  aumenta considerablemente por el gavión a  $FS=5.587$ . Por último, se determinó las obras de protección no cumplen con su finalidad de brindar seguridad por lo que se plantea una alternativa de estructuras que si cumplen con el criterio.

Palabras clave: Peligrosidad, deslizamientos, estabilización, taludes, obras de protección, factor de seguridad, normal climatológico, estado límite de servicio, estado límite último.



## ABSTRACT

In this investigation, the protection works proposed by EGEMSA were evaluating based on the danger of the area identified as susceptible to the occurrence of landslides in sector 1 of the project "Protection works of the key yard of the Machupicchu hydroelectric power plant" in the district from Machupicchu, province of Urubamba. The methodology consisted of geotechnically characterizing the slope of sector 1 on El Calvario hill; to evaluate its stability by means of a simulation of the present mass movements, then proceeded to estimate the danger of landslides in the area by means of the hierarchical analysis process. For this, the conditioning factors of the study area (geology, geomorphology and slopes) were considered and as triggering factor abnormal rainfall with a percentage in relation to its climatological standard normal (average scenario of meteorological conditions of the place). Then, the protection structures proposed by the company EGEMSA to stabilize the slope of sector 1 of the project were evaluating with criteria of serviceability limit state (SLS) (When the structure no longer fulfills its function) and the ultimate limit state (ULS) (When the structure collapses). In the analysis of the results, was possible to determine that the area has a very high risk of landslides. It was determined that the most critical slope has  $FS = 0.426$ . This slope is the one that was reinforcing with the protection works. It was determined that the protection works reinforce the slope, but only in its area of influence, in the area of influence the  $FS=0.691$  increases considerably by the gabion to  $FS=5.587$ . Finally, it was determined that the protection works do not meet their purpose of providing security, so an alternative of structures that do meet the criteria is proposed.

Keywords: Danger, landslides, stabilization, slopes, protection works, safety factor, climatological standard normal, serviceability limit state, ultimate limit state.



## INTRODUCCIÓN

La presente investigación cuyo título es: “Análisis de peligrosidad mediante simulaciones de movimientos de masas y estructuras de protección. Central Hidroeléctrica de Machupicchu, Machupicchu, Urubamba, Cusco, 2022”. Buscó realizar el modelamiento de movimiento de masas que generan peligro a las estructuras de contención presente en la zona del patio de llaves de la central hidroeléctrica Machupicchu para determinar si las obras de protección son estables en el tiempo con lo que respecta a dichos movimientos de masas.

Con el modelamiento de movimiento de masas en la zona del patio de llaves de la central hidroeléctrica Machupicchu, el objetivo principal de esta investigación fue modelar, simular y analizar los movimientos de masas presentes en el sector 1 de la zona del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu, y su impacto en las obras de protección proyectadas en la zona del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu. Se pudo observar que la zona del patio de llaves de la central hidroeléctrica es afectada constantemente por deslizamientos producto de las constantes lluvias en el lugar, lo que causa una gran preocupación a la empresa, debido a que existe el riesgo de que personal, equipos y la normal operación de la central hidroeléctrica sean seriamente afectados, siendo necesario verificar si las obras proyectadas cumplen su función eficientemente.

Se espera que la información obtenida en la presente investigación pueda ser utilizada para calcular la estabilidad de taludes por el método usado, estimar la peligrosidad frente a deslizamientos en diferentes zonas del país así también se pueda seguir evaluando el diseño de obras de protección mediante el criterio utilizado.



## ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iv
RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
INTRODUCCIÓN	vii
ÍNDICE GENERAL	viii
ÍNDICE DE FIGURAS	xiv
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Identificación del problema.....	1
1.1.1. Descripción del Problema.....	1
1.1.2. Formulación interrogativa del problema.....	4
1.2. Justificación de la investigación.....	5
1.2.1. Justificación técnica.....	5
1.2.2. Justificación social.....	5
1.2.3. Justificación por viabilidad.....	5
1.2.4. Justificación por relevancia.....	5
1.3. Limitaciones de la investigación.....	6
1.3.1. Limitación de lugar.....	6
1.3.2. Limitación del Estudio.....	6
1.4. Objetivos.....	7
1.4.1. Objetivo general.....	7
1.4.2. Objetivos específicos.....	7
2. MARCO TEÓRICO DE LA TESIS	9
2.1. Antecedentes de la tesis.....	9
2.1.1. Antecedentes a nivel nacional.....	9
2.1.2. Antecedentes a nivel internacional.....	13



2.2.	Aspectos teóricos pertinentes .....	14
2.2.1.	Taludes.....	14
2.2.2.	Nomenclatura de un talud o ladera.....	14
2.2.3.	Clasificación de taludes .....	16
2.2.4.	Nomenclatura de los procesos de movimiento .....	17
2.2.5.	Componentes de un movimiento de masa .....	18
2.2.6.	Etapas en el proceso de falla. ....	20
2.2.7.	Inestabilidad de laderas.....	20
2.2.8.	Los fenómenos de inestabilidad de laderas.....	20
2.2.9.	Clasificación de la inestabilidad de laderas. ....	22
2.2.10.	Factores que determinan la inestabilidad de laderas.....	23
2.2.11.	Peligrosidad .....	26
2.2.12.	Uso de software en la simulación de movimientos de masa.....	27
2.2.13.	Geología presente en la zona de estudio .....	29
2.2.14.	Geomorfología presente en la zona de estudio.....	31
2.3.	Hipótesis.....	32
2.3.1.	Hipótesis general .....	32
2.3.2.	Sub hipótesis .....	32
2.4.	Variables e indicadores .....	33
2.4.1.	Variables independientes .....	33
2.4.2.	Variables dependientes .....	34
2.4.3.	Cuadro de Operación de variables .....	37
3.	METODOLOGÍA .....	41
3.1.	3.1. Metodología de investigación.....	41
3.1.1.	Enfoque de la investigación.....	41
3.1.2.	Nivel de la investigación.....	41



3.1.3.	Método de investigación.....	41
3.2.	Diseño de la investigación.....	41
3.2.1.	Diseño metodológico.....	41
3.2.2.	Diseño de ingeniería.....	42
3.3.	Población y muestra.....	43
3.3.1.	Población.....	43
3.3.2.	Muestra.....	43
3.3.3.	Criterios de inclusión.....	44
3.4.	Instrumentos.....	44
3.4.1.	Instrumentos de recolección de datos.....	44
3.4.2.	Instrumentos de ingeniería.....	49
3.5.	Procedimientos de recolección de datos.....	52
3.5.1.	Recolección de datos para análisis mecánico de suelos.....	52
3.6.	Procedimientos de análisis de datos.....	56
3.6.1.	Título de la prueba o procedimiento.....	56
3.6.2.	Análisis del talud.....	62
3.6.3.	Altura del talud:.....	64
3.6.4.	Profundidad del talud.....	64
3.6.5.	Distancia inclinada del talud.....	65
3.6.6.	Pendiente del talud.....	65
3.6.7.	Longitud de pie del talud.....	65
3.6.8.	Perímetro.....	65
3.6.9.	Área.....	65
3.6.10.	Angulo de fricción.....	65
3.6.11.	Cohesión.....	65
3.6.12.	Peso específico.....	66



3.6.13.	Tipo de suelo .....	66
3.6.14.	Movimientos de masa presente.....	66
3.6.15.	Evaluación de estabilidad del talud .....	66
3.6.16.	Análisis de estabilidad zona: .....	66
3.6.17.	Análisis de estabilidad de cada talud: .....	68
3.6.18.	Análisis de estabilidad con el gavión inicial: .....	70
3.6.19.	Análisis de estabilidad con el gavión de la propuesta: .....	73
4.	RESULTADOS .....	77
4.1.	Resultados del talud .....	77
4.1.1.	Análisis del talud:.....	77
4.1.2.	Análisis de estabilidad con el gavión inicial:.....	77
4.1.3.	Análisis de estabilidad con el gavión de la propuesta: .....	78
4.1.4.	Determinación de peligro por deslizamiento en el talud del sector 1 .....	79
4.1.5.	Análisis del factor desencadenante.....	87
4.1.6.	Análisis del parámetro tiempo de retorno.....	89
4.1.7.	Mapa de peligro de deslizamientos .....	93
4.1.8.	Evaluación de obras de protección.....	94
5.	DISCUSIÓN .....	96
5.1.	Discusión N° 01 .....	96
5.2.	Discusión N° 02.....	96
5.3.	Discusión N° 03.....	96
5.4.	Discusión N° 04.....	97
5.5.	Discusión N° 05.....	97
5.6.	Discusión N° 06.....	99
	GLOSARIO .....	101
	CONCLUSIONES .....	102
	RECOMENDACIONES .....	104



REFERENCIAS

105

ANEXOS

108



## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operación de variables .....	37
Tabla 2 Cuadro comparativo de factores de seguridad .....	77
Tabla 3 Cuadro comparativo de factores de seguridad .....	78
Tabla 4 Factores de Susceptibilidad a deslizamientos .....	79
Tabla 5 Parámetro de evaluación .....	79
Tabla 6 Matriz de comparación de pares factores condicionantes .....	80
Tabla 7 Matriz de normalización de los pares de los factores condicionantes.....	80
Tabla 8 Descriptores pendientes .....	81
Tabla 9 Matriz de comparación de pares del parámetro pendiente .....	82
Tabla 10 Nota. Fuente: propia. ....	82
Tabla 11 Descriptores geomorfología .....	83
Tabla 12 Matriz de comparación de pares del parámetro geomorfología.....	84
Tabla 13 Matriz de normalización del parámetro geomorfología .....	84
Tabla 14 Descriptores geología .....	85
Tabla 15 Matriz de comparación de pares del parámetro geología .....	86
Tabla 16 Matriz de normalización del parámetro geología.....	86
Tabla 17 Descriptores precipitaciones anómalas.....	87
Tabla 18 Matriz de comparación de pares del parámetro precipitaciones anómalas.....	88
Tabla 19 Matriz de normalización del parámetro precipitaciones anómalas .....	88
Tabla 20 Descriptores tiempo de retorno .....	89
Tabla 21 Matriz de comparación de pares del parámetro tiempo de retorno .....	90
Tabla 22 Matriz de normalización del parámetro precipitaciones anómalas .....	90
Tabla 23 Resumen del análisis de peligro ante deslizamiento .....	91
Tabla 24 Análisis de susceptibilidad del territorio ante deslizamientos .....	92
Tabla 25 Rangos de peligrosidad ante deslizamientos.....	93
Tabla 26 Niveles de peligro ante deslizamientos.....	93



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Alud de Aobamba .....	1
Figura 2 Ubicación.....	3
Figura 3 Ubicación Sector 1 .....	3
Figura 4 Nomenclatura de taludes y laderas.....	15
Figura 5 Tipos de Taludes .....	16
Figura 6 Nomenclatura de un deslizamiento .....	17
Figura 7 Dimensiones de los movimientos en masa.....	18
Figura 8 Dimensiones de los movimientos en masa.....	19
Figura 9 Alteración de un suelo residual y de la roca basal .....	26
Figura 10 Mapa de geología en el área de estudio.....	31
Figura 11 Diseño de ingeniería.....	42
Figura 11 Formato Análisis Granulométrico.....	44
Figura 12 Formato Límites de Consistencia.....	45
Figura 13 Formato Corte Directo.....	46
Figura 14 Formato Contenido de Humedad .....	47
Figura 15 Formato Densidad in situ.....	48
Figura 16 GPS Garmin.....	49
Figura 17 Eclímetro.....	49
Figura 18 Brújula Brunton.....	49
Figura 19 Tamices.....	50
Figura 20 Tamices.....	50
Figura 21 Ranurador .....	50
Figura 22 Balanza .....	51
Figura 23 Horno .....	51
Figura 24 Recipiente .....	51
Figura 25 Ensayo granulométrico .....	56
Figura 26 Ensayo de límites de consistencia .....	57
Figura 27 Ensayo de corte directo .....	58
Figura 28 Ensayo de contenido de Humedad .....	60
Figura 29 Prueba de densidad in situ .....	61
Figura 30 Sector 01 .....	62
Figura 31 Talud N°1: P01 – P02.....	62



Figura 32 Talud N°2: P01 – P03.....	63
Figura 33 Talud N°3: P01 – P04.....	63
Figura 34 Talud N°4: P01 – P05.....	64
Figura 35 Estabilidad en el talud N°1: P01 – P02 .....	68
Figura 36 Estabilidad en el talud N°1: P01 – P03 .....	68
Figura 37 Estabilidad en el talud N°1: P01 – P04 .....	69
Figura 38 Estabilidad en el talud N°1: P01 – P05 .....	69
Figura 39 Modelamiento con gavión inicial.....	70
Figura 40 Modelamiento con gavión de la propuesta.....	73
Figura 41 Dimensiones gavión A .....	76
Figura 42 Dimensiones gavión B.....	76
Figura 43 Ubicación de los gaviones en el sector 01 .....	76
Figura 44 Mapa de pendientes en el área de estudio.....	81
Figura 46 Mapa de geomorfología en el área de estudio .....	83
Figura 46 Mapa de geología en el área de estudio.....	85
Figura 47 Mapa de Peligro ante deslizamientos .....	94
Figura 48 Presentación de resultados de desempeño de los gaviones .....	94
Figura 49 Resultados del análisis de estabilidad .....	95
Figura 50 Dimensiones gavión C.....	98
Figura 51 Ubicación de los gaviones propuestos en el sector 01 .....	98
Figura 52 Presentación de resultados de desempeño de los gaviones propuestos.....	99
Figura 53 Análisis de estabilidad de los gaviones propuestos.....	99



## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1. Identificación del problema

#### 1.1.1. Descripción del Problema

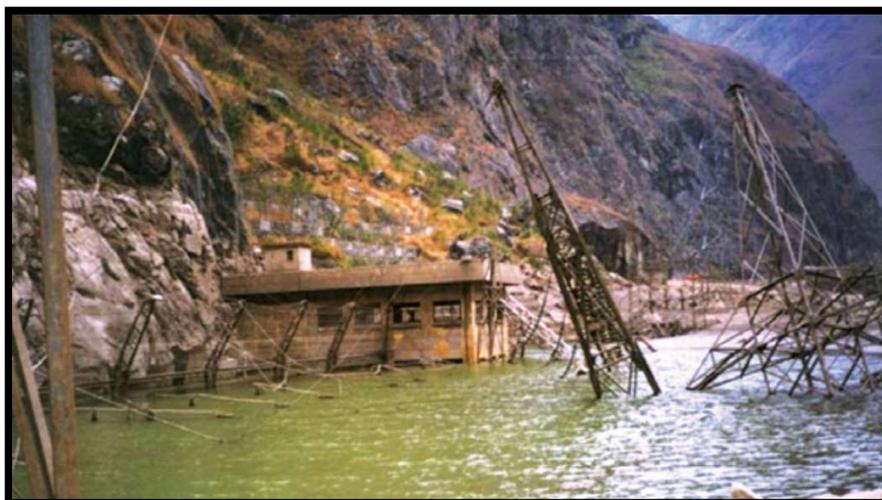
La empresa estatal Empresa de Generación Eléctrica Machupicchu Sociedad Anónima (EGEMSA) se encarga de producir y vender electricidad en la región sur de Perú. Opera en régimen de derecho privado. (EGEMSA 2020).

La central hidroeléctrica está compuesta por dos estructuras internas las cuales contienen a los generadores de energía eléctrica (con 5 grupos electrógenos) y estructuras en la superficie como lo son: la sala de mandos, el edificio de montaje y el patio de llaves.

Dichas estructuras siempre estuvieron expuestas a distintos fenómenos naturales y fueron afectadas por las mismas, claro ejemplo de ello fue un desastre natural que se produce en el año 1998, un alud que inició en la quebrada del río Aobamba, aledaño a la central. Las instalaciones de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu fueron enterradas con el lodo proveniente del alud. Llegó a ser catalogado de “descomunal” por informes de las instituciones correspondientes.

#### Figura 1

*Alud de Aobamba*



*Nota.*

Alud ocurrido en la cuenca del río Aobamba. Reproducida de EGEMSA, 2015.



La corporación tuvo que actuar con rapidez para iniciar los trabajos de rehabilitación después de que las instalaciones de la central hidroeléctrica de Machupicchu sufrieran daños importantes.

El proceso de reconstrucción y rehabilitación fue denominado: “Proyecto de Rehabilitación de la Central Hidroeléctrica Machupicchu”, compuesto de dos fases, iniciando en el 2001 y finalizando el 2015.

Gracias a estos trabajos, la central hidroeléctrica pudo volver a estar operativa de manera óptima, sin embargo, nuevos deslizamientos siguen afectando el normal funcionamiento.

En abril de 2019 un nuevo deslizamiento afectó las obras de protección del patio de llaves, ocasionando el daño de equipos.

La central hidroeléctrica de Machupicchu, está localizada en una zona de riesgo donde continuamente ocurre movimientos de masas geológicas provocadas por las constantes precipitaciones pluviales propias del lugar, ocasionando que la operación de dicha central se vea afectada por lo que se realizan obras para la estabilización de taludes y protección de la infraestructura y equipos, sin embargo, dichas obras no garantizan que la central hidroeléctrica esté fuera de riesgo a diversos eventos.

Tales antecedentes reflejan la necesidad de hacer un adecuado análisis de peligrosidad de orden geológico, así como evaluar las obras de protección proyectadas en la zona para prevenir futuros daños en los equipos y las estructuras de la central hidroeléctrica de Machupicchu. Esto marca el fin de esta investigación.

Con respecto al ámbito geográfico general de la investigación, cabe señalar que el centro de interés de nuestro estudio, la central hidroeléctrica de Machupicchu, se encuentra en el pueblo de Intiwatana dentro del distrito de Machupicchu en la provincia de Urubamba y la Región Cusco. Aquí también se realiza la investigación de campo para la recopilación de datos.

## Figura 2

### Ubicación



*Nota.* Polígono que Representa el Patio de Llaves de la C.H.M. Adaptada de Google Earth, 2020(www.earth.google.com).

Coordenadas UTM (ZONA 18S):

\***Vértice A.**- X: 764332.1, Y: 8542259.6 \***Vértice B.**- X: 764331.8, Y: 8542228.9

\***Vértice C.**- X: 764421.9, Y: 8542197.2 \***Vértice D.**- X: 764452.3, Y: 8542227.7

Para delimitar nuestro contenido, se están evaluando las obras correspondientes al Sector 1 de la parte alta del cerro El Calvario.

## Figura 3

### Ubicación Sector 1



*Nota.* Polígono que Representa el Sector 1 de las Obras de Protección del Patio de Llaves de la C.H.M. Adaptada de Adaptada de Google Earth, 2020 (www.earth.google.com).



Coordenadas UTM (ZONA 18S):

\*Vértice A.- X: 764138.4, Y: 8541853.7 \*Vértice B.- X: 764244.6, Y: 8541731.7

\*Vértice C.- X: 764051.3, Y: 8541753.5 \*Vértice D.- X: 764141.8, Y: 8541624.1

### 1.1.2. *Formulación interrogativa del problema*

#### 1. 1. 2. 1      **Formulación interrogativa del problema general.**

¿Será posible establecer una simulación que obtenga el nivel de peligrosidad, frente a los movimientos de masas, de las estructuras de protección proyectadas en el sector 1 del proyecto de obras de protección la zona del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu?

#### 1. 1. 2. 2      **Formulación interrogativa de los problemas específicos.**

- ¿Qué tipos de movimiento de masas están presentes en la zona del sector 1 del proyecto de obras de protección del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu?
- ¿Cuáles serán las medidas geométricas de los movimientos de masas seleccionados de la zona del sector 1 del proyecto de obras de protección del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu?
- ¿Cuáles son los parámetros físicos y mecánicos que influyen en el comportamiento geo mecánico de los movimientos de masa seleccionados en la zona del sector 1 del proyecto de obras de protección del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu?
- ¿Las estructuras de protección proyectadas en la zona del sector 1 del proyecto de obras de protección del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu son las adecuadas para mitigar el nivel de peligrosidad presente?
- ¿Cuál es la mejor simulación para determinar la estabilidad, frente al movimiento de masas, de las estructuras de protección proyectadas en la zona del sector 1 del proyecto de obras de protección del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu?
- ¿Cuál será el nivel de peligrosidad que obtendrá el movimiento de masas en función a las estructuras de protección proyectadas bajo la simulación en la zona del sector 1 del proyecto de obras de protección del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu?



## **1.2. Justificación de la investigación**

### **1.2.1. *Justificación técnica***

Baena (2017) menciona: “Que la justificación técnica de un trabajo investigativo es el conjunto de aportes al campo de la disciplina”, esta investigación buscará aplicar las teorías correspondientes a mecánica de suelos implementando la evaluación de simulaciones que permitan analizar si las estructuras de protección proyectadas en la zona del sector 1 del proyecto de obras de protección del patio de llaves de la central hidroeléctrica Machupicchu cumplen con su objetivo, siendo una innovación dentro del campo de la ingeniería geotécnica.

### **1.2.2. *Justificación social***

Según Tamayo y Tamayo (1999) “Los trabajos de investigación aplicados deben estar orientados a la mejora de la sociedad”. Esta investigación brinda un aporte a la Empresa de Generación Eléctrica Machupicchu S.A. respecto a estudios en evaluación de peligrosidad por movimientos de masa en las obras del sector 1 del proyecto de obras de protección del patio de llaves de la central hidroeléctrica Machupicchu, zona donde existen constantes deslizamientos de material suelto, que llegan a afectar el normal funcionamiento de los equipos encargados de generar y transmitir energía eléctrica, tomando en consideración que la electricidad viene a ser un elemento fundamental en el desarrollo y a la empresa EGEMSA como la principal fuente que satisface esta necesidad en la región del Cusco.

### **1.2.3. *Justificación por viabilidad***

Las cualidades, así como el entorno operativo y tecnológico, de esta investigación permitirá cumplir los objetivos fijados. La información necesaria para la investigación será accesible a través de EGEMSA, así como también brindará los permisos correspondientes para hacer las visitas técnicas correspondientes para la toma de muestras y datos.

### **1.2.4. *Justificación por relevancia***

Este trabajo investigativo es uno de los primeros en la Universidad Andina del Cusco, que propone analizar y simular los movimientos de masas, por lo se busca dejar un precedente y alentar compañeros e investigadores a continuar con esta línea



de investigación, utilizando la metodología empleada en zonas con características similares.

Consideramos también la relevancia de esta investigación al poder ser utilizada por EGEMSA para comprobar la eficiencia de las estructuras propuestas y el nivel de riesgo al cual está sometido el personal y equipos de la compañía para ayudar en la toma de decisiones en diversas situaciones de desplazamiento de masa.

### **1.3. Limitaciones de la investigación**

#### **1.3.1. Limitación de lugar**

Este trabajo investigativo estará limitada al estudio geo mecánico de en la zona del sector 1 del proyecto de obras de protección del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu.

#### **1.3.2. Limitación del Estudio**

- Este estudio está circunscrito en la caracterización geométrica y físico mecánicas del talud que pudo ser estudiado en las respectivas visitas técnicas al lugar.
- Solo se evaluarán las estructuras de protección tipo gavión proyectadas en la zona del sector 1 del proyecto de obras de protección del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu
- Solo se utilizarán los parámetros de evaluación de peligrosidad brindados por el Centro Nacional de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres (CENEPRED). Más no se evaluará vulnerabilidad y riesgo debido a que:
  - De acuerdo a la revisión bibliográfica se consideró que el Manual para evaluar la peligrosidad, vulnerabilidad y riesgos de CENEPRED fue el más adecuado para esta investigación, porque la consideramos bibliográfica técnica para consultas con el objetivo de evaluar los peligros ya registrados en nuestro país, basado en sus archivos de datos recogidos por las instituciones científicas y tecnológicas más relevantes del país. Estas ayudaron a definir tanto las variables como los parámetros que permitirían que los niveles de peligrosidad puedan ser evaluados. Por lo que va acorde a los objetivos de esta investigación.



- La investigación se enfocó en relacionar la peligrosidad de deslizamientos en la zona de estudios y la serviciabilidad de las estructuras de protección implementadas por la empresa en el lugar.
- Analizar la vulnerabilidad implica, de acuerdo a CENEPRED, evaluar la probabilidad de que las infraestructuras, las personas o las actividades socioeconómicas del lugar se vean afectadas por un peligro en acción. La investigación no abarcó estos aspectos. Debido a que tanto la información sobre costes de inversión de la central hidroeléctrica (principal actividad socioeconómica) y estructuras propias de las operaciones de la empresa son reservadas y de difícil acceso. De igual forma al limitar el estudio a solo evaluar la serviciabilidad de las estructuras de protección, el factor social (población principalmente) no es considerado, por lo que la vulnerabilidad como tal no se evaluó en esta investigación.
- Para analizar el riesgo en la zona de estudios, previamente es necesaria la evaluación de vulnerabilidad social, económica y ambiental del lugar, los cuales no han sido considerados como se detalla en el párrafo anterior. Por lo que también nos limitamos a no evaluar dicho parámetro.

#### **1.4. Objetivos**

##### **1.4.1. *Objetivo general.***

Analizar la peligrosidad mediante simulaciones de movimientos de masas en estructuras de protección de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu, Machupicchu, Urubamba, Cusco, 2022.

##### **1.4.2. *Objetivos específicos.***

- Caracterizar los movimientos de masas presentes en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu, para su posterior caracterización geométrica y físico-mecánica.
- Identificar las medidas geométricas de los movimientos de masas en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu, para su posterior análisis.
- Identificar los parámetros físicos y mecánicos que influyen en el comportamiento geo mecánico del movimiento de masas seleccionados de la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.



- Demostrar que las estructuras de protección proyectadas en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu, son las adecuadas para mitigar el nivel de peligrosidad presente.
- Evaluar los distintos tipos de simulación y elegir el más adecuado para determinar la estabilidad, frente al movimiento de masas, de las estructuras de protección en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.
- Calcular el nivel de peligrosidad que obtendrá el movimiento de masas en función a las estructuras de protección en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.



## 2. MARCO TEÓRICO DE LA TESIS

### 2.1. Antecedentes de la tesis

#### 2.1.1. *Antecedentes a nivel nacional*

Yajaira Castillo y Hammer Ojeda (2019) en la tesis “Evaluación del nivel de peligrosidad originado por movimientos en masa en la quebrada Saqramayo” en el distrito de Santiago-Cusco, determinaron el grado de originado por los movimientos de masas en la quebrada de Saqramayo. Para evaluar el nivel de peligro en la quebrada del Saqramayo, se pensó en la acción geodinámica tanto interna (sismicidad) como externa (gravitacional, hídrica, eólica, actividad antrópica, etc.), y se consiguió adicionalmente un inventario de desarrollos en masa, mostrando avalanchas, desprendimientos de rocas, suelos y compuestos. Con esto se demuestra que la quebrada de Saqramayo presenta un movimiento geodinámico exterior, y para su evaluación de peligro se consideran los factores condicionantes y desencadenantes. Los factores de modelamiento pensados son: pendientes, litología, geomorfología, uso del suelo, hidrogeología; se empleó la técnica de análisis jerárquico para ponderar estos factores con el fin de calcular cuan susceptible son a los movimientos en masa.

**Conclusión.-** Como último resultado se obtuvo que los peligros más altos incorporan laderas muy inclinadas, base de quebradas con inclinaciones superiores a 45°, las zonas de alto peligro incorporan inclinaciones muy empinadas desde la zona media a la base de la quebrada con pendientes de ángulo entre 25° a 45°, las zonas de peligro medio envuelven terrazas coluviales en la parte inferior de la quebrada con pendientes de 15° a 25°, la parte inferior del arroyo tiene zonas de bajo riesgo, como las zonas de uso urbano y las zonas estabilizadas.

Luis Albinez y Katherin Ancco (2018) en la tesis “Caracterización de zonas susceptibles por movimientos en masa en la quebrada Chakán” en Cusco- Perú, se caracterizó el mapa correspondiente a las zonas que muestran susceptibilidad por movimientos de masa en la quebrada Chakán. Debido a la actividad geodinámica de este arroyo, se debe realizar un análisis de susceptibilidad para planificar adecuadamente el uso del suelo y diseñar e implementar obras de ingeniería en un esfuerzo por prevenir y mitigar daños a los centros poblados, áreas expuestas de uso antrópico y vestigios incas existentes en la zona. Los condicionantes de hidrogeología



se estudiaron marcando diferencia entre las unidades litológicas con características de acuitados o acuíferos. En el área estudiada resaltan principalmente la falla Tambomachay y también la falla Cusco fallas con potencial sismogenico, lo que da a entender que en el área existe alta sismicidad por su entorno geodinamico interno; Además, hay otras fallas adyacentes que podrían afectar al arroyo Chakán si se reactivaran. Se identificaron varias formas de movimientos de masas mediante la conexión de la geodinámica externa, y se realizó trabajo de campo para encontrarlas y describirlas.

**Conclusión.** - Así se estableció un inventario con una suma de 71 eventos. Se realizó el mapa que señala las zonas con susceptibilidad por desplazamientos de masa en la quebrada Chakán, se tomó en cuenta los factores condicionantes en la zona (hidrogeología, geología, pendiente, cobertura vegetal, geomorfología y uso de suelo). Esta evaluación de susceptibilidad junto en relación a las condiciones del sitio, nos permitieron distinguir y señalar cuales son las áreas críticas con un alto nivel de susceptibilidad. Estas zonas se analizaron por separado utilizando las métricas sugeridas en función de sus circunstancias particulares. Gracias al mapa de susceptibilidad, pudimos examinar los elementos expuestos considerando los factores medioambientales, sociales y económicos. Además, se logró caracterizar geomorfológicamente el área crítica de Suchuska Qhata que posee una alta susceptibilidad a movimientos de masas, mediante fotogrametría.

A Ricardo Vila y Walther Vásquez (2016) en la tesis “Evaluación del riesgo originado por movimientos en masa, quebrada Thuniyoc” en los distritos de San Sebastián y San Jerónimo, Cusco – Perú, estudiaron a través de un sistema de información geografica la caracterización de la litología, pendiente, uso de suelos, movimientos de masa, erosión, cobertura vegetal e información hidrológica de precipitación e intensidad, adicionalmente a la modelización del flujo en la quebrada Thuniyoc utilizando el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP) y el enfoque del Modelo Modificado de Dirección de Flujo Único (MSF), actualmente existe una fuerte probabilidad de que ocurran movimientos en masa cerca de la corriente, lo que podría repercutir en las áreas metropolitanas situadas bajo ella. Geológicamente, la zona de investigación está formada por rocas de arenisca mezcladas con esquistos y material aluvial cerca de la base de la colina. Abarca 277,5 hectáreas y presenta pendientes pronunciadas y un relieve abrupto. Se adquirió un mapa de peligro de desplazamiento



en masa. Se elaboró un mapa de vulnerabilidad utilizando datos sobre la tipología de las viviendas. Los mapas de vulnerabilidad y peligro se conectaron para crear un mapa de riesgo.

**Conclusión.** - En consecuencia, se observó que el arroyo Thuniyoc presenta un movimiento en masa, comúnmente denominado flujo de detritos. Este movimiento se origina en la zona norte y está asociado a fallas locales y regionales, mientras que el área de deposición se encuentra en la zona urbana y alberga dos disipadores.

Carlos Tume (2016) en la tesis “Estudio geodinámico y estabilidad de taludes para la seguridad física de los poblados de Sarahuarcay y Choquepuquio” en el distrito de Ocobamba provincia de Chincheros – Apurímac, examinó la estabilidad de las laderas con el fin de fomentar la adopción de planes de gestión del riesgo de catástrofes en entornos locales y regionales y crear métodos de prevención y mitigación de riesgos basados en las conclusiones.

**Conclusión.** - Las estadísticas del Sistema de Información para la Respuesta y Rehabilitación, o SINPAD, muestran que entre las causas más comunes de catástrofes naturales en los centros poblados de Choquepuquio y Sarahuarcay se encuentran los riesgos geológicos de movimientos en masa y las amenazas geodinámicas externas.

Los movimientos de masa como: derrumbes, flujos de detritos, deslizamientos, reptación de suelos, y otros; son condicionados por cualidades geológicas de composición y calidad del substrato rocoso, pendientes muy inclinadas en la zona y laderas agrestes, que junto a las condiciones desencadenantes como las intensas precipitaciones pluviales acondicionan la geodinámica exterior de una región simbólica de 21667,09 hectáreas que incluye colinas, laderas y vertientes de baja y alta montaña, altiplanicies y el fondo del Valle Fluvio Aluvial. Dado que la geografía de la zona de investigación incluye suelos inestables, el análisis geotécnico indicó que el factor de seguridad es de 0,998.

Según el estudio de Gustavo Gómez (2018) denominado “Análisis de riesgos por inestabilidad de taludes en la subcuenca río canipaco, tramo distrito de colca” en la región de Junín, provincia de Huancayo, logró analizar las zonas señaladas como susceptibles debido a las laderas y pendientes inestables de la subcuenca de Canipaco.



con el fin de prevenir los daños en diferentes dimensiones que provocan los fenómenos naturales en esta área. Usa el método deductivo, inductivo, analítico y comparativo en la realización y análisis de resultados para lograr comparar el comportamiento de los movimientos de masa y la estabilidad de taludes, bajo las condiciones reales (sin medidas de prevención y protección) y con condiciones mejoradas mediante mecanismos de prevención y obras de protección a fin de reducir el impacto de un fenómeno natural, empleando los técnicas, diseños y procedimientos de estudios científicos. Según la técnica de contraste, el tipo de investigación es explicativa y aplicada basada en la orientación. La observación fue el método de recogida de datos mediante el análisis de fuentes de primera mano y haciendo el registro in situ de la información mediante un correcto inventario de taludes, movimientos de masa y demás datos que se usó como entrada para el tratamiento y procesamiento, permitiendo la evaluación y el análisis de los taludes.

Reinaldo Rodríguez y Víctor Tolentino (2015) en la investigación: “Método de investigación geológico-geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamientos zona Ronquillo-Corisorgona Cajamarca-Perú”, en la región Ronquillo-Corisorgona, se estudiaron los macizos rocosos de las formaciones Farrat, Chulec, Inca y Pariatambo por sus características geomorfológicas, geoestructurales y geodinámicas. Estos macizos tienen laderas inestables debido a la fracturación severa provocada por la geotectónica local y regional. La probabilidad de que en el futuro sucede un gran deslizamiento de tierra en el Cerro Ronquillo es altamente probable, como lo demuestran los eventos geodinámicos que han sido determinados por estas condiciones. Estos eventos incluyen un paleodeslizamiento de 500 metros de longitud con pendientes que van de  $19^\circ$  a  $45^\circ$ , deslizamientos intermedios y reciente y zonas perturbadas.

**Conclusión.** - Bieniawski<sup>89</sup> y el software RocData afirman que se utilizaron el nivel freático, los parámetros geomecánicos y la sismicidad para generar Factores de Seguridad en tres regiones geológicas. Para el análisis geoestructural de los datos de cada punto de control y la incidencia de la variable hidrológica con respecto a sus propiedades de infiltración y precipitación, se vincularon estas variables utilizando el software Dips. El FS varió de un mínimo de 0,524 a un máximo de 1,609.



### 2.1.2. *Antecedentes a nivel internacional.*

Yelena Hernández y Hildebrando Ramírez (2016) en el estudio: “Evaluación del riesgo asociado a vulnerabilidad física por taludes y laderas inestables en la microcuenca cay” en Ibagué, Tolima, Colombia. Se evaluó la vulnerabilidad física relacionada con los taludes inestables, tomando como referencia el estudio denominado “Caracterización y análisis de la amenaza por fenómenos de remoción en masa en la microcuenca de la quebrada Cay (Ibagué, Tolima, Colombia)”. Muestran una relación entre los factores expuestos vinculados a la vulnerabilidad física y las variables de amenaza importantes. Cada componente y elemento expuesto tiene una categoría. El parámetro RVF (riesgo vinculado a la vulnerabilidad física) se deriva de la combinación de la amenaza, la posibilidad de ocurrencia y la vulnerabilidad física. Se clasifica de bajo a muy alto en función del impacto de la amenaza sobre los elementos físicos expuestos. Se estimó el peligro asociado a la susceptibilidad física de los tramos de terreno más inestables de la microcuenca del Cay.

**Conclusión.** - Las conclusiones del estudio pueden utilizarse para la planificación de proyectos de ingeniería civil destinados a mitigar los daños que pueden causar inestabilidad de la infraestructura física de la microcuenca de Cay Creek. La fórmula sugerida es una herramienta útil que coopera con los encargados de la toma de decisiones a ordenar por orden de importancia las inversiones en bienes públicos.

Ramos (2017) en su investigación: “Análisis de estabilidad de taludes en rocas. Simulación con LS-DYNA y comparación con SLIDE”. Estudio la estabilidad de taludes por medio de un potente instrumento de simulación con elementos finitos, el cual es e LS-DYNA. A tales efectos modelaron cada talud, tratando de representar lo más cercano a la realidad, realizando experimentos con varias fórmulas numéricas y materiales, y eligiendo como respuesta la simulación que presente el mejor comportamiento teórico.

**Conclusión.** – Llegaron a la conclusión de que los distintos materiales plastifican de forma diferente y que determinar el punto de fallo de un material basándose únicamente en un valor de deformación plástica es incoherente. Con respecto a los resultados sobre el análisis de estabilidad, se llega a la conclusión de que estas muestras factores relativamente elevados de seguridad con respecto a la



inestabilidad global de los taludes, por lo que, desde la perspectiva económica, da lugar a que se plantee la construcción de taludes con mayor inclinación.

Yang et al. (2020) en la investigación: “Análisis de las características y el modelado numérico de la desviación del deslizamiento de tierra de Xinmo en Sichuan, China”. Con ayuda de satélites de teledetección e investigaciones geológicas sobre el terreno, pudieron identificar la formación del corrimiento de tierras de Xinmo. Los autores simularon matemáticamente los aspectos del desastre relacionados con la zona de origen, de avalancha y de acumulación. Se realizó un análisis comparativo de todo el deslizamiento de Xinmo utilizando varios modelos geológicos y la herramienta DAN-W, que investiga la dinámica de los deslizamientos.

**Conclusión.** – Las conclusiones del estudio muestran que el modelo friccional logró simular las características cinemáticas del deslizamiento de Xinmo en varias etapas. Este deslizamiento tuvo una velocidad máxima de desplazamiento de 74 m/s y duró al menos 120 segundos. Además, estudios comparables pueden examinar los impactos dinámicos de un deslizamiento en la cumbre de una montaña utilizando el modelo friccional y sus parámetros.

## 2.2. Aspectos teóricos pertinentes

### 2.2.1. Taludes

Se refiere a “Cualquier superficie que obligue a las construcciones de tierra a adoptar permanentemente una inclinación respecto a la horizontal. Sin duda, el talud es una estructura compleja de evaluar ya que, en su investigación, coinciden cuestiones de mecánica de rocas y mecánica de suelos. Sin embargo, la geología aplicada juega un papel fundamental en el desarrollo de cualquier criterio razonable” (De Matties, 2003).

Se dice que un talud es natural cuando se produce de forma natural y que es cortado o artificial cuando ha sido creado por el hombre.

Según De Matties (2003) “A la hora de estudiar los taludes, debe tenerse en cuenta el inventario de la región en la que debe investigarse la inestabilidad de la ladera. La existencia de taludes y laderas depende de su inestabilidad, que es un factor crucial.”

### 2.2.2. Nomenclatura de taludes

Acorde a Suarez (1996) Se denomina talud a una masa de terreno que presenta un ángulo de inclinación determinado que da lugar a una pendiente o a fluctuaciones

notables de altura. Se describe como talud en bibliografías técnicas cuando el mecanismo que dio lugar a su conformación actual fue artificial.

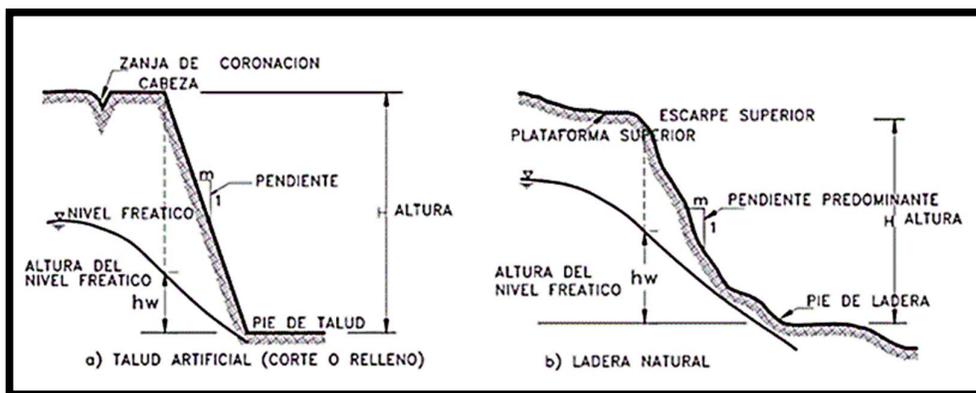
A la hora de realizar las distintas formas de análisis de taludes, debe tenerse en cuenta el inventario de la zona en la que es necesario realizar el análisis de inestabilidad de taludes. La existencia propia de los taludes es condicionada por su inestabilidad lo que indica la importancia de la misma.

Los taludes que se han mantenido estables durante un tiempo determinado pueden fallar de forma imprevista debido a variaciones topográficas, telúricas, aguas subterráneas, meteorización, variaciones en la resistencia de los suelos presentes o factores del tipo antrópico y natural que alteren la estabilidad actual del talud en estudio. (Suarez, 1996)

Según Suarez (1996) hay tres grupos generales en cuanto a clasificación de taludes se refiere: Los terraplenes, los muros de contención y los cortes de laderas naturales. También, estas pueden experimentar variaciones entre ellas, así como combinaciones.

#### Figura 4

##### *Nomenclatura de taludes*



*Nota.* Nomenclatura de Taludes y Laderas. Reproducida de Suarez,1998.

Respecto al talud se define los elementos a continuación:

**Altura.** – La variación de altitud y longitud entre la punta y la cabeza del talud, en cuanto a taludes artificiales es fácil de calcular y definir, por lo contrario, en taludes naturales es más complicado el cálculo ya que el pie y la cabeza del talud no están fácilmente definidos visualmente.

**Pie.** - se refiere al punto donde la diferencia abrupta de la pendiente se encuentra cerca del extremo inferior.

**Cabeza o escarpe.** – Viene a ser el lugar donde ocurre la diferencia brusca de la inclinación en la parte superior de la pendiente.

**Altura de nivel freático.** – Variación de elevación entre el nivel de agua medido entre la cabecera y el pie del talud.

**Pendiente.** – Se refiere a la medición de la inclinación del talud. Ya sea proporción m/l, grados o en porcentaje.

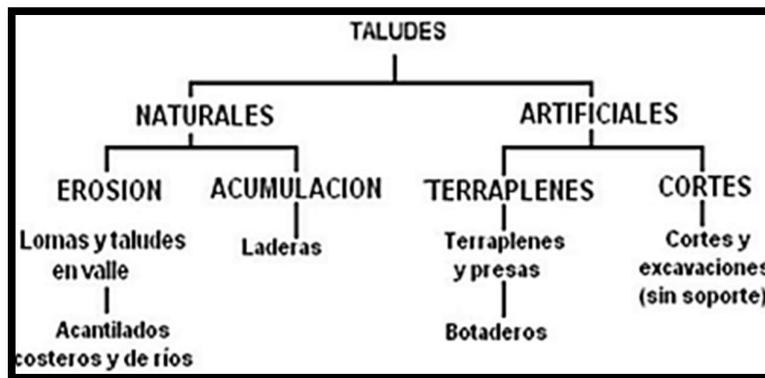
Es importante tener en cuenta que hay más elementos topográficos que deben describirse, ya que pueden influir en el comportamiento geotécnico del talud. Estos elementos incluyen la longitud, la convexidad vertical, el área del drenaje y la curvatura horizontal.

### 2.2.3. Clasificación de taludes

Según Rico y del Castillo (2013) Los taludes tanto artificiales como los formados de forma natural se fraccionan artificiales (terraplenes y cortes) y en naturales (laderas).

**Figura 5**

*Tipos de Taludes*



*Nota.* Tipos de Taludes. Reproducida de Rico y Del Castillo, 2013.

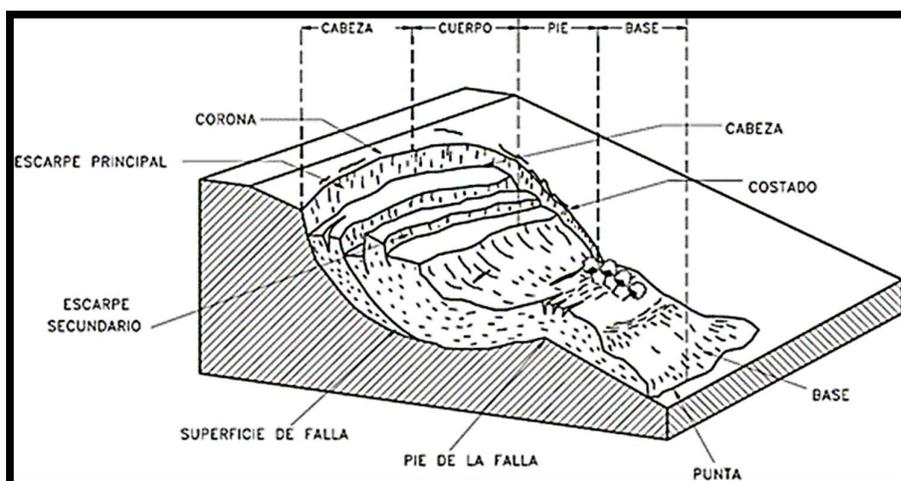
#### 2.2.4. Nomenclatura de procesos de movimiento de masas

Para Suarez (1996) Los distintos tipos de material que componen el talud suelen migrar hacia fuera y hacia abajo de acuerdo con el proceso geotécnico activo de taludes.

Estos movimientos pueden ocurrir por caída libre dentro de la superficie de falla, flujos, erosión o movimientos de masa. Algunas partes del talud pueden desplazarse hacia abajo, mientras que otras partes se desplazan hacia arriba (Suarez, 1996).

#### Figura 6

*Nomenclatura de un deslizamiento*



*Nota.* Nomenclatura de un Deslizamiento. Reproducida de Suarez, 1998.

Se puede observar en la figura previa un movimiento en masa o deslizamiento muy conocido, en la cual se pueden distinguir varios componentes, cada uno de cuyos nombres es la que se muestra a continuación:

**Escarpe principal.** – En términos de longitud de la banda de área en movimiento, esta superficie tiene una pendiente extremadamente pronunciada. El material está siendo desplazado de su pendiente original. Es provocado por esto.

**Escarpe secundario.** - Superficie que tiene una pendiente pronunciada y se produce por desplazamiento en la masa en movimiento.

**Cabeza.** - Se refiere a las partes superiores del suelo en actividad a lo largo del contacto del escarpe principal y el material alterado.



**Cima.** - El lugar más alto del contacto entre el material alterado y el escarpe principal.

**Corona.** - El material que se encuentra en el lugar, prácticamente sin alterar y que colinda a la parte más alta del escarpe principal.

**Superficie de falla.** - Se refiere a la región debajo el movimiento que delimita el volumen de material desplazado. El volumen de suelo debajo la superficie de falla no se mueve.

**Pie de la superficie de falla.** - Línea de interferencia (a veces cubierta) entre la parte inferior de la superficie de rotura y la superficie original del suelo.

**Base.** - La región cubierta por el material alterado bajo el pie de la superficie de falla.

**Punta o uña.** - El punto de la base que está más separado de la parte superior.

**Costado o flanco.** - Lado (perfil lateral) del movimiento.

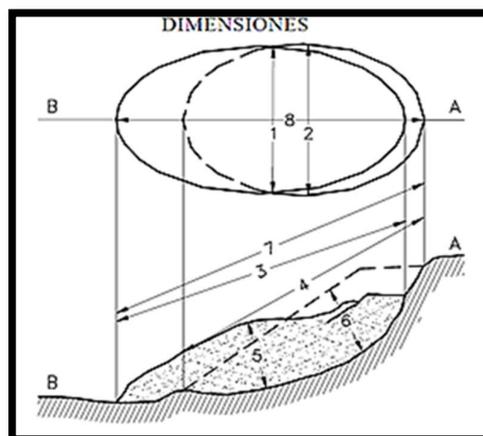
**Superficie de suelo única.** - La superficie que existía antes de la presencia del movimiento.

### 2.2.5. Componentes de un movimiento de masa

Para poder caracterizar los componentes de una actividad o movimiento, las terminologías sugeridas por el IAEG son las que se consideran utilizar:

#### Figura 7

*Dimensiones de los movimientos en masa*



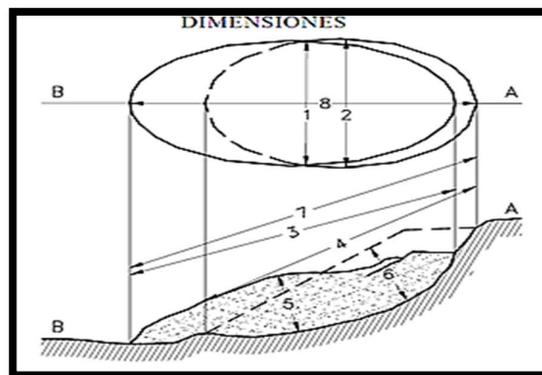
*Nota.* Dimensiones de los Movimientos en Masa. Reproducida de IAEG, de Suarez, 1998.

1. Longitud de la superficie de falla ( $L_r$ ). Distancia mínima entre el pie de la superficie de falla y la corona.
2. Profundidad de la superficie de falla ( $D_r$ ). Máxima profundidad de la superficie de falla respecto a la superficie original del terreno, medida perpendicularmente al plano conformado por  $W$ .
3. Longitud de la línea central ( $L_{cl}$ ). Distancia desde la punta o ña hasta la corona del deslizamiento a lo largo de puntos sobre la superficie original equidistantes de los bordes laterales o flancos.
4. Longitud de la masa deslizada ( $L$ ). Distancia mínima entre la punta y la cabeza. Ancho de la masa desplazada.
5. Profundidad de la masa desplazada ( $D_d$ ). Máxima profundidad de la masa desplazada perpendicular al plano conformado por  $W_d$  y  $L_d$
6. Ancho de la superficie de falla ( $W_r$ ). Ancho máximo entre los flancos del deslizamiento perpendicularmente a la longitud  $L_r$ .
7. Longitud total ( $L$ ). Distancia mínima desde la punta a la corona del deslizamiento.
8. ( $W_d$ ). Ancho máximo de la masa desplazada perpendicularmente a la longitud,  $L$ .

Para describir este incremento en volumen como un porcentaje del volumen antes del movimiento, se sugiere utilizar el término “Factor de expansión”.

### Figura 8

*Dimensiones de los movimientos en masa*



Nota. Dimensiones de los Movimientos en Masa. Reproducida de IAEG, de Suarez, 1998.



### **2.2.6. Etapas en el proceso de falla.**

Para identificar y hacer descripción de los cuerpos que están en movimiento se necesita hacer una correcta clasificación.

En esta clasificación de los movimientos son contempladas cuatro diferentes etapas:

- a. Cuando el suelo está intacto se denomina etapa de deterioro o antes de la falla.
- b. Se denomina etapa de falla cuando ya está en acción el movimiento de masa relevante del material o el desarrollo de una superficie de falla.
- c. Son incluidos en la etapa post-falla, la masa implicada en los movimientos de un deslizamiento desde el momento del fallo hasta que se detiene por completo.
- d. Cuando pueden producirse movimientos que son considerados como una nueva falla se denomina la etapa de posible reactivación e incluye las tres etapas previas.

### **2.2.7. Inestabilidad de laderas.**

Para Vásquez (2014) en CENAPRED señala que la inestabilidad de laderas se refiere a:

Aquel resultado esporádico de la confluencia de múltiples elementos, sea de forma natural o por intervención humana. cuando la actividad humana, como la tala de árboles y las condiciones de equilibrio de la pendiente se ven alteradas por los cambios en el uso del suelo. Demás factores vienen a ser el tipo de suelo, el relieve orográfico, la frecuencia de los terremotos y, sin duda, la cantidad e intensidad de las precipitaciones.

La inestabilidad de los taludes esta influenciado por aspectos naturales y humanos. De ellos, el clima es el principal, ya que la temperatura, la humedad y las precipitaciones tienen un impacto significativo (Vasquez,2014).

Además, la deforestación provocada por el hombre y la ocupación de laderas casi siempre de carácter irregular- aumentan la probabilidad de desprendimientos y plantean graves riesgos para la población, sus posesiones y el medio ambiente.

### **2.2.8. Los fenómenos de inestabilidad de laderas.**

En este estudio examinaremos el concepto de inestabilidad de taludes tales como el movimiento de grandes rocas, escombros o suelo del talud bajo la fuerza directa de la gravedad, según Cruden y Varnes (1996).



Por tanto, es sumamente importancia determinar los términos talud y ladera a fin de comprender de mejor manera el trabajo realizado.

Según Suárez (2005) el Talud es: Un terreno que no es llano, sino que presenta colinas o fuertes variaciones de altitud. Se habla de pendiente natural o simplemente de ladera cuando se forma orgánicamente sin ayuda del hombre.

Cuando ciertos elementos se juntan, se produce la inestabilidad de la ladera. Estos factores pueden estar causados por fuentes externas o por variables específicas del lugar.

Para Varnes (1978), es posible agruparlos de la siguiente forma:

- Factores geológicos: la meteorización, fisuras, debilidad del material, fracturas, dureza del material, capacidad de infiltración, entre otros.
- Factores morfológicos: erosión fluvial de pie de ladera, en márgenes laterales y subterránea.
- Factores físicos: la temperatura, la precipitación, vibraciones, erupciones volcánicas, sismos, el drenaje.
- Factores antropogénicos: incremento de peso sobre la pendiente, deforestación, excavaciones, vibraciones artificiales, entre otros.

Existe una clasificación que pone de relieve el papel que desempeñan los aspectos relacionados con la inestabilidad de las pendientes. En esta clasificación se tienen en cuenta dos categorías de elementos condicionantes y desencadenantes.

La topografía y el entorno geográfico en el que se encuentran influyen en las respuestas de los factores condicionantes.

Su lenta evolución las distingue; la disposición tectónica, la litología, la topografía, la hidrogeología y el clima vienen a ser algunos ejemplos de este tipo de características. Por el contrario, la inestabilidad se produce por condiciones desencadenantes. Estos factores tienen un impacto inmediato o rápido. Es posible identificar tres condicionantes principales: la actividad antropogénica, los terremotos y las precipitaciones.

Tres procesos pueden dar lugar a una sucesión de procesos secuenciales de causa y efecto, necesarios para que se produzca un movimiento de masas:



1. Incremento del esfuerzo cortante, el cual puede generarse por:

- La remoción del soporte lateral o de base.
- El aumento de carga provocado por el peso del agua interior.
- Incremento de presiones laterales.
- Esfuerzos transitorios provocados por sismos, entre otras.

2. Disminución de fuerzas del suelo o de la roca.

Consiste en las cualidades inherentes del material.

3. Reducción de la resistencia al esfuerzo cortante, esto es ocasionado por:

- Cambio en las fuerzas intergranulares (Disolución, presión de poros).
- Alteraciones estructurales, como debilitamiento en el plano de fallo, fractura por cargas o confinamiento inadecuado.
- Consecuencias de temperaturas muy altas o muy bajas (dilatación y contracción del material).

### **2.2.9. Clasificación de la inestabilidad de laderas.**

El tema a tratar en este punto corresponde a un fenómeno muy difícil de clasificar. No obstante, ciertos autores como Hutchinson (1968), Varnes (1978), Skempton y Hutchinson (1969) y otros, propusieron clasificaciones para la inestabilidad de laderas que ocurren constantemente (Instituto Nicaragüense de Estudios Territoriales) la cual se describe a continuación:

#### **2.2.9.1. Por el grado de actividad.**

- Inactivo: No presenta movimiento en la actualidad.
- Poco activo: Presenta poco movimiento actualmente.
- Activo: Presenta movimiento en la actualidad, con movimientos primarios y reactivaciones.

#### **2.2.9.2. Por la velocidad de propagación de materiales.**

- Extremadamente rápido:  $>5\text{m/s}$
- Rápido:  $> 1,5\text{ m/día a } 5\text{ m/s}$
- Moderado:  $1,5\text{ m/mes a } 1,5\text{ m/día.}$
- Lento:  $1,5\text{ m/año a } 1,5\text{ m/mes.}$



- Muy lento:  $>1,5$  m/año.

#### **2.2.9.3. Por la profundidad de la superficie de falla.**

- Superficial: Entre 0 y 2m.
- Semiprofundo: Entre 2 y 10m.
- Profundo: Mayor de 10 m.

#### **2.2.9.4. Por el mecanismo de movilización.**

- Caídas de rocas.
- Basculamiento o volcamiento.
- Reptación.
- Deslizamientos.
- Flujos o coladas de detritos o tierra.

#### **2.2.10. Factores que determinan la inestabilidad de laderas.**

Acorde a Hernández (2012, como se citó en Gómez ,2018) En general, puede decirse que hay elementos externos e internos que repercuten en la inestabilidad de los taludes y producen los deslizamientos; Las fuerzas de cizalladura resistentes y actuantes los cuales surgen en la zona de deslizamiento o en el punto probable de fallo están relacionadas con estos parámetros, ya sea directa o indirectamente.

Estos factores rara vez se dan juntos, por lo que es difícil determinar cómo afectó cada uno de ellos al fallo de la pendiente.

Los desprendimientos de tierra también pueden deberse a alteraciones del entorno y a perturbaciones del medio natural provocadas por la actividad humana. (Alonso, 1996) en CENAPRED.

##### **2.2.10.1. Propiedades de los suelos y rocas.**

Las propiedades de los suelos y las rocas que componen las laderas tienen diferentes resistencias al cizallamiento que varían con el tiempo y el lugar, sobre todo en función de la geología y el clima de la zona. Se utilizan experimentos de laboratorio o de campo para medir la resistencia al cizallamiento de los suelos. Sus pesos volumétricos y condiciones geométricas permiten determinar con suficiente precisión las fuerzas actuantes resultantes de las cargas aplicadas y del peso propio. Esto permite investigar cuantitativamente la estabilidad y establecer el factor de



seguridad global de cada situación. G. F. Gómez Morales (2022). Evaluación de los riesgos asociados a la inestabilidad de taludes en la subcuenca del río Canipaco, distrito de Colca, provincia de Huancayo, departamento de Junín (Maestría en Gestión Ambiental). Universidad Nacional Federico Villareal.

#### **2.2.10.2. Estratigrafía y estructuras geológicas.**

Según Gómez (2018). Numerosos casos documentados y publicados en la literatura han demostrado que las propiedades geológicas y estratigráficas de los materiales que componen los taludes son favorables a los deslizamientos. Las discontinuidades de las formaciones geológicas, los planos de estratificación y las superficies de conexión pueden acabar convirtiéndose en posibles superficies de fallo de los taludes, sobre todo cuando empiezan a adquirir pendientes pronunciadas.

#### **2.2.10.3. Lluvias intensas y prolongadas.**

Debido a sus efectos sobre la saturación del suelo, el incremento del peso volumétrico del suelo y, lo que es sumamente importante, la reducción de la resistencia al corte del suelo (causada por la presión de poros), las precipitaciones son uno de los elementos externos que más afectan a la inestabilidad de los taludes); del mismo modo, las corrientes inusuales a través del pie provocan socavaciones, desprendimientos y cambios en la geometría de los taludes. La mayor parte de los deslizamientos que se han producido como consecuencia de lluvias intensas y prolongadas lo han hecho en inclinaciones conformadas por suelos residuales y acumulaciones de origen aluviano. Cada uno de dichos desprendimientos destruyeron una cantidad importante de propiedades y han matado a cientos de personas en numerosas naciones del mundo (Gómez, 2018).

#### **2.2.10.4. Cargas sobre la ladera.**

Las fuerzas de corte que actúan sobre la posible superficie de fallo aumentan como consecuencia de la aplicación de cargas al talud, ya sea por la acumulación de materiales o la construcción de obras (Gómez, 2018).

#### **2.2.10.5. Causas humanas o antrópicas.**

Los desprendimientos pueden producirse como resultado directo de la actividad humana. Condiciones de pendiente, altitud y geo materiales se describen



como las principales causas de los desprendimientos en las laderas, también se detallan a continuación:

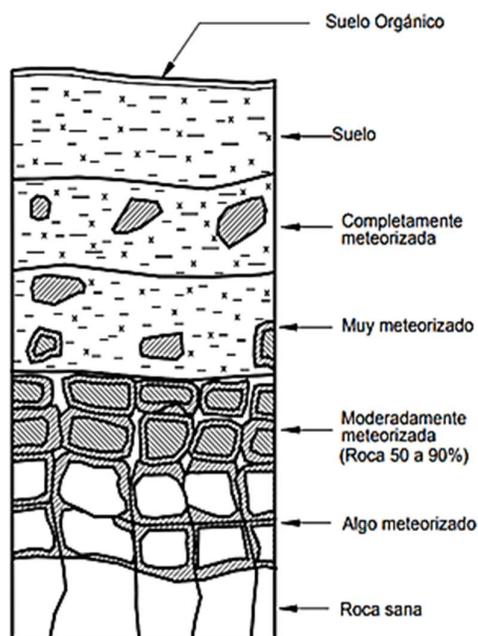
- Concentración de infiltraciones provocada por un fallo del sistema de abastecimiento de agua o de drenaje.
- Variación del régimen de presión de las aguas subterráneas.
- Variación del régimen de las aguas superficiales.
- Variación u obstrucción de los cursos de agua de las causas de agua.
- Recipientes o depósitos de almacenamiento de edificios.
- Filtraciones de sistemas sépticos.
- Impermeabilización relacionada con la urbanización, que aumenta la escorrentía al tiempo que disminuye la evaporación y la infiltración.

#### **2.2.10.6. Rasgos geológicos y geomorfológicos que propician inestabilidades.**

En nuestro país, los suelos residuales y los periodos de fuertes precipitaciones provocan con frecuencia la inestabilidad de los taludes. Los suelos residuales son geos materiales no transportables, desintegrables que permanecen en el mismo lugar donde fueron alterados a partir de la roca original. Son materiales creados por la desintegración química de las rocas, como consecuencia de la meteorización causada por el clima. En muchos casos, incluso tienen el mismo aspecto que la roca original (Gómez, 2018).

**Figura 9**

*Alteración de un suelo residual y de la roca basal*



Nota. Perfil de Alteración de un Suelo Residual y de la Roca Basal. Reproducida de Alonso,1996.

### **2.2.11. Peligrosidad**

CENEPRED (2014) conceptualiza la peligrosidad como: aquella probabilidad de que un suceso de procedencia natural que tiene el potencial de ser dañino suceda en un contexto específico, con intensidad, durante un lapso de tiempo especificado y con una ocurrencia determinada. En otras naciones, la palabra amenaza denota peligro o peligro en los textos técnicos relativos al estudio de los fenómenos naturales.

#### **2.2.11.1. Niveles de peligrosidad ante deslizamientos.**

A fin de estimar los niveles de peligrosidad se asignó un peso a los factores tanto condicionantes como desencadenante en función de la importancia de cada uno. De igual forma se le asigna un peso Al elemento de evaluación y a la sensibilidad. Con estos pesos asignados, se realizó el siguiente procedimiento:

- i. Para aquellos factores condicionantes, factor desencadenante y parámetro de evaluación, se multiplica el peso de cada parámetro por el peso de sus respectivos descriptores.



- ii. Se suman los valores hallados de los descriptores de cada parámetro de los factores condicionantes y se multiplica por el peso de este.
- iii. Con la definición de escenario escogida, se seleccionó un solo valor del factor desencadenante, este se multiplica por el peso asignado a dicho factor.
- iv. Los valores obtenidos del factor condicionante y factor desencadenante se suman para obtener los valores de susceptibilidad. De igual manera con la definición de escenarios se seleccionó un solo valor para el parámetro de evaluación.
- v. Para hallar la peligrosidad se multiplican los valores de la susceptibilidad y el valor del parámetro de evaluación por sus respectivos pesos.
- vi. Finalmente, los valores obtenidos se ordenan para tener los rangos de los diferentes niveles de peligrosidad.

#### ***2.2.12. Uso de software en la simulación de movimientos de masa***

A partir de 1960, la tecnología de la época ha logrado que se puedan realizar cálculos iterativos en los distintos rubros de la ingeniería civil, todo a partir del Método de Elementos finitos planteado (MEF) en 1943 por Richard Courant. La aplicación del MEF en ingeniería ha crecido con el tiempo, principalmente en ingeniería mecánica y cada vez más en mecánica estructural, que se ha beneficiado más del crecimiento del MEF. Para todo tipo de parámetros, el MEF puede producir actualmente resultados que se consideran precisos. (Ramos, 2017).

Dentro de los softwares más empleados, se encuentra el Slide, Phase2, SLOPE/W, GSTABL7, GALENA, GEO5.

Con funciones como el análisis de sensibilidad, la reducción rápida, el análisis probabilístico, el diseño de soportes y el análisis de elementos finitos de infiltración de aguas subterráneas, Slide viene a ser un software de estudio de estabilidad de taludes más amplio del mercado. Es posible examinar cualquier tipo de terraplén, presa de tierra, muro de contención y talud de suelo o roca. Con el uso de sofisticadas herramientas CAD (diseño asistido por ordenador), puede desarrollar y modificar sin esfuerzo modelos intrincados (Rocscience, 2017).

Con la aplicación Slide pueden analizarse tanto superficies circulares como no circulares. Para identificar la superficie de fallo con el factor de seguridad más bajo, puede llevarse a cabo una búsqueda de superficies críticas o el análisis de una superficie



específica; la búsqueda automática de refinado es la técnica de búsqueda menos cautelosa (Rocscience, 2017).

Para una amplia gama de formas de superficies de deslizamiento, calidades de suelo, condiciones de presión agua-poro, técnicas analíticas y situaciones de carga, SLOPE/W analiza eficazmente tanto problemas básicos como complicados. SLOPE/W tiene tantas capacidades que puede utilizarse para investigar distintos problemas de estabilidad de taludes en estudios de ingeniería minera, civil y geotécnica. (GEO-SLOPE, 2016).

Phase2 corresponde a un software de elementos finitos 2D para su uso con rocas y suelos. Phase2 incluye funciones de diseño de excavaciones, infiltración de aguas subterráneas, estabilidad de taludes, análisis probabilístico, consolidación y análisis dinámico que pueden utilizarse en diversas aplicaciones de ingeniería (Rocscience, 2017).

GALENA es una solución de software intuitiva, fácil de usar e increíblemente potente para la estabilidad de taludes que permite modificar y modelar de forma sencilla y lógica variables complejas de geología, aguas subterráneas y fuerzas externas (GALENA, 2017).

GSTABL7 es una herramienta sólida y completa para analizar la estabilidad de taludes. El sistema está compuesto por un paquete de software que combina STEDwin y GSTABL7. GSTABL7 se encarga de los cálculos de análisis de estabilidad de taludes, y STEDwin tiene una interfaz muy fácil de usar. (Gregory Geotechnical, 2016).

Un conjunto de programas denominado GEO5 ofrece respuestas para la mayoría de los problemas geotécnicos. Cada software verifica un tipo de estructura distinto, y todos se comunican entre sí y comparten la misma interfaz de usuario. Incluye numerosas aplicaciones para analizar la estabilidad de taludes de rocas y suelos, presas, terraplenes de nueva construcción y confirmar la estabilidad general de muros de contención. (Fine, 2017).

### **2.2.12.1. Uso de software en evaluación de estructuras de protección.**

#### **2.2.12.1.1. Programa GawacWin.**

La empresa italiana Maccaferri, junto a la a la empresa constructora GCP Engenharia, desarrolló el programa GawacWin® ofreciendo un instrumento muy



versátil para hacer el análisis correspondiente para planificar muros de retención utilizando estructuras de gaviones.

Las teorías de Meyerhof, Hansen, Rankine, Bishop y Coulomb (puesto en marcha mediante un algoritmo denominado Simplex) útil para verificar la estabilidad global de la estructura son los métodos utilizados, estos refieren al Equilibrio Límite (De Almida et al., 2015).

#### **2.2.12.2. Elementos de protección y contención.**

##### **2.2.12.2.1. Muros de gaviones.**

Para formarlas se superponen cajas prismáticas, a menudo compuestas de malla de alambre galvanizado y rellenas de pequeñas rocas.

Estas son las principales ventajas de los muros de gaviones:

- Los cimientos no son necesarios.
- Adaptación al entorno.
- Diseño sencillo y construcción rápida.
- Trabajos no especializados.
- Se impulsan principalmente por la gravedad.
- Son resistentes y no se rompen cuando se someten a determinadas situaciones.
- Condiciones superiores de drenaje y durabilidad.
- Aprovechamiento de los recursos regionales.
- Bajo precio.
- Los principales inconvenientes son los siguientes: Las mallas de acero galvanizado se oxidan fácil en condiciones ácidas.
- Los bloques de roca pueden repercutir en el coste del proyecto y no siempre están disponibles en todas las obras.
- Al tratarse de muros de gravedad, su espesor aumenta en proporción directa a la altura, lo que hace inviable la solución a grandes alturas debido al mayor volumen de la piedra.

#### **2.2.13. Geología presente en la zona de estudio**

Dentro del área estudiado se encontraron dos formaciones geológicas (P-mp y C-Is) y tres depósitos cuaternarios (D-c, D-fl, D-a), se describen a continuación:



**Plutón Machupicchu (P-mp):** Aflora al norte del cuadrante y suroeste del nevado Salkantay en la pampa Sorococha e incluye al Complejo metamórfico Iscaybamba. El intrusivo es compacto, de textura fanerítica de grano grueso y de color gris blanquecino. La cual se compone de cristales de plagioclasas, presentando cristales de feldespato potásico y cuarzo. Asimismo, presenta ferromagnesianos en los intersticios, entre ellos cristales de biotita con magnetismo débil, lo que la clasifica como sienogranito. Por otra parte, también afloran pequeñas apófisis de intrusivo calcoalcalino; la roca intrusiva expuesta es compacta y presenta un tono gris blanquecino, con una textura fanerítica de grano medio. Está compuesta por cristales prismáticos tabulares de anfíboles y plagioclasas. (Arcos et al., 2021). De acuerdo a su origen los tipos de roca presentes en esta formación son del tipo ígneas intrusivas por la presencia del granito y sus variaciones.

**Depósitos Coluviales (D-c):** El río Vilcanota está bordeado por rocas intrusivas y metamórficas, que son el modelo de las laderas montañosas donde se encuentran los depósitos coluviales. Son el resultado de la caída de bloques de roca y escombros en la base de las laderas del río Vilcanota. Se componen de bloques angulosos encajados en una matriz limosa. (INGEMMET, 2020). De acuerdo a su origen los tipos de roca presentes en este depósito son del tipo sedimentarias clásticas por la presencia del clasto (fragmentos de roca preexistentes).

**Depósitos fluviales (D-fl):** Los depósitos que se encuentran en los lechos de los valles, principalmente en los ríos Apurímac, Vilcabamba (cuadrángulo de Machupicchu), Urubamba, Yanatile y Cirial (cuadrángulo de Quillabamba), se denominan depósitos fluviales. El valle del río Urubamba es considerado como el más significativo de estos valles debido a las mayores extensiones de terreno fluvial. (Carlotto et al., 1999),

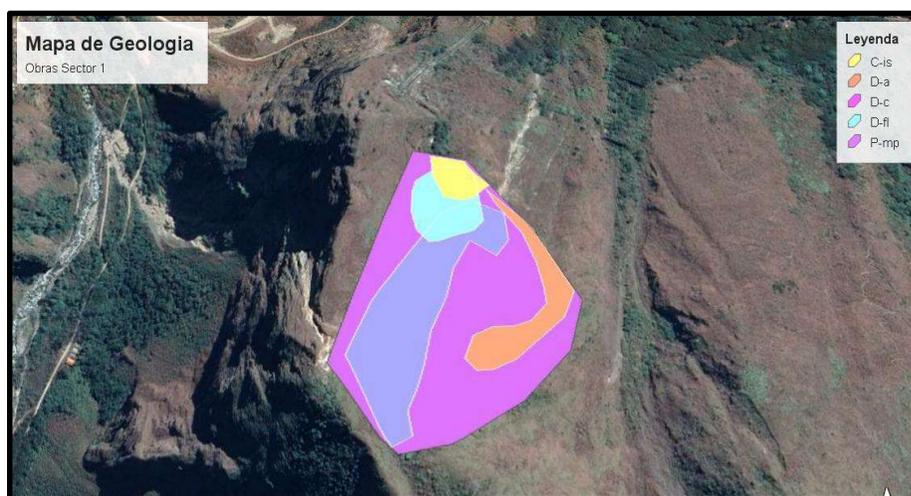
Las terrazas están formadas por los bancos de grava y arena que componen estos depósitos. Las terrazas se pueden encontrar en el valle del río Urubamba a partir del pueblo de Chaulay, que es también el punto donde la anchura del valle comienza a importar más. en los valles del cuadrángulo de Machupicchu. Por cuestiones de escala, algunos valles que contienen estos depósitos no han sido cartografiados. (Carlotto et al., 1999). De acuerdo a su origen los tipos de roca presentes en este depósito son del tipo sedimentarias clásticas por la presencia del clasto (fragmentos de roca preexistentes) en este caso arena y grava principalmente.

**Depósitos aluviales (D-a):** Se ubica en ambas orillas del río Vilcanota y consisten principalmente en bloques de roca intrusiva y gravas rodeadas por una matriz areno-arcillosa. Representan niveles anteriores del curso fluvial. (INGEMMET, 2020).

**Complejo Iscaybamba (C-Is):** El Complejo Iscaybamba se diferencia por sus características litológicas, ensambles y composición mineralógica, textura y tamaño de los blastos, entre los cuadrantes de Machupicchu y Pacaypata y se dividen hasta en 7 unidades litológicas: Gneis cuarzoso, anfíbol y cuatro micaesquistos, entre los cuadrángulos de Machupicchu y Pacaypata, limitado al oeste por la falla inversa San Ignacio de dirección noroeste - sureste, paralela al río Apurímac. (Arcos et al., 2021). De acuerdo a su origen los tipos de roca presentes en esta formación son del tipo ígneas extrusivas por la presencia de cuarzo y sus variaciones.

### Figura 10

*Mapa de geología en el área de estudio*



*Nota.* Fuente: propia.

#### 2.2.14. Geomorfología presente en la zona de estudio

**Subunidad de montaña en roca intrusiva (Mri):** Con elevaciones de 6271 msnm y pendientes que llegan hasta los 80° (vertiente sur del nevado del Salkantay), crean crestas y laderas de morfología extremadamente abrupta. Las fallas E-O, las diaclasas y el modelado glaciar rigen la evolución de estos relieves, que presentan formas asimétricas. Se trata de rocas graníticas que forman parte del Batolito de Machupicchu, según su litología. (INGEMMET, 2020).



El nivel de peligrosidad de esta subunidad se define por los frecuentes desprendimientos de tierra, rocas y escombros. (Concha, 2015).

**Sub unidad de piedemonte coluvio – deluvial (P-cd):** se refiere a los depósitos o acumulaciones en las laderas provocados por movimientos complicados, deslizamientos, avalanchas de rocas u otros fenómenos de movimiento de masas. Equivale a laderas con pendientes que oscilan entre 30° y 70° (ladera sur del nevado Salkantay). Su composición litológica uniforme consiste en depósitos de corto alcance de piezas pétreas encajadas en una matriz arenosa, que forman abanicos y conos de deyección en la ladera de la montaña. (INGEMMET, 2020)

Su peligro se caracteriza por la creación de aludes, corrimientos de tierras y otros flujos de escombros provocados por la erosión de las rocas y la meteorización, muchas de las cuales están cambiadas y rotas. (Concha, 2015)

**Fallas en Roca in Situ (Cu):** El cerro el Calvario, motivo del presente estudio, se encuentra emplazada en rocas intrusivas constituidas por rocas graníticas. Estas rocas han sido afectadas por la tectónica, consecuentemente la presencia de fallas de contexto regional atraviesa la zona de manera conspicua, Las rocas que afloran mayormente son granodioritas, micro dioritas, granitos y monzogranitos con textura gnéisica en muchos casos de tonalidad leucocrática y amarillenta, con diversos grados de alteración de albitización. Estas alteraciones también se observan en la zona alta del Cerro Calvario, las mismas que se encuentran aflorando con un alto grado de fracturamiento.

### 2.3. Hipótesis

#### 2.3.1. *Hipótesis general*

De acuerdo con la simulación y el análisis de peligrosidad respectivo las estructuras de protección de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu, Machupicchu, Urubamba, Cusco, con respecto al movimiento de masas, se mantendrán estables.

#### 2.3.2. *Sub hipótesis*

##### 2.3.2.1. **Sub hipótesis No 1.**

Se podrán caracterizar correctamente los distintos movimientos de masa presentes en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.

##### 2.3.2.2. **Sub hipótesis No 2.**



Se podrán identificar las medidas geométricas del movimiento de masas seleccionados en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.

**2.3.2.3. Sub hipótesis No 3.**

Se podrán identificar los parámetros físicos y mecánicos del movimiento de masas que influyen en el comportamiento geo mecánico de los movimientos de masas seleccionados en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.

**2.3.2.4. Sub hipótesis No 4.**

Las estructuras de protección proyectadas en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu, son las adecuadas para mitigar el nivel de peligrosidad presente.

**2.3.2.5. Sub hipótesis No 5.**

El simulador GAWACWIN es el mejor modelador de acuerdo a la evaluación para determinar la estabilidad frente al movimiento de masas de las estructuras de protección en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.

**2.3.2.6. Sub hipótesis No 6.**

El nivel de peligrosidad calculado es muy alto en función de las estructuras de protección en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.

**2.4. Variables e indicadores**

**2.4.1. Variables independientes**

**2.4.1.1. Estructuras de protección.**

proyectos que tratan de equilibrar las masas de taludes disminuyendo las presiones desestabilizadoras que provocan los movimientos de masas.

**2.4.1.2. Indicadores de variables independientes.**

**2.4.1.2.1. Tipo de Estructura.**

Este parámetro adimensional nos brinda información acerca del tipo de estructura de protección que se está estudiando.

**2.4.1.2.2. Largo.**



Expresado en metros (m). Este parámetro es un adjetivo para referirnos a aquello que tiene mucha longitud.

#### **2.4.1.2.3. Ancho.**

Expresado en metros (m). Este parámetro es un adjetivo para referirnos a aquello que tiene menor longitud.

#### **2.4.1.2.4. Volumen.**

Expresado en metro cubico ( $m^3$ ). Este parámetro es la extensión en tres dimensiones de un elemento determinado.

#### **2.4.1.2.5. Área.**

Expresado en metro cuadrado ( $m^2$ ). Este parámetro es la extensión en dos dimensiones de un elemento determinado

### **2.4.2. Variables dependientes**

#### **2.4.2.1. Simulación del movimiento de masas**

Es el procedimiento completo para la simulación de un deslizamiento de un talud producto de una condición inicial de falla.

#### **2.4.2.2. Peligrosidad.**

CENEPRED (2014) define peligrosidad como: Probabilidad de que un fenómeno natural que puede ser peligroso se manifieste en un lugar determinado, con una intensidad determinada, durante un tiempo determinado y con una frecuencia determinada. En otras naciones, la palabra "peligro" denota peligrosidad en los textos técnicos relativos la investigación de los fenómenos naturales. Los niveles de peligrosidad se determinan acorde a las variables condicionantes y desencadenantes del fenómeno.

#### **2.4.2.3. Indicadores de variables dependientes.**

##### **2.4.2.3.1. Altura.**

Expresado en (m). Este parámetro nos permite saber la altura del talud.

##### **2.4.2.3.2. Pie.**



Expresado en (m). Este parámetro nos permite saber la longitud de la base del talud

#### **2.4.2.3.3. *Altura de nivel freático.***

Expresado en (m). Este parámetro nos permite saber la altura en la que se encuentra el nivel freático en el talud.

#### **2.4.2.3.4. *Pendiente.***

Expresado en (%). Este parámetro nos permite saber la inclinación que tiene el talud.

#### **2.4.2.3.5. *Escarpe principal.***

Expresado en (m). Este parámetro nos permite saber la distancia del escarpe principal.

#### **2.4.2.3.6. *Escarpe secundario.***

Expresado en (m). Este parámetro nos permite saber la distancia del escarpe secundario.

#### **2.4.2.3.7. *Cohesión***

Este parámetro nos brindara la cohesión del material estudiado a diferentes profundidades.

#### **2.4.2.3.8. *Angulo de fricción***

Este parámetro nos brindara el ángulo de fricción del material estudiado a diferentes profundidades.

#### **2.4.2.3.9. *Peso específico***

Este parámetro nos brindara el peso específico del material estudiado a diferentes profundidades.

#### **2.4.2.3.10. *Tipo de movimiento***

- Caída
- Volcamos o Basculamiento
- Deslizamiento rotacional



- Deslizamiento trasnacional
- Separación lateral
- Flujos
- Movimientos complejos

**2.4.2.3.11. *Grado de actividad***

Expresado en metros sobre segundo (m/s). Este parámetro nos permite saber si hay movimientos en el talud estudiado.

**2.4.2.3.12. *Velocidad de propagación de materiales***

Expresado en metros sobre segundo (m/s). Este parámetro nos permite saber la velocidad de propagación de los materiales en el talud.

**2.4.2.3.13. *Profundidad de la superficie de falla***

Expresado en metros (m). Este parámetro nos permitirá saber la profundidad en la cual está la superficie de falla.

**2.4.2.3.14. *Mecanismo de movilización***

Este parámetro adimensional nos permitirá saber el mecanismo de movilización del talud desplazado.

**2.4.2.3.15. *Factores condicionantes de la peligrosidad:***

- Geología
- Geomorfología
- Pendiente

**2.4.2.3.16. *Factores desencadenantes de la peligrosidad:***

- Hidrometeorológicos



2.4.3. Cuadro de Operación de variables

**Tabla 1**

*Operación de variables*

**CUADRO DE OPERACIÓN DE VARIABLES INDEPENDIENTES**

Nombre De La Variable	Definición	Naturaleza De La Variable	Escala De Medición	Dimensión	Indicador	Tipo De Medición	Unidad	Instrumento De Medición	Ítem
Estructuras de protección	Las obras civiles construidas con la intención de proporcionar estabilidad frente a la ruptura de macizos de tierra o roca se conocen como estructuras de protección o contención. Son los soportes que sostienen estos macizos y evitan que se deslicen bajo el peso de cargas exteriores o por su propio peso. De Almida et al., (2015).	cualitativa	nominal	Dimensiones y tipos de estructuras del sector 1	Tipo de Estructura	directa	adimensional	Expediente Técnico	15
					Largo	directa	m	Expediente Técnico	16
					Ancho	directa	m	Expediente Técnico	17
					Volumen	indirecta	m3	Software Excel	18
					Área	indirecta	m2	Software Excel	19



**CUADRO DE OPERACIÓN DE VARIABLES DEPENDIENTES**

Nombre De La Variable	Definición	Naturaleza De La Variable	Escala De Medición	Dimensión	Indicador	Tipo De Medición	Unidad	Instrumento De Medición	Ítem
<b>Simulación de movimientos de masa</b>	La simulación del movimiento de deslizamientos se considera una combinación de varios enfoques analíticos. Su crecimiento depende de nuestra comprensión del mecanismo del movimiento de deslizamiento. Wang, Sassa (2010). Para realizar la simulación se necesita contar con datos como las medidas geométricas del talud, parámetros físicos y mecánicos del suelo, clasificar los movimientos de masa presentes y la caracterización dinámica del talud.	cuantitativa	ordinal	Medidas geométricas del sector 1	Altura	directa	m	Levantamiento topográfico.	1
					Pie	directa	m	Levantamiento topográfico.	2
					Altura de nivel freático	directa	m	Levantamiento topográfico.	3
					pendiente	directa	%	Levantamiento topográfico.	4
					Escarpe principal	directa	m	Levantamiento topográfico.	5
					Escarpe secundario	directa	m	Levantamiento topográfico.	6
				Parámetros físicos y mecánicos del sector 1	Cohesión	indirecta	kg/cm <sup>2</sup>	Ensayo de Corte en el sondeo	7
					Angulo de fricción	indirecta	°	Ensayo de Corte en el sondeo	8
					Peso específico	indirecta	KN/m <sup>3</sup>	Ensayo de Corte en el sondeo	9
				Clasificación de los movimientos de masas del sector 1	Tipo de movimiento	directa	adimensional	Clasificación Varnes 1978	10



---

Caracterización dinámica del talud del sector 1	Por el grado de actividad	directa	m/s	Software Excel	11
	Por la velocidad de propagación de materiales	indirecta	m/s	Software Excel	12
	Por la profundidad de la superficie de falla.	indirecta	m	Software Excel	13
	Por el mecanismo de movilización	indirecta	adimensional	Software Excel	14

---



**CUADRO DE OPERACIÓN DE VARIABLES DEPENDIENTES**

Nombre De La Variable	Definición	Naturaleza De La Variable	Escala De Medición	Dimensión	Indicador	Tipo De Medición	Unidad	Instrumento De Medición	Ítem
Peligrosidad	La peligrosidad se refiere a la posibilidad de que ocurra un evento natural potencialmente perjudicial en un área específica, caracterizado por una intensidad, frecuencia y momento particulares. El CENEPRED (2014) calcula los índices de peligrosidad considerando los factores condicionantes y desencadenantes de la ocurrencia.	cualitativa	por intervalos	Factores de la peligrosidad del sector 1	Factores condicionantes	directa	adimensional	Cartas Nacionales	20
					Factor desencadenante	directa	l/m <sup>2</sup>	Cartas Nacionales	21

*Nota.* Elaboración propia



### 3. METODOLOGÍA

#### 2.3. 3.1. Metodología de investigación.

##### 3.1.1. *Enfoque de la investigación.*

Este trabajo investigativo siguió un enfoque cuantitativo, esto de acuerdo a la definición de Sampieri y Baptista (2004) donde explicaron que, en una investigación con enfoque cuantitativo, las hipótesis son probadas mediante el análisis estadístico y la medición numérica de los datos previamente recolectados. Considerando también que esta investigación fue secuencial y probatoria.

##### 3.1.2. *Nivel de la investigación.*

Sampieri y Baptista (2004) señalan que es posible que una investigación puede estar compuestas por distintos niveles o enfoques. Esta investigación fue de nivel descriptivo a razón de que necesitan precisar las características y propiedades del talud en estudio para el respectivo análisis, pues buscó identificar los riesgos a los cuales está expuesto por los constantes deslizamientos existentes en la zona del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu, las condiciones en que está se presentan y su relación con las obras de protección proyectadas.

##### 3.1.3. *Método de investigación.*

Esta investigación tuvo un método hipotético-deductivo, puesto que esta nace de una hipótesis inicial para obtener conclusiones particulares o específicas que fueron comprobadas de manera experimental.

#### 3.2. Diseño de la investigación.

##### 3.2.1. *Diseño metodológico.*

Dado que los datos fueron utilizados para el modelamiento y análisis de la pendiente cercana al patio crítico de la central hidroeléctrica de Machupicchu, se empleó un diseño cuasi-experimental ya que algunas de las variables podrían cambiar.

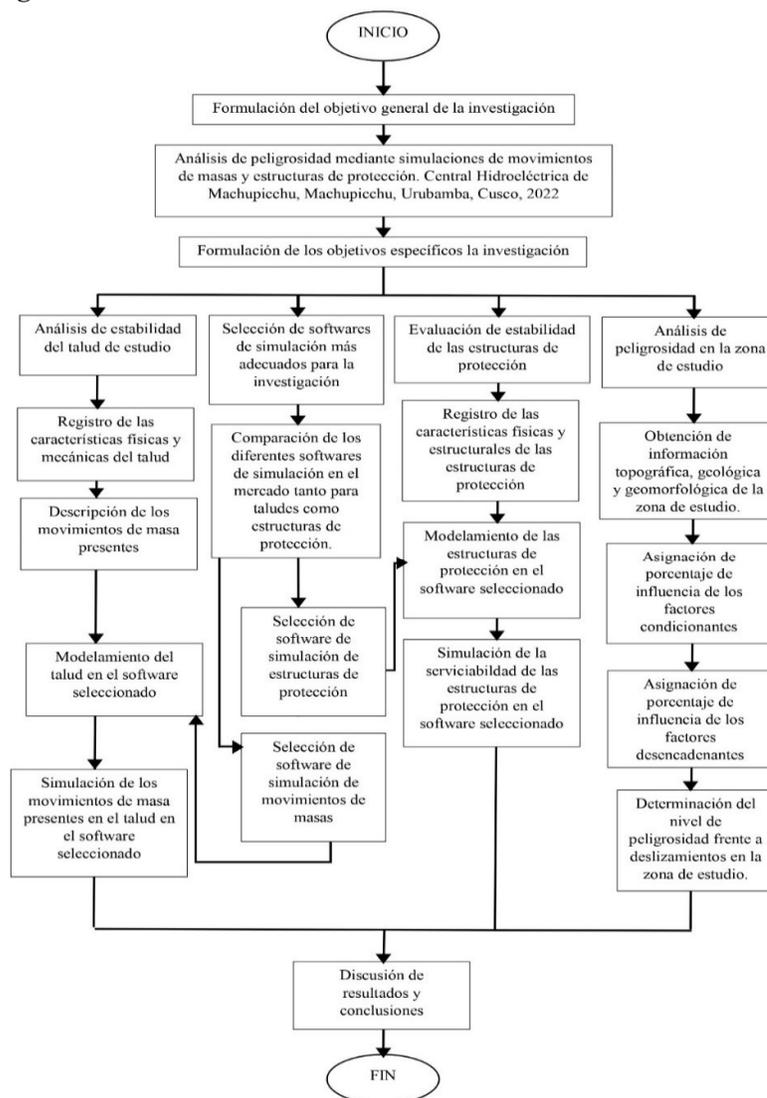
Entendemos que, en una investigación cuasi experimental una o más variables independientes pueden ser manipuladas deliberadamente para apreciar su efecto sobre una o más variables dependientes de nuestra elección. (Sampieri y Batista, 2004)

Cuando se utilizan diseños cuasi experimentales, los participantes no son emparejados ni asignados de manera aleatoria a los distintos grupos, por el contrario, los grupos se forman previamente al experimento y siendo de nuestro interés analizar si las obras de protección del patio de llaves de la central hidroeléctrica Machupicchu son estables en el tiempo frente a los movimientos de masa.

### 3.2.2. Diseño de ingeniería.

Figura 11

Diseño de ingeniería



Nota. Elaboración propia



### **3.3. Población y muestra**

#### **3.3.1. Población**

##### **3.3.1.1. Descripción de la población.**

En este estudio todas las secciones del talud situado en el sector uno del cerro denominado “El calvario” donde precisamente está ubicado el patio de llaves de la central hidroeléctrica Machupicchu conformaron la población.

##### **3.3.1.2. Cuantificación de la población.**

Se han determinado 4 secciones con presencia de movimientos de masa para ser evaluadas.

#### **3.3.2. Muestra**

##### **3.3.2.1. Descripción de la muestra.**

Este estudio tuvo por muestra al sector de la sección 1-3 con actividad geodinámica del cerro El Calvario que puedan desencadenar movimientos de masa del tipo flujo de detritos y que se encuentren en la parte alta del cerro “El calvario”.

##### **3.3.2.2. Cuantificación de la muestra.**

El sector con actividad geodinámica del cerro El Calvario que pueden desencadenar movimientos de masa que afecten directamente al patio de llaves de la central hidroeléctrica Machupicchu, este sector del talud de sección 1-3, este talud tiene una pendiente de  $42^\circ$  y una altura de 48 m, además de una profundidad de 52 m. y una distancia inclinada de 72 m.

##### **3.3.2.3. Método de muestreo.**

Respecto a la elección de componentes en muestras no probabilísticas se basa en factores distintos de la probabilidad, como la naturaleza del estudio o los objetivos del investigador (Hernández et al., 2014).

Dado que se basaría en parámetros exclusivos de este estudio, la estrategia de muestreo NO era PROBABILÍSTICA.



### 3.3.2.4. Criterios de evaluación de la muestra.

A fin de analizar la muestra se tuvo presente el peligro que presentaría, para el patio de llaves de la central hidroeléctrica Machupicchu, un posible movimiento de masa en cada uno de los sectores con actividad geodinámica del cerro El Calvario.

### 3.3.3. Criterios de inclusión

El primer criterio de inclusión fue el factor de seguridad de talud de cada sector, si este no cumple lo mínimo establecido por las normas vigentes, se considera inestable por lo que se procede a realizar la simulación de dicho movimiento de masa. El segundo criterio de inclusión fue el impacto que tendría o no, el movimiento de masa sobre el patio de llaves de acuerdo a la simulación realizada.

## 3.4. Instrumentos

### 3.4.1. Instrumentos de recolección de datos

#### 3.4.1.1. Formato de registros del ensayo granulométrico por tamizado.

**Figura 12**

*Formato Análisis Granulométrico*

 UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
Ensayo:	Análisis Granulométrico por Tamizado			
TESIS	"Análisis de riesgos mediante simulaciones de movimientos de masas en estructuras de protección. Central Hidroeléctrica de Machupicchu, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, Región de Cusco, 2021"			
TESISTAS	Follana Peralta, Harold Cristian Sallo Diaz, Irving Fernando			
Lugar:				
Ubicación:				
Fecha:				
TAMIZ N°	TAMIZ(mm)	%PASA	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO
	80			
	63			
	50			
	40			
	25			
	20			
	12.5			
	10			
	6.3			
	5			
	2			
	1.25			
	0.4			
	0.25			
	0.16			
	0.08			
Fondo				
Total				



Nota. Fuente: propia.

3.4.1.2. Formato de registros del ensayo de límites de consistencia.

Figura 13

Formato Límites de Consistencia

	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL			
Ensayo:		Límites de Consistencia		
TESIS	"Análisis de riesgos mediante simulaciones de movimientos de masas en estructuras de protección. Central Hidroeléctrica de Machupicchu, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, Región de Cusco, 2021"			
TESISTAS	Follana Peralta, Harold Cristian Sallo Diaz, Irving Fernando			
Lugar:				
Ubicación:				
Fecha:				
	Punto:			
<b>Determinación Límite Líquido</b>				
Cápsula	N° 01	N° 02	N° 03	N° 04
Peso de Cápsula (gr)				
Material Humedo + Peso de Cápsula (gr)				
Material Seco + Peso de Cápsula (gr)				
Número de golpes				
Material seco (gr)				
Peso del agua (gr)				
Contenido de Humedad (%)				
<b>Determinación Límite Plástico</b>				
Cápsula	N° 01	N° 02	N° 03	
Peso de Cápsula (gr)				
Material Humedo + Peso de Cápsula (gr)				
Material Seco + Peso de Cápsula (gr)				
Material seco (gr)				
Peso del agua (gr)				
Contenido de Humedad (%)				
<b>RESULTADOS</b>				
LIMITE LIQUIDO			<input style="width: 80px; height: 20px;" type="text"/>	
LIMITE PLASTICO			<input style="width: 80px; height: 20px;" type="text"/>	
INDICE PLASTICO			<input style="width: 80px; height: 20px;" type="text"/>	

Nota. Fuente: propia.





3.4.1.4. Formato de registros del ensayo de contenido de humedad.

Figura 15

Formato Contenido de Humedad

 <small>Universidad Andina del Cusco</small>	UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL		
Ensayo:		Contenido de humedad del suelo	
TESIS	"Análisis de riesgos mediante simulaciones de movimientos de masas en estructuras de protección. Central Hidroeléctrica de Machupicchu, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, Región de Cusco, 2021"		
TESISTAS	Follana Peralta, Harold Cristian Sallo Diaz, Irving Fernando		
Lugar:	<input type="text"/>	Punto:	<input type="text"/>
Ubicación:	<input type="text"/>		
Fecha:	<input type="text"/>		
Contenido de Humedad (%)			
Muestra	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Profundidad (M.)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Peso de tara(gr)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Peso de suelo húmedo + tara (gr)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Peso de suelo seco + tara (gr)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Peso del suelo Humedo (gr)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Peso del suelo seco (gr)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Peso del agua (gr)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
Conenido de Humedad (W)	<input type="text"/>	<input type="text"/>	<input type="text"/>
		Promedio:	<input type="text"/>

Nota. Fuente: propia.



3.4.1.5. Formato de registros de la prueba de densidad in situ.

Figura 16

Formato Densidad in situ

		UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL			
Ensayo:		Prueba de Densidad IN SITU (Metodo con arena calibrada)			
TESIS	"Análisis de riesgos mediante simulaciones de movimientos de masas en estructuras de protección, Central Hidroeléctrica de Machupicchu, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, Región de Cusco, 2021"				
TESISTAS	Follana Peralta, Harold Cristian Sallo Díaz, Irving Fernando				
Lugar:		Profundidad			
Ubicación:		Peso unitario de la Arena			
Fecha:					
Prueba N°					
Ubicación					
DATOS DEL ENSAYO EN CAMPO					
Número de Cono					
Peso Inicial del Frasco + Cono (gr)					
Peso Residual del Frasco + Cono (gr)					
Peso del Suelo Extraído (gr)					
Peso de la Grava, retenido en tamiz 3/4" (gr)					
Peos de la Arena Utilizada, hueco + cono (gr)					
Peso de la Arena en el Cono (gr)					
Peso de la Arena en el Hueco (gr)					
Volumen del Hueco (cm3)					
Peso Especifico de la Grava (gr/cm3)					
Volumen de la Grava (cm3)					
Peso del Suelo (gr)					
Volumen del Suelo (cm3)					
Densidad Húmeda del Suelo (gr/cm3)					

Nota. Fuente: propia.



### 3.4.2. Instrumentos de ingeniería

#### 3.4.2.1. Instrumentos de campo

##### 3.4.2.1.1. GPS

#### Figura 17

*GPS Garmin*



##### 3.4.2.1.2. Eclímetro

#### Figura 18

*Eclímetro*



##### 3.4.2.1.3. Brújula Brunton

#### Figura 19

*Brújula Brunton*





**3.4.2.2. Instrumentos de laboratorio**

**3.4.2.2.1. Tamices**

**Figura 20**

*Tamices*



**3.4.2.2.2. Cuchara de Casagrande**

**Figura 21**

*Tamices*



**3.4.2.2.3. Ranurador**

**Figura 22**

*Ranurador*





**3.4.2.2.4. Balanza**

**Figura 23**

*Balanza*



**3.4.2.2.5. Horno**

**Figura 24**

*Horno*



**3.4.2.2.6. Recipientes.**

**Figura 25**

*Recipiente*



**3.4.2.3. Instrumentos de gabinete y softwares.**

**3.4.2.3.1. Computadora portátil.**

Se utilizó para el procesamiento y análisis de datos.



#### **3.4.2.3.2. *Cartas nacionales.***

Se utilizó para realizar mediciones planimétricas y altimétricas del área de estudio.

#### **3.4.2.3.3. *Excel (Hojas de cálculo).***

Se utilizó el programa Excel para:

- Cálculo de longitudes en el plano topográfico.
- Procesamiento de coordenadas para el modelamiento.

#### **3.4.2.3.4. *Software AutoCAD.***

Se utilizó el programa AutoCAD para representar el cerro calvario y sus curvas de nivel.

#### **3.4.2.3.5. *Software ArcGIS.***

Con su interfaz gráfica de usuario de fácil manejo, este sistema de información geográfica facilita la introducción de datos tabulares y espaciales para su visualización en forma de tablas, gráficos y mapas. También incluye todas las herramientas necesarias para consultar, examinar y mostrar los resultados de los datos en mapas estéticamente agradables. Se utilizó para realizar la evaluación de peligro en la zona.

#### **3.4.2.3.6. *Software Slide.***

Se utilizó el programa Slide para la modelación del talud en 2d y simular el posible deslizamiento.

#### **3.4.2.3.7. *Software GAWACWIN.***

Se utilizó el programa de la empresa Maccaferri para simular el funcionamiento y serviciabilidad de los gaviones.

### **3.5. Procedimientos de recolección de datos**

#### **3.5.1. *Recolección de datos para análisis mecánico de suelos***

En el área de estudio de riesgo frente a movimientos de masas se identificó el talud en el sector 01 de este mismo en el cual se efectuó la toma de muestras para



llevarlas a laboratorio y someterlas a los ensayos de laboratorio previamente mencionados.

#### **3.5.1.1. Muestreo de suelos.**

Se utilizaron los siguientes elementos para realizar esta actividad:

- Herramientas manuales (pico y pala)
- Costales
- Cajas de cartón forradas

El procedimiento que se realizó fue:

- Verificación de la zona de estudio
- De los taludes estudiados se consiguió la muestra

#### **3.5.1.2. Recolección de datos para el análisis granulométrico.**

Equipos y herramientas:

- Tamices: 2", 1½", ¾", 3/8", N°04, N°08, N°16, N°30, N°50, N°100, N°200.
- Tamiz N°200 para el lavado
- Balanza de precisión (0.01 gr)
- Recipientes metálicos
- Horno

Procedimiento:

- Se pesó el material para posteriormente hacer el lavado de este.
- Se hizo el cuarteo del material para dividirlo en partes homogéneas.
- Se separó el material con el tamiz N°4 para así separar el agregado grueso del fino y poder tamizar en dos partes.
- Se pesó el material conservado en cada filtro.

#### **3.5.1.3. Recolección de datos para ensayo de límites de consistencia.**

Equipos y herramientas:

- Tamiz N° 40
- Cuchara de Casagrande
- Ranurador
- Recipiente de porcelana
- Recipientes metálicos



- Espátula con una hoja flexible
- Balanza de precisión (0.01 gr)
- Horno
- Placa de vidrio esmerilado

Procedimiento (Limite liquido):

- Se consiguió una muestra representativa de 200 gramos del material que pasa por el tamiz N°40.
- La muestra seleccionada se mezcla con agua hasta tener una masa homogénea.
- La masa homogénea se pone en la cuchara de Casagrande esparciéndola y con el ranurador controlar la profundidad de 10 mm y hacer una ranura en el medio.
- Se empieza a girar la manija de la cuchara de Casagrande a una velocidad de 2 golpes por segundo hasta que las dos partes del material se junten.

Procedimiento (Limite plástico):

- Se consiguió una muestra representativa de 20 gramos del material que pasa por el tamiz N°40.
- La muestra seleccionada se mezcla con agua hasta tener una masa homogénea.
- Se moldea el material con los dedos sobre el vidrio esmerilado hasta formar un rollo, hasta el punto de que se empiece a agrietar.
- El diámetro del rollo debe ser de 3.22mm.
- Cuando el material empiece a agrietarse pesarlo y dejar secar el material en el horno y luego volver a pesarlo. De esta manera se obtendrá el contenido de humedad de la muestra.

#### **3.5.1.4. Recolección de datos para ensayo de corte directo.**

Equipos y herramientas:

- Equipo de corte directo
- Deformímetros
- Celda de agua
- Papel filtro
- Placas ranuradas
- Pistón de carga
- Piedras porosas

Procedimiento:



- Se debe asegurar que el equipo este calibrado correctamente.
- Se debe armar la caja y el equipo de corte
- Una vez colocada la caja correctamente, lubricar con aceite la superficie de contacto y asegurar los tornillos alineadores.
- Se procede a empujar la caja superior hasta que se salga del anillo y se ubique sobre la piedra porosa.
- Se procede a registrar los datos proporcionados por los deformímetros.

#### **3.5.1.5. Recolección de datos para ensayo de contenido de humedad.**

Equipos y herramientas:

- Horno
- Balanza de precisión (0.01gr)

Procedimiento:

- Pesar los recipientes metálicos.
- Se colocan las muestras previamente pesadas en los recipientes metálicos y se pone el horno por 24 h.
- Finalmente se pesan las muestras con el material seco.

#### **3.5.1.6. Recolección de datos para prueba de densidad in situ.**

Equipos y herramientas:

- Arena calibrada
- Equipo de densidad del cono de arena
- Balanza
- Combo
- Cíncel
- Brocha



### 3.6. Procedimientos de análisis de datos

#### 3.6.1. Título de la prueba o procedimiento

##### 3.6.1.1. Ensayo de granulométrico

**Figura 26**

*Ensayo granulométrico.*

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
Ensayo:		Análisis Granulométrico por Tamizado		
TESIS	"Análisis de riesgos mediante simulaciones de movimientos de masas en estructuras de protección. Central Hidroeléctrica de Machupicchu, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, Región de Cusco, 2021"			
TESISTAS	Follana Peralta, Harold Cristian Sallo Diaz, Irving Fernando			
Lugar:	Cerro el calvario			
Ubicación:	CHM			
Fecha:	21/07/2022			
TAMIZ N°	TAMIZ(mm)	%PASA	% RETENIDO	% RETENIDO ACUMULADO
	80	100	0	0
	63	100	0	0
	50	100	0	0
	40	98.08	1.92	1.92
	25	89.36	8.72	10.64
	20	84.06	5.3	15.94
	12.5	78.56	5.5	21.44
	10	75.26	3.3	24.74
	6.3	62.25	13.01	37.75
	5	58.71	3.54	41.29
	2	48.81	9.9	51.19
	1.25	42.61	6.2	57.39
	0.4	38.46	4.15	61.54
	0.25	32.74	5.72	67.26
	0.16	28.69	4.05	71.31
	0.08	21.69	7	78.31
Fondo			21.69	100
Total			100	100

*Nota.* Fuente: propia



### 3.6.1.2. Ensayo de límites de consistencia

**Figura 27**

*Ensayo de límites de consistencia*

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL				
Ensayo:		Límites de Consistencia		
TESIS	"Análisis de riesgos mediante simulaciones de movimientos de masas en estructuras de protección. Central Hidroeléctrica de Machupicchu, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, Región de Cusco, 2021"			
TESISTAS	Follana Peralta, Harold Cristian Sallo Diaz, Irving Fernando			
Lugar:	Cerro el calvario			
Ubicación:	CHM		Punto: C-01	
Fecha:	21/07/2022			
<b>Determinación Límite Líquido</b>				
Cápsula	N° 01	N° 02	N° 03	N° 04
Peso de Cápsula (gr)	16.54	15.48	14.62	14.59
Material Humedo + Peso de Cápsula (gr)	46.02	49.38	47.1	46.97
Material Seco + Peso de Cápsula (gr)	41.55	43.48	40.67	40.09
Número de golpes	35	31	22	17
Material seco (gr)	25.01	28	26.05	25.5
Peso del agua (gr)	4.47	5.9	6.43	6.88
Contenido de Humedad (%)	17.87%	21.07%	24.70%	26.98%
<b>Determinación Límite Plástico</b>				
Cápsula	N° 01	N° 02	N° 03	
Peso de Cápsula (gr)	15.89	16.54	15.28	
Material Humedo + Peso de Cápsula (gr)	28.12	25.22	25.16	
Material Seco + Peso de Cápsula (gr)	26.29	23.94	23.78	
Material seco (gr)	10.4	7.4	8.5	
Peso del agua (gr)	1.83	1.28	1.38	
Contenido de Humedad (%)	17.64%	17.25%	16.20%	
<b>RESULTADOS</b>				
LIMITE LIQUIDO			23.00%	
LIMITE PLASTICO			17.00%	
INDICE PLASTICO			6.00%	

Nota. Fuente: propia



### 3.6.1.3. Ensayo de corte directo

**Figura 28**

*Ensayo de corte directo*

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL						
Ensayo:			Corte Directo			
TESIS	"Análisis de riesgos mediante simulaciones de movimientos de masas en estructuras de protección. Central Hidroeléctrica de Machupicchu, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, Región de Cusco, 2021"					
TESISTAS	Follana Peralta, Harold Cristian Sallo Diaz, Irving Fernando					
Lugar:	Cerro el calvario				Densidad del suelo	1.89 Tn/m <sup>3</sup>
Ubicación:	CHM				Contenido de Hume	14.21%
Fecha:	21/07/2022				Punto:	C-01
<b>Datos de la Muestra</b>						
Lado	6					
Area	36					
<b>Datos del Equipo</b>						
C.D.D.=	0.001					
L.R.C.=	0.86					
Volumen=	126					
Peso=	228.06					
P.V.                      4Kg.                      ;ESF.VERTICAL						
Lec. Def.	Lec. Carga div.	deform. Muestra mm.	Area cm <sup>2</sup>	Esfuerzo cortante Kpa	Lectura Def. Vertical	
0	0.00	0.00	6	0	0	
20	11.00	0.20	35.88	25.86	1.59	
40	12.00	0.40	35.76	28.31	2.04	
60	13.00	0.60	35.64	30.77	2.89	
80	15.00	0.80	35.52	35.63	4.26	
100	18.00	1.00	35.4	42.9	5.24	
120	19.00	1.20	35.28	45.44	6.05	
140	20.00	1.40	35.16	47.99	7.65	
160	21.00	1.60	35.04	50.56	8.45	
180	23.00	1.80	34.92	55.57	9.24	
200	25.00	2.00	34.8	60.61	9.65	
220	26.00	2.20	34.68	63.25	10.54	
240	28.00	2.40	34.56	68.35	11.89	
260	27.00	2.60	34.44	66.14	12.65	
280	26.00	2.80	34.32	63.91	13.58	
<b>DATOS DE LA MUESTRA</b>						
Lado	6					
Area	36					
C.D.D.=	0.001					
L.R.C.=	0.86					
Volumen=	126					
Peso=	207.22					



P.V. 8Kg. ;ESF. VERTICAL

Lec. Def.	Lec. Carga div.	deform. Muestra mm.	Area cm2	Carga Tot. S/muestra Kpa	Lectura Def. Vertical
0	0.00	0.00	36	0	0
20	15.00	0.20	35.88	35.27	1.21
40	18.00	0.40	35.76	42.47	1.89
60	21.00	0.60	35.64	49.71	2.04
80	26.00	0.80	35.52	61.75	2.59
100	28.00	1.00	35.4	66.73	3.25
120	30.00	1.20	35.28	71.74	4.26
140	33.00	1.40	35.16	79.18	6.35
160	38.00	1.60	35.04	91.49	7.65
180	43.00	1.80	34.92	103.89	8.65
200	49.00	2.00	34.8	118.79	9.35
220	55.00	2.20	34.68	133.8	10.54
240	58.00	2.40	34.56	141.59	11.59
260	62.00	2.60	34.44	151.88	12.56
280	65.00	2.80	34.32	159.78	13.52
300	68.00	3.00	34.2	167.75	14.26
320	67.00	3.20	34.08	165.86	15.34
340	66.00	3.40	33.96	163.96	16.54

DATOS DE LA MUESTRA	
Lado	6
Area=	36
C.D.D.=	0.001
L.R.C.=	0.86
Volumen=	126
Peso=	216.22

P.V. 16Kg. ;ESF. VERTICAL

Lec. Def.	Lec. Carga div.	deform. Muestra mm.	Area cm2	Carga Tot. S/muestra Kpa	Lectura Def. Vertical
0	0.00	0.00	36	0	0
20	39.00	0.20	35.88	91.7	3.65
40	43.00	0.40	35.76	101.45	7.25
60	49.00	0.60	35.64	115.99	8.05
80	55.00	0.80	35.52	130.63	10.65
100	58.00	1.00	35.4	138.23	11.48
120	65.00	1.20	35.28	155.44	12.58
140	69.00	1.40	35.16	165.56	13.62
160	76.00	1.60	35.04	182.99	14.89
180	82.00	1.80	34.92	198.11	15.34
200	87.00	2.00	34.8	210.92	16.25
220	94.00	2.20	34.68	228.67	17.62
240	99.00	2.40	34.56	241.67	18.24
260	102.00	2.60	34.44	249.86	20.14
280	108.00	2.80	34.32	265.49	20.47
300	112.00	3.00	34.2	276.29	21.89
320	112.00	3.20	34.08	279.73	22.54
340	111.00	3.40	33.96	275.75	23.65
360	110.00	3.60	33.84	274.24	24.89

RESUMEN

Nro.	ESFUERZO NORMAL Kpa	ESFUERZO TANGENCIAL Kpa	Φ	C KN/cm2
1	107.18	68.35	32.5419	1.96
2	214.37	167.75		
3	428.073	279.73		

Nota. Fuente: propia



### 3.6.1.4. Ensayo de contenido de humedad

**Figura 29**

*Ensayo de contenido de Humedad*

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL			
Ensayo:		Contenido de humedad del suelo	
TESIS	"Análisis de riesgos mediante simulaciones de movimientos de masas en estructuras de protección. Central Hidroeléctrica de Machupicchu, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, Región de Cusco, 2021"		
TESISTAS	Follana Peralta, Harold Cristian		
	Sallo Diaz, Irving Fernando		
Lugar:	Cerro el calvario		Punto: C-01
Ubicación:	CHM		
Fecha:	21/07/2022		
Contenido de Humedad (%)			
Muestra	Nº01	Nº02	
Profundidad (M.)	2.00 m.	2.00 m.	
Peso de tara (gr)	58.64	51.47	
Peso de suelo húmedo + tara (gr)	802.16	699.04	
Peso de suelo seco + tara (gr)	709.14	618.97	
Peso del suelo Húmedo (gr)	743.52	647.57	
Peso del suelo seco (gr)	650.5	567.5	
Peso del agua (gr)	93.02	80.07	
Conenido de Humedad (W)	14.30%	14.11%	
Promedio:		14.21%	

*Nota.* Fuente: propia



### 3.6.1.5. Prueba de densidad in situ

**Figura 30**

*Prueba de densidad in situ*

UNIVERSIDAD ANDINA DEL CUSCO FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL	
Ensayo:	Prueba de Densidad IN SITU (Metodo con arena calibrada)
TESIS	"Análisis de riesgos mediante simulaciones de movimientos de masas en estructuras de protección. Central Hidroeléctrica de Machupicchu, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, Región de Cusco, 2021"
TESISTAS	Follana Peralta, Harold Cristian Sallo Diaz, Irving Fernando
Lugar:	Cerro el calvario
Ubicación:	CHM
Fecha:	21/07/2022
Profundidad	4"
Peso unitario de la Arena	1.41(gr/cm3)
Prueba N°	1
Ubicación	C-01
<b>DATOS DEL ENSAYO EN CAMPO</b>	
Número de Cono	3
Peso Inicial del Frasco + Cono (gr)	7241.00
Peso Residual del Frasco + Cono (gr)	3308.30
Peso del Suelo Extraído (gr)	3264.96
Peso de la Grava, retenido en tamiz 3/4" (gr)	0.00
Peos de la Arena Utilizada, hueco + cono (gr)	3932.71
Peso de la Arena en el Cono (gr)	1535.00
Peso de la Arena en el Hueco (gr)	2397.71
Volumen del Hueco (cm3)	1700.50
Peso Especifico de la Grava (gr/cm3)	2.30
Volumen de la Grava (cm3)	0.00
Peso del Suelo (gr)	3264.96
Volumen del Suelo (cm3)	1700.50
Densidad Húmeda del Suelo (gr/cm3)	1.92

Nota. Fuente: propia



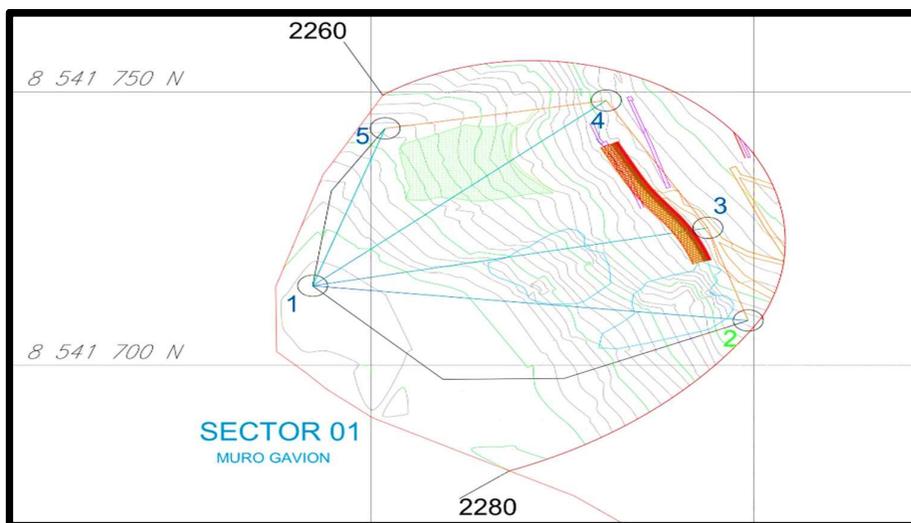
### 3.6.2. Análisis del talud

#### 3.6.2.1. Descripción del talud

Los taludes estudiados están en el sector 01:

**Figura 31**

Sector 01

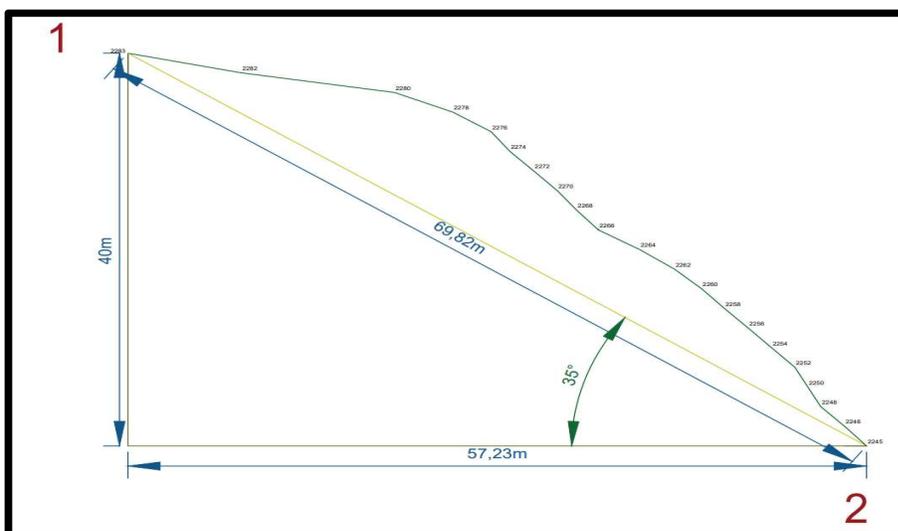


Nota. Fuente: propia

Los taludes estudiados son 4 y son los siguientes:

**Figura 32**

Talud N°1: P01 – P02

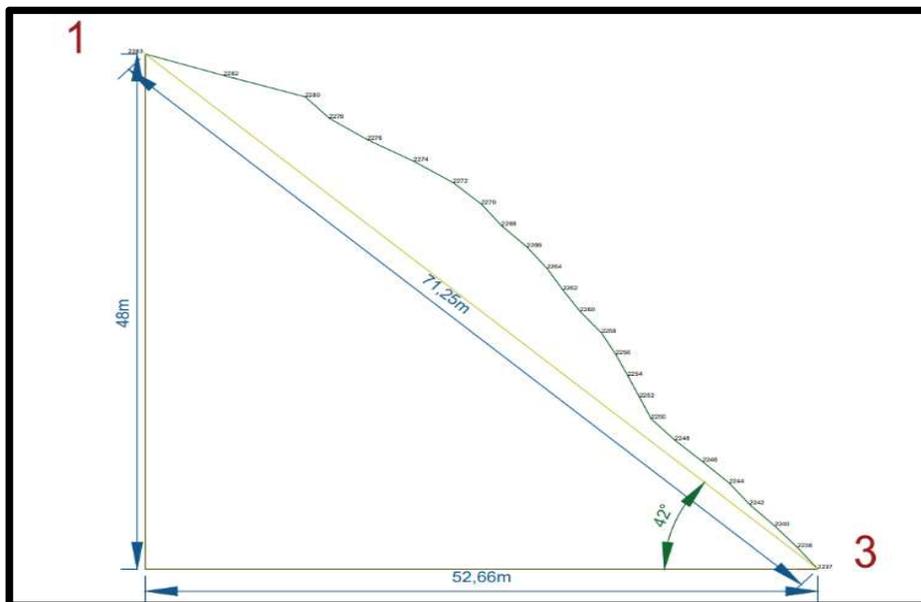


Nota. Fuente: propia



**Figura 33**

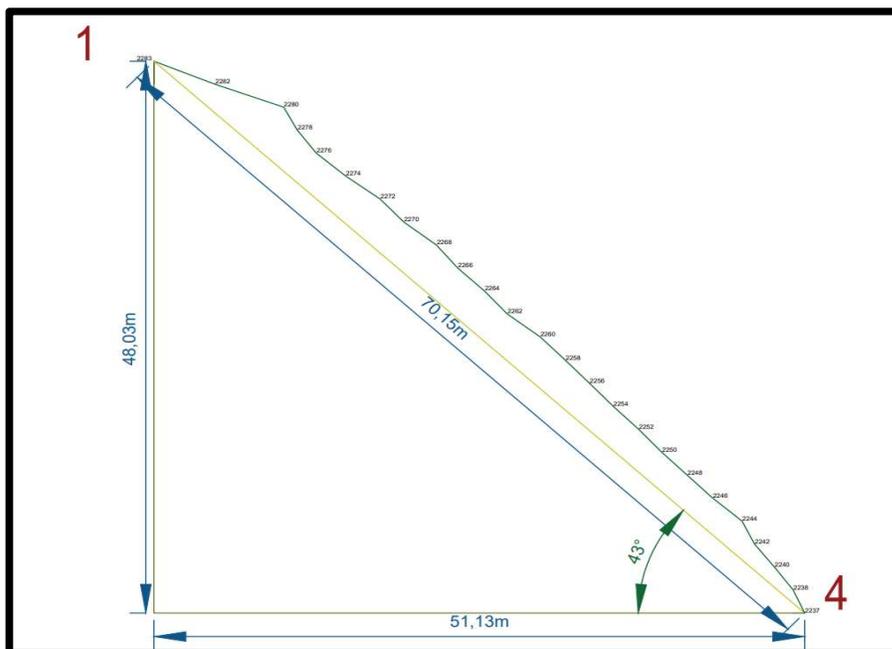
*Talud N°2: P01 – P03*



*Nota. Fuente: propia*

**Figura 34**

*Talud N°3: P01 – P04*

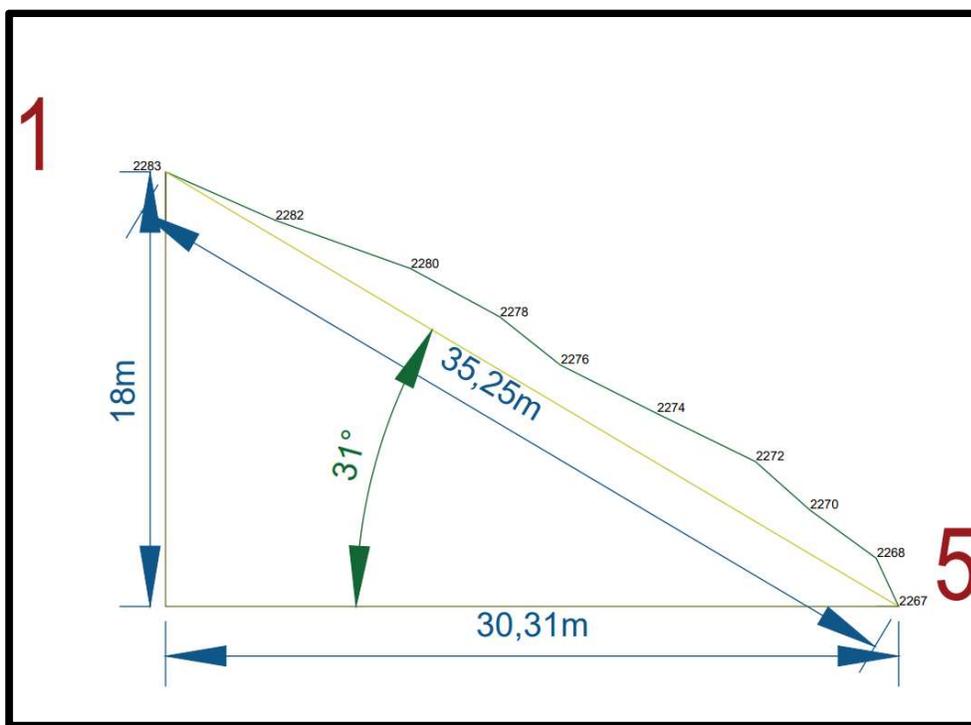


*Nota. Fuente: propia*



**Figura 35**

*Talud N°4: P01 – P05*



*Nota. Fuente: propia*

**3.6.3. Altura del talud:**

P01-P02= 40m

P01-P03= 48m

P01-P04= 48.03m

P01-P05= 18m

**3.6.4. Profundidad del talud**

P01-P02= 57.23m

P01-P03= 52.66m

P01-P04= 51.13m

P01-P05= 30.31m



### **3.6.5. Distancia inclinada del talud**

P01-P02= 69.82m.

P01-P03= 71.25m.

P01-P04= 70.15m.

P01-P05= 35.25m.

### **3.6.6. Pendiente del talud**

P01-P02= 0.7.       $\alpha=20^\circ$ .

P01-P03= 0.9.       $\alpha=42^\circ$ .

P01-P04= 0.933.       $\alpha=43^\circ$ .

P01-P05= 0.601.       $\alpha=31^\circ$ .

### **3.6.7. Longitud de pie del talud**

P02-P03= 17.73m

P03-P04= 26.81m

P04-P05= 29.31m

### **3.6.8. Perímetro**

El perímetro del sector 01 es 171m.

El perímetro del talud a estudiar es 161.38m.

### **3.6.9. Área**

El área del sector 01 es 2088.03m<sup>2</sup>.

El área del talud a estudiar es 1527.2 m<sup>2</sup>.

### **3.6.10. Angulo de fricción**

El Angulo de fricción del estrato superior (0m -1m) es: 18°

El Angulo de fricción del estrato inferior (1m -2m) es: 32°

### **3.6.11. Cohesión**

La cohesión del estrato superior (0m -1m) es: 1.96 KN/m<sup>2</sup>



La cohesión del estrato inferior (1m -2m) es: 0.98 KN/m<sup>2</sup>

### **3.6.12. Peso específico**

El peso específico del estrato superior (0m -1m) es: 15.927 KN/m<sup>3</sup>

El peso específico del estrato inferior (1m -2m) es: 18.590 KN/m<sup>3</sup>

### **3.6.13. Tipo de suelo**

El tipo de suelo del estrato superior (0m -1m) es: relleno constituido por gravas, limos, arenas, cobertura vegetal, piedras y materia orgánica.

El tipo de suelo del estrato inferior (1m -2m) es: Grava arcilloso- limosa con arena.

### **3.6.14. Movimientos de masa presente**

De acuerdo con las visitas de campo y análisis de estabilidad de taludes, es posible precisar que los deslizamientos existentes en el Cero Calvario son originados en la cima, se consideran como deslizamientos superficiales, es decir no hay grandes bloques en proceso de deslizamiento o inestabilidad.

De acuerdo con la clasificación de movimientos de masa según Varnes (1978) tenemos:

- Según el tipo de movimiento en masa: deslizamiento rotacional (pocas unidades) de rocas y detritos.
- Según la velocidad del movimiento en masa: moderado (1.5 m/mes a 1.6 m/día)

### **3.6.15. Evaluación de estabilidad del talud**

Los suelos del sector 01 presentan zonas inestables en los cuales se ha realizado el análisis de estabilidad que se detallan en seguida.

### **3.6.16. Análisis de estabilidad zona:**

- Teniendo como base la topografía del sector N° 01(cima) del cerro el Calvario, se ha realizado el análisis de estabilidad con los criterios de cálculo y parámetros indicados.
- Inicialmente se colocan los parámetros de topografía, a través de coordenadas. Estos datos se obtuvieron del levantamiento topográfico realizado de la zona del sector 01.

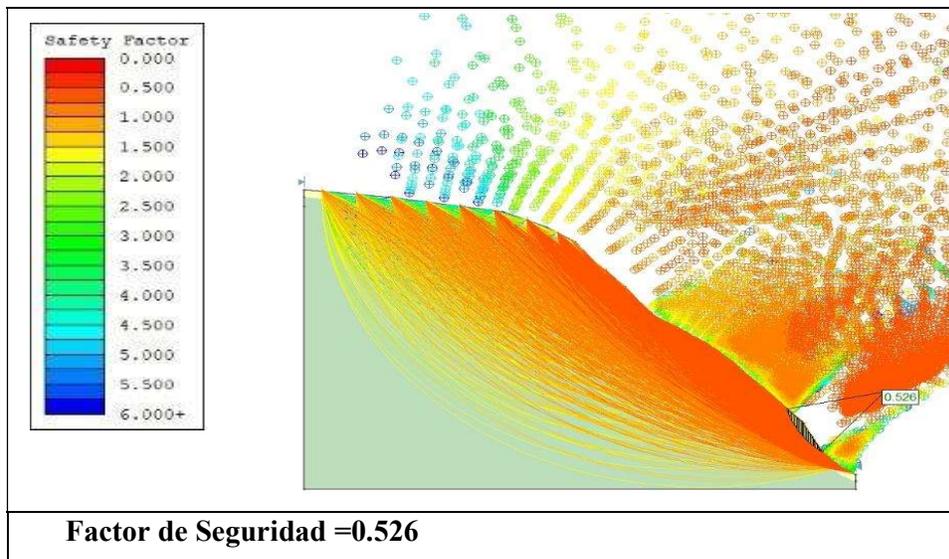


- Se colocan los parámetros del material, en las unidades establecidas por el programa Slide.
  - o Para el estrato superior o superficial:  
Peso específico=15.927 KN/m<sup>3</sup>, Cohesión= 1.96 KN/m<sup>2</sup> y  $\phi = 18^\circ$ 
    - o Para el estrato inferior o profundo:  
Peso específico=18.590 KN/m<sup>3</sup>, Cohesión= 0.98 KN/m<sup>2</sup> y  $\phi = 32^\circ$
- Estos datos fueron conseguidos de los ensayos de laboratorio realizado de las calicatas del sector 01, los mismos que entran al programa Slide para la simulación:
  - o Ensayo de corte directo (cohesión y ángulo de fricción).
  - o Prueba de densidad in situ (peso específico).
- No se colocó fronteras del nivel freático, porque no se encontró al momento de realizar las calicatas.
- Se coloca los límites del talud a analizar.
- Se coloca las cargas sobre el talud, se colocan las cargas representativas del gavión, que son cargas distribuidas.
- Se define el tipo de falla a simular, se definió una falla circular, ya que para una falla no circular se necesitan las dimensiones de la falla en caso existiera y fuera evidente tomar las medidas de esta.
- Se define el método de búsqueda matemático, se elige el método de auto refine search, ya que este método da valores más bajos en el factor de seguridad con respecto a los otros métodos que son más conservadores.
- Se define las características graficas del FS, y se define como se representará gráficamente.
- Se define los rangos del FS a mostrar en el grafico del interpretador.
- Se define manualmente superficies de falla extras de interés especial a mostrar en los planos, distintos al mínimo global.
- Finalmente se configuro con los parámetros necesarios a mostrar en los planos.

3.6.17. Análisis de estabilidad de cada talud:

**Figura 36**

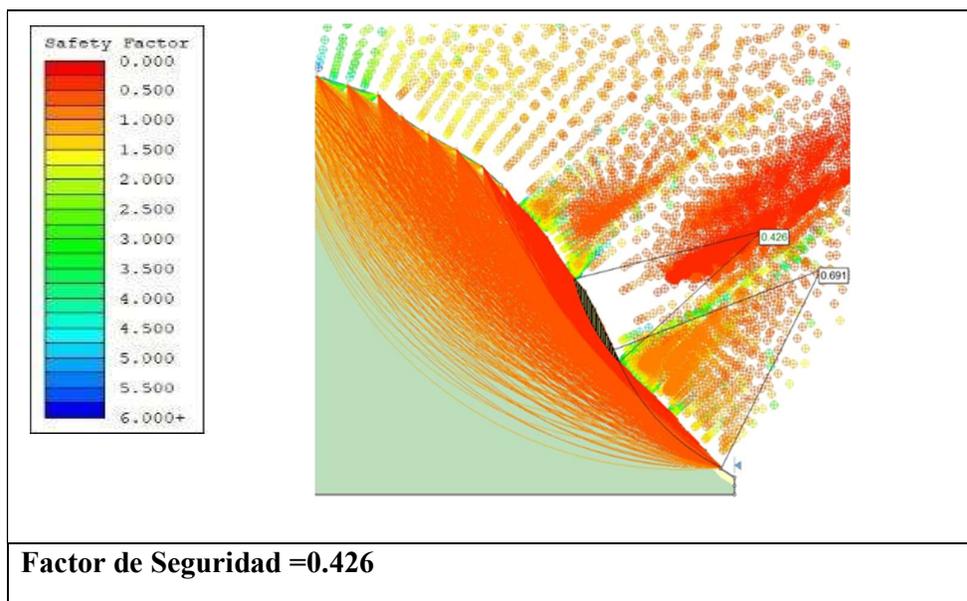
Estabilidad en el talud N°1: P01 – P02



Nota. Fuente: propia

**Figura 37**

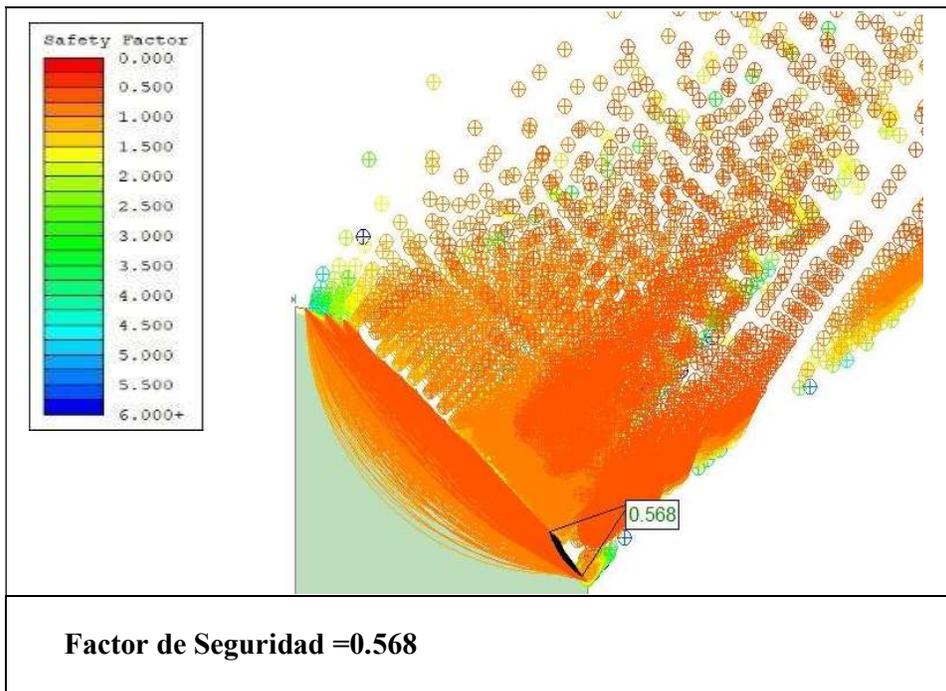
Estabilidad en el talud N°1: P01 – P03



Nota. Fuente: propia.

**Figura 38**

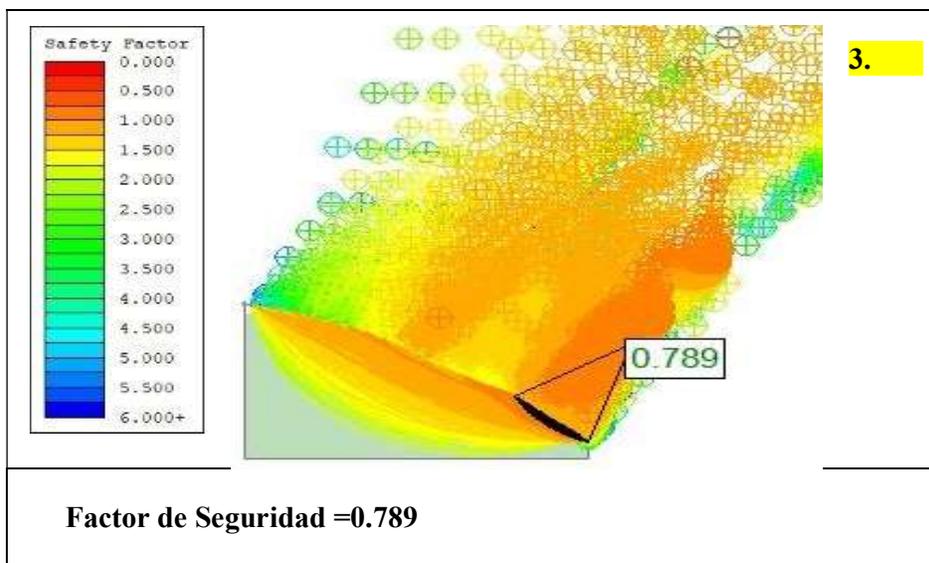
*Estabilidad en el talud N°1: P01 – P04*



*Nota.* Fuente: propia.

**Figura 39**

*Estabilidad en el talud N°1: P01 – P05*



*Nota.* Fuente: propia.

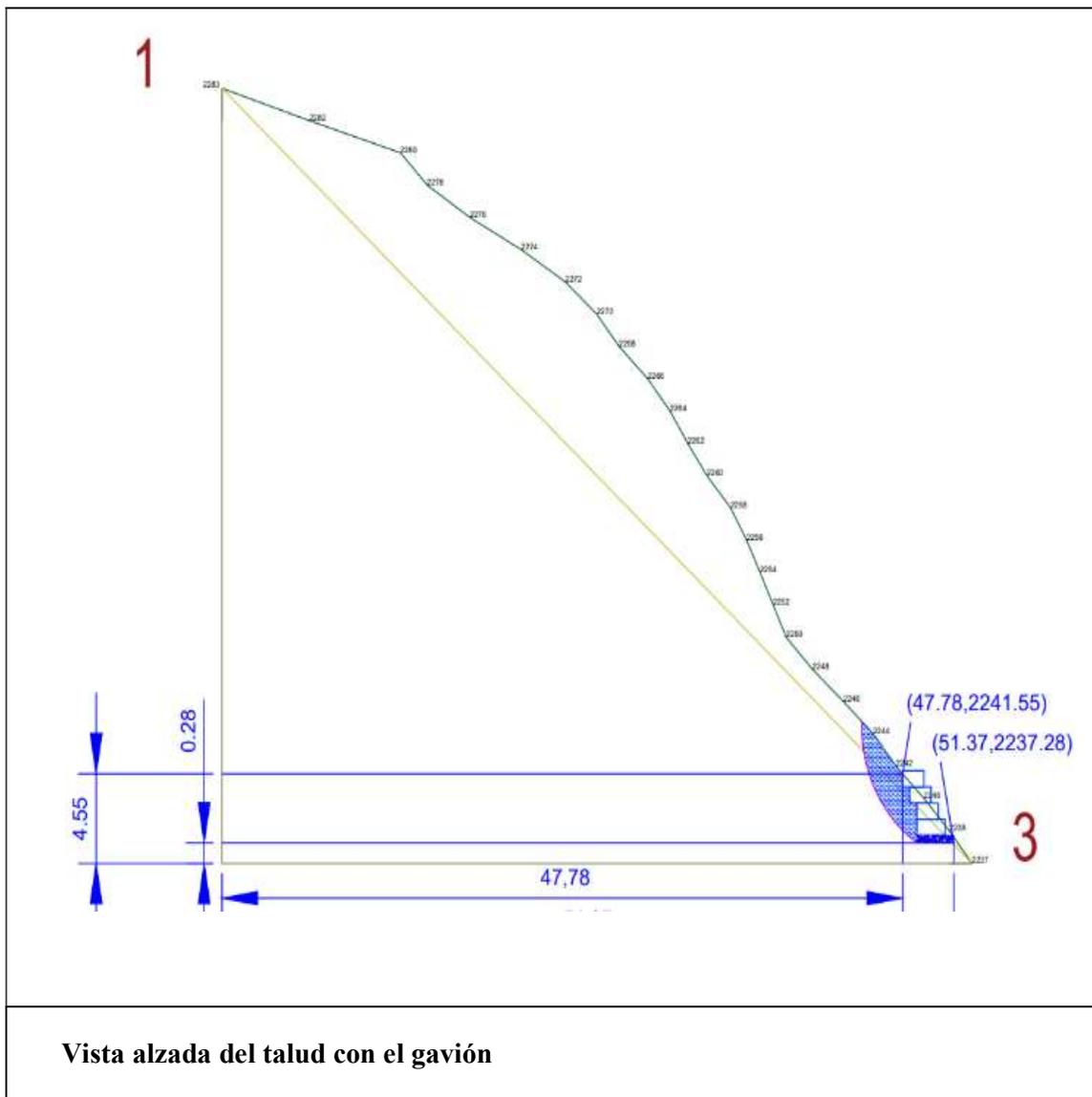


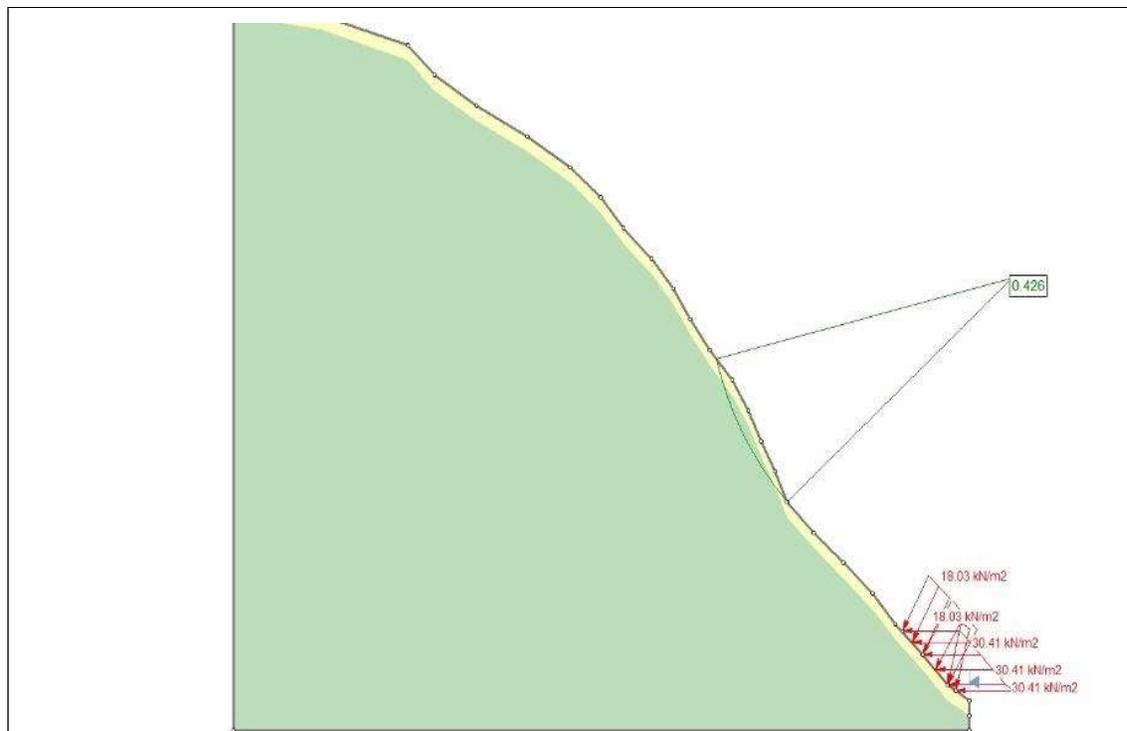
3.6.18. Análisis de estabilidad con el gavión inicial:

El análisis ha dado como resultado diferentes factores de seguridad:

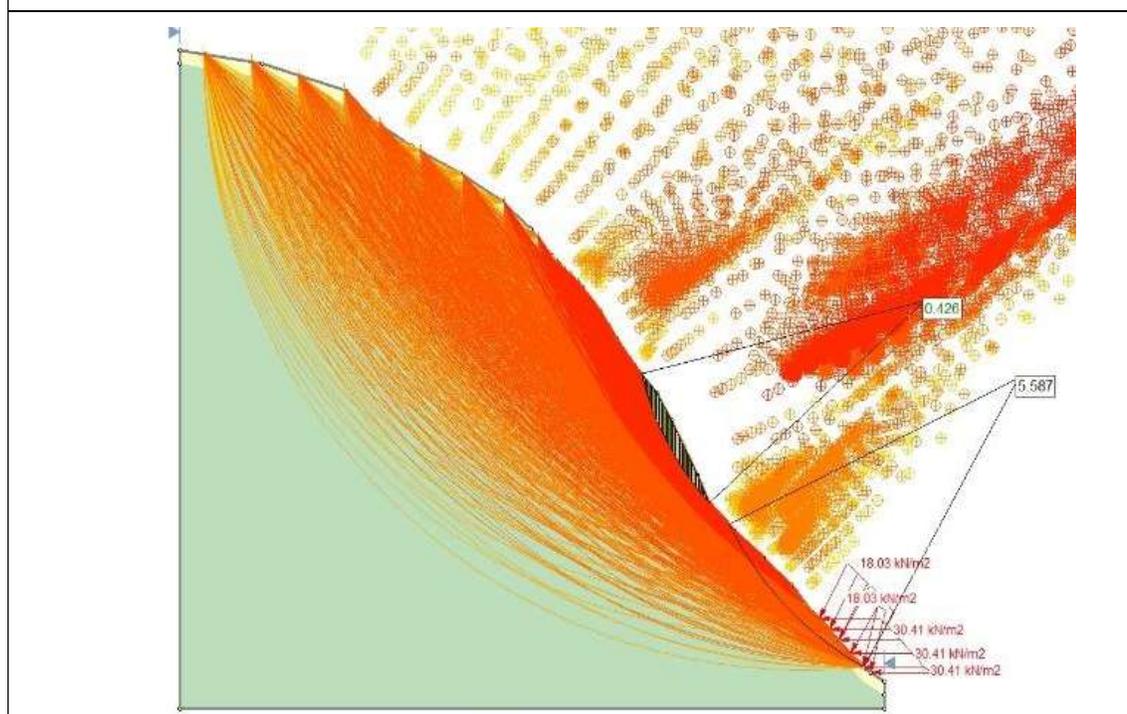
Figura 40

Modelamiento con gavión inicial

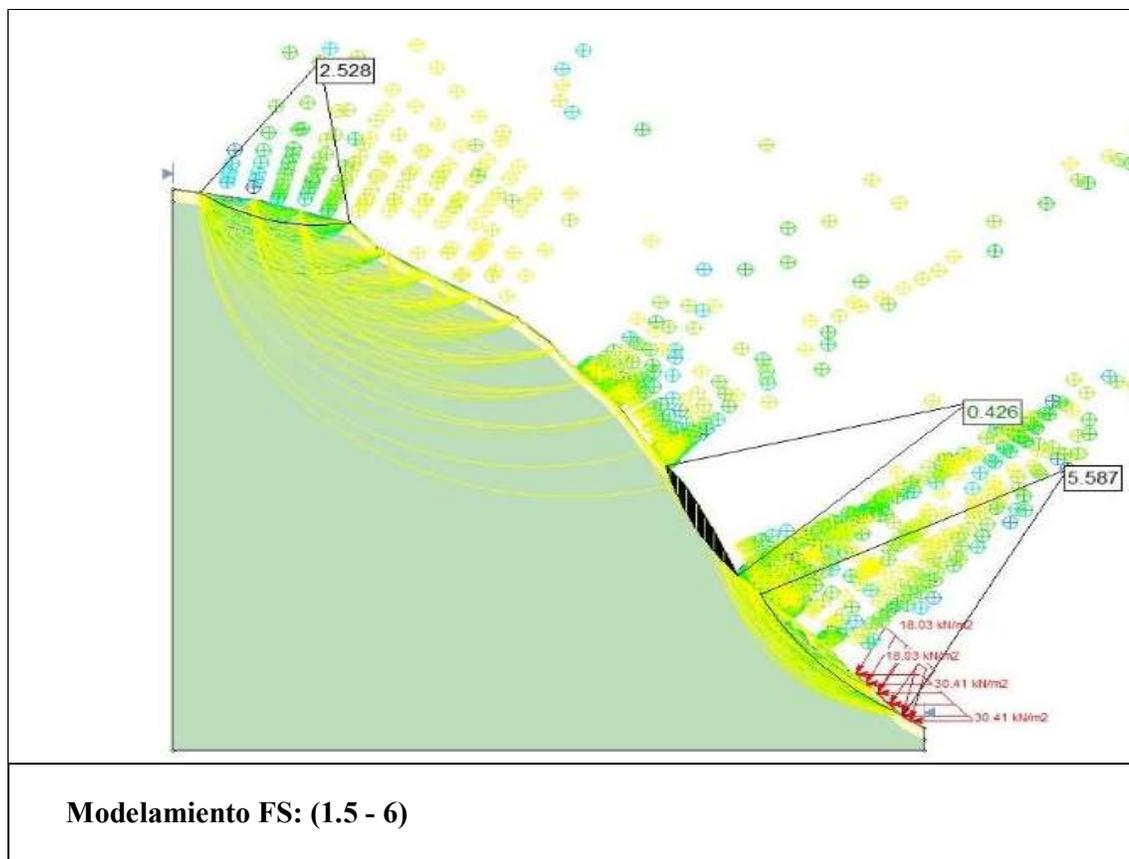




**Distribución de cargas. FS: 0.426**



**Modelamiento FS:(0 – 1.5)**



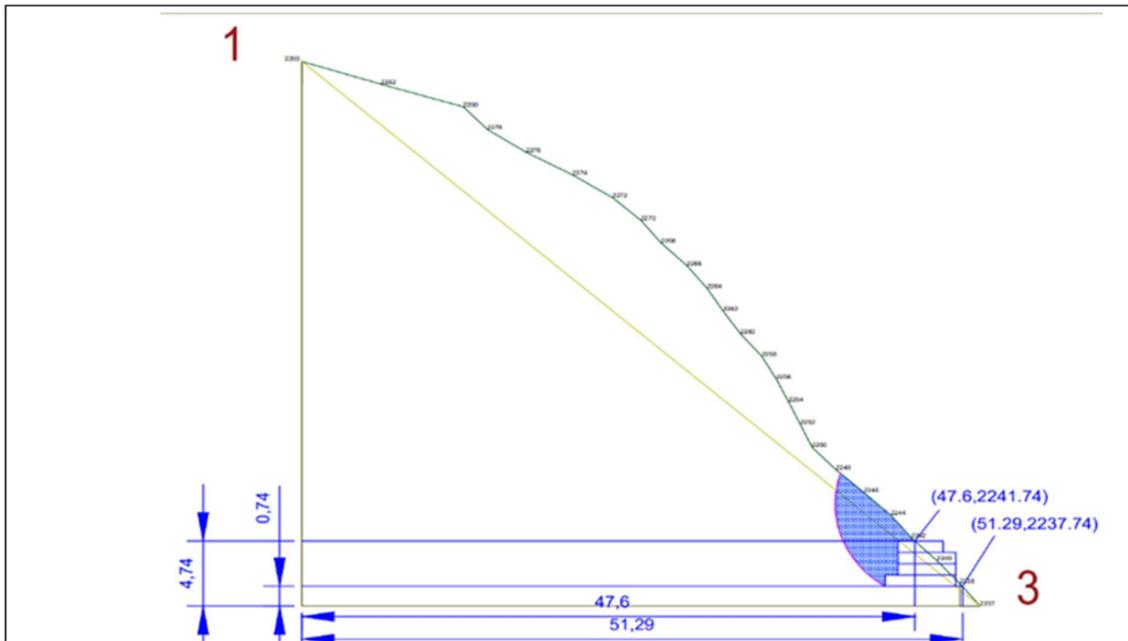
*Nota.* Fuente: propia.



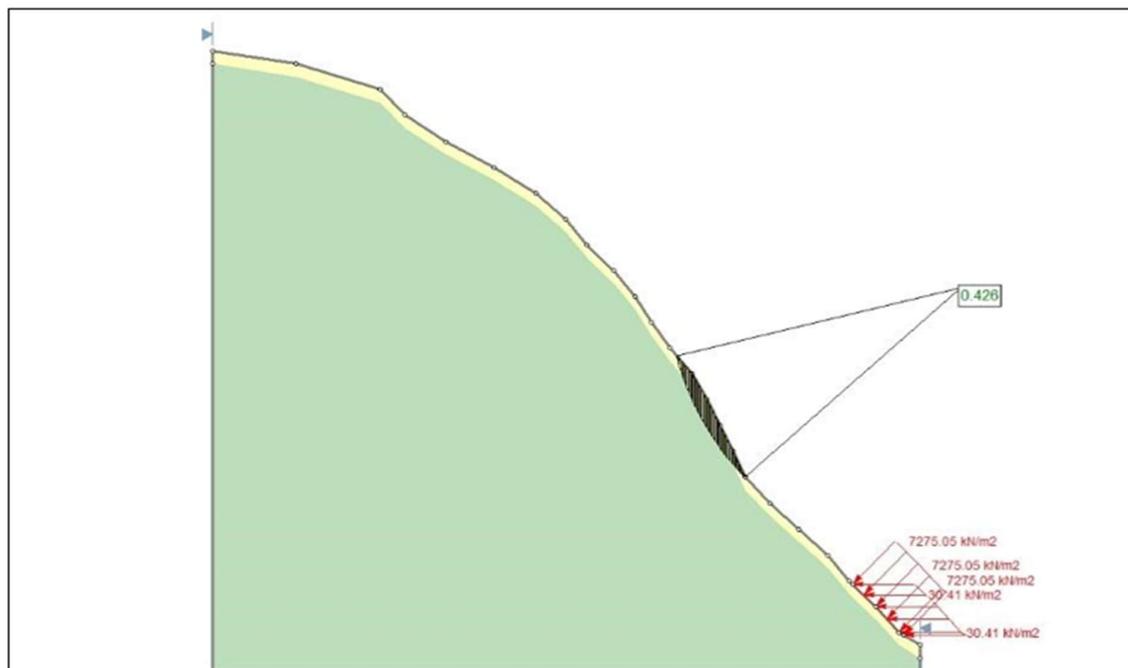
3.6.19. Análisis de estabilidad con el gavión de la propuesta:

Figura 41

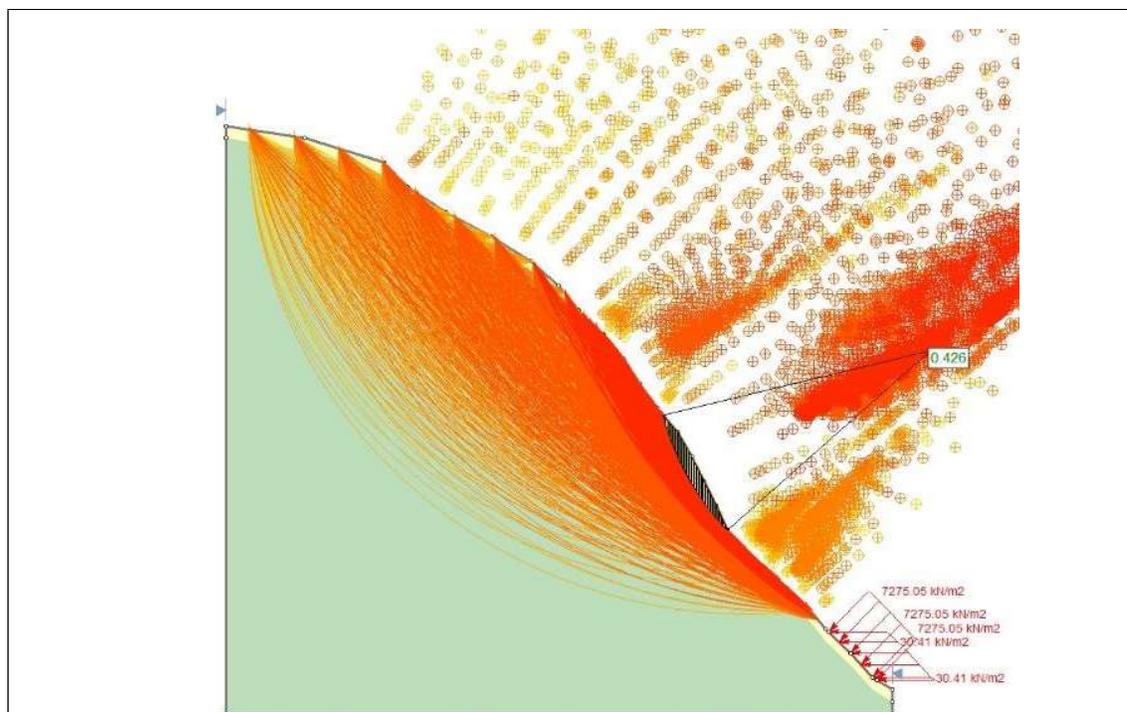
Modelamiento con gavión de la propuesta



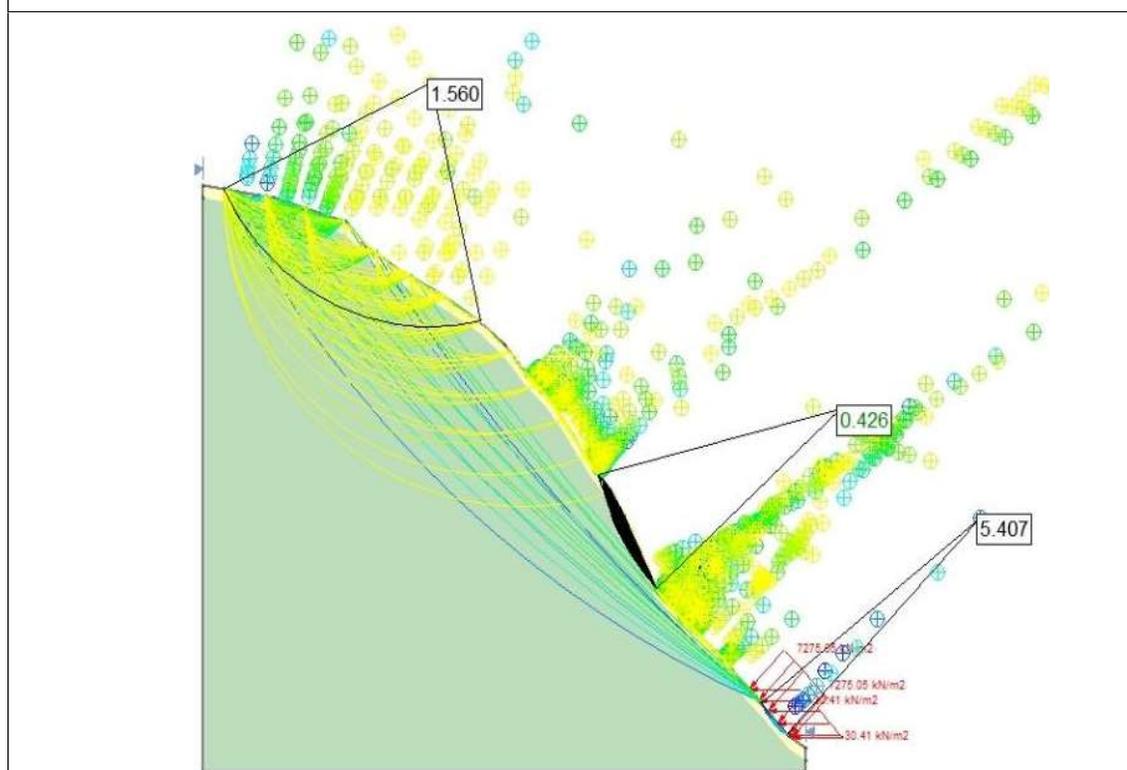
Vista alzada del talud con el gavión



Distribución de cargas. FS: 0.426



**Modelamiento FS:(0 – 1.5)**



**FIGURModelamiento FS:(1.5 - 6)**

*Nota.* Fuente: propia.



### **3.6.19.1. Descripción de las obras de protección en el sector 01**

Una de las actividades de protección del proyecto en el Sector 01 es la construcción de muros de contención apoyados en gaviones para la estabilidad de los taludes.

### **3.6.19.2. Tipo De Gavión A Utilizarse**

Los gaviones que se emplearán en todos los escenarios serán del Tipo Caja Plastificada, según las obras previstas. Se distinguen por ser elementos prismáticos rectangulares compuestos por una red de alambre de acero de doble torsión recubierta de un revestimiento protector, y separados en celdas mediante diafragmas intermedios.

### **3.6.19.3. Red**

De acuerdo con la normativa ASTM A 975-97, la red es una malla hexagonal de doble torsión que se produce retorciendo dos hilos de alambre mediante tres medias torsiones.

los gaviones de caja medirán 10cm x 12 cm. Con un revestimiento adicional de PVC, los alambres utilizados para crear esta malla tienen un diámetro de 2,70 mm.

### **3.6.19.4. Piedra Para Llenado**

Las dimensiones de la piedra deben ser lo más regulares posible y estar dentro de la mayor dimensión de la abertura más ancha de la malla y el doble de ese valor. Las piedras de dimensiones inferiores a las indicadas pueden aceptarse hasta un 5% del volumen total. Para el gavión tipo caja, el tamaño de la piedra debe estar comprendido entre 6 a 10.

### **3.6.19.5. Dimensiones de los gaviones**

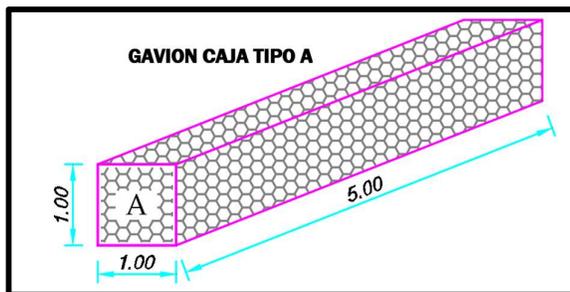
Son construidos 2 tipos de gaviones con las siguientes dimensiones:

GAVIÓN TIPO A: 1.00 m. \* 1.50 m. \* 5.00 m.

GAVIÓN TIPO B: 1.5 m. \* 1.50 m. \* 5.00 m.

**Figura 42**

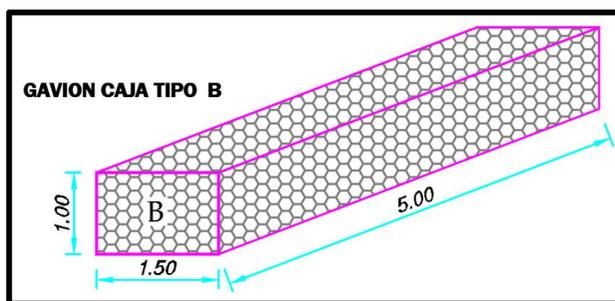
*Dimensiones gavión A*



*Nota.* Fuente: propia.

**Figura 43**

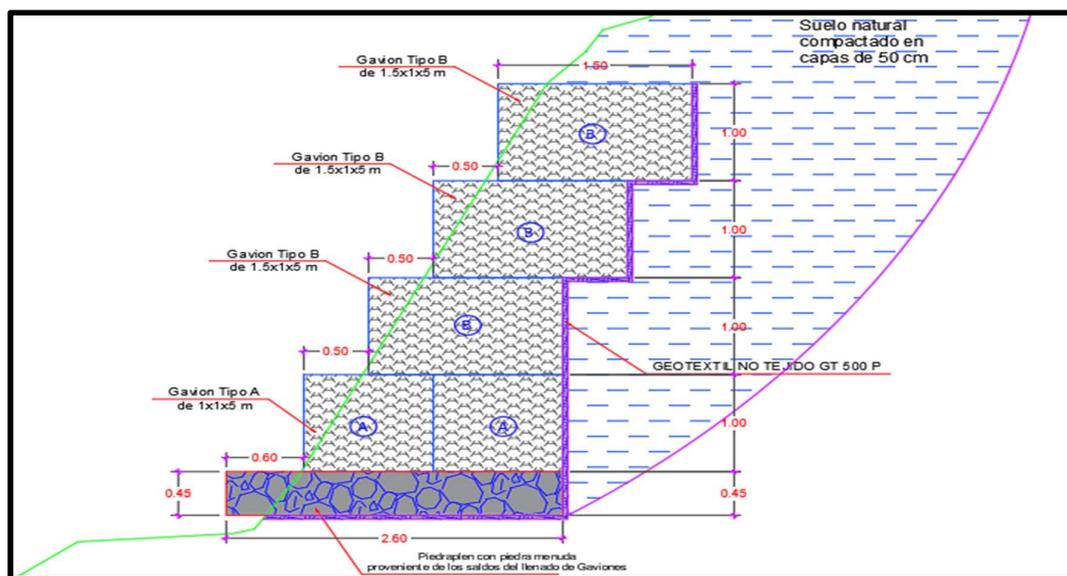
*Dimensiones gavión B*



*Nota.* Fuente: propia.

**Figura 44**

Ubicación de los gaviones en el sector 01



*Nota.* Fuente: propia.



## 4. RESULTADOS

### 4.1. Resultados del talud

#### 4.1.1. Análisis del talud:

El análisis que se realizó a cada talud da como resumen:

- Talud (P01 - P02),  $FS=0.526$
- Talud (P01 - P03),  $FS=0.426$
- Talud (P01 - P04),  $FS=0.568$
- Talud (P01 - P05),  $FS=0.789$
- El talud más crítico es el Talud (P01 - P03), donde se modelo el gavión.
- Y el talud menos crítico es el Talud (P01 - P05)
- En el modelamiento se puso los dos métodos más utilizados:
- El primer método es el Grip Search, este método es más conservador, este método prioriza la pendiente del talud.
- El segundo método es el Auto Refine Search, este método genera FS más bajos que los otros métodos, es el menos conservador y tomas muchos más puntos en la evaluación del talud.
- El modelamiento nos muestra que es una zona muy inestable y que es necesario tomar acciones pertinentes.

#### 4.1.2. Análisis de estabilidad con el gavión inicial:

**Tabla 2**

*Cuadro comparativo de factores de seguridad*

Factores de Seguridad en el área de influencia del gavión	
Sin gavión	$FS=0.691$
Con gavión	$FS=5.587$

*Nota.* Fuente: propia.



El análisis ha dado como resultado diferentes factores de seguridad:

- El FS más crítico es 0.426, el gavión no a influenciado en la zona mas critica, por lo cual el FS sigue siendo el mismo.
- El gavión mejoro el FS de la zona en donde tiene su área de influencia, donde el FS de su zona de influencia es 5.587, mas no llega a influenciar en el área más crítica del talud.
- En la zona de la cima se aprecia un FS muy bueno ya que este es influenciado por la pendiente de esa área, cuyo FS es 2.528.

#### 4.1.3. *Análisis de estabilidad con el gavión de la propuesta:*

**Tabla 3**

*Cuadro comparativo de factores de seguridad*

Factores de Seguridad en el área de influencia del gavión	
Sin gavión	FS=0.691
Con gavión inicial	FS=5.587
Con gavión de la propuesta	FS=5.407

*Nota.* Fuente: propia.

El análisis ha dado como resultado diferentes factores de seguridad:

- El FS más crítico es 0.426, el gavión no ha influenciado en la zona más crítica, por lo cual el FS sigue siendo el mismo.
- El gavión mejoro el FS de la zona en donde tiene su área de influencia, donde el FS de su zona de influencia es 5.407, mas no llega a influenciar en el área más crítica del talud.
- En la zona de la cima se aprecia un FS muy bueno ya que este es influenciado por la pendiente de esa área, cuyo FS es 1.5.



#### 4.1.4. *Determinación de peligro por deslizamiento en el talud del sector 1*

Empleando el proceso de análisis jerárquico, para determinar el grado de peligro de corrimiento de tierras en la región, se tuvieron en cuenta parámetros de evaluación y variables de susceptibilidad.

**Tabla 4**

*Factores de Susceptibilidad a deslizamientos*

Factores de Susceptibilidad	
Factores condicionantes	Factores desencadenantes
Pendiente	
Geomorfología	Precipitación
Geología	

*Nota.* Fuente: propia.

**Tabla 5**

*Parámetro de evaluación*

Parámetro de Evaluación
Tiempo de retorno

*Nota.* Fuente: propia.

##### 4.1.4.1. **Susceptibilidad del lugar de estudio.**

Para la evaluación de la susceptibilidad se tuvieron en cuenta los factores condicionantes y desencadenantes.

##### 4.1.4.1.1. *Análisis de factores condicionantes.*

Se realizó la ponderación de los factores condicionantes mediante una matriz de comparación de pares.



**Tabla 6**

*Matriz de comparación de pares factores condicionantes*

Factores condicionantes	Pendiente	Geomorfología	Geología
Pendiente	1.00	2.00	1.00
Geomorfología	0.500	1.00	1.00
Geología	1.000	1.000	1.00
SUMA	2.50	4.00	3.00
1/SUMA	0.40	0.25	0.33

*Nota.* Fuente: propia.

**Tabla 7**

**Matriz de normalización de los pares de los factores condicionantes**

Factores condicionantes	Pendiente	Geomorfología	Geología	Vector priorización	%
Pendiente	0.40	0.50	0.33	0.411	41.11
Geomorfología	0.20	0.25	0.33	0.261	26.11
Geología	0.40	0.25	0.33	0.328	32.78
				1.000	100.000

*Nota.* Fuente: propia.

El índice de consistencia (IC) y la relación de consistencia (RC) obtenidos del proceso de análisis jerárquico de los factores condicionantes, son:

IC: 0.027



RC:  $0.037 < 0.1$  ok!

#### 4.1.4.2. Parámetro: Pendiente

De acuerdo al Digital Elevation Model DEM (Modelo de elevación digital) se identificaron 5 intervalos de pendientes, los cuales fueron ordenados de acuerdo al área de influencia de cada intervalo de pendiente:

**Tabla 8**

*Descriptorios pendientes*

Descripción	Rango
Muy Alta ( $>35^\circ$ )	$>35^\circ$
Alta ( $25-35^\circ$ )	$25-35^\circ$
Moderada ( $15-25^\circ$ )	$15-25^\circ$
Baja ( $8-15^\circ$ )	$8-15^\circ$
Muy baja ( $0-8^\circ$ )	$0-8^\circ$

*Nota.* Fuente: propia.

**Figura 45**

*Mapa de pendientes en el área de estudio*



*Nota.* Fuente: propia.

Se realizó la ponderación de los descriptorios del parámetro pendiente.



**Tabla 9**

*Matriz de comparación de pares del parámetro pendiente*

Pendiente	>35°	25-35°	15-25°	8-15°	0-8°
Muy Alta (>35°)	1.00	3.00	5.00	6.00	9.00
Alta ( 25-35°)	0.33	1.00	3.00	5.00	6.00
Moderada (15-25°)	0.20	0.33	1.00	3.00	5.00
Baja (8-15°)	0.17	0.20	0.33	1.00	3.00
Muy baja (0-8°)	0.11	0.17	0.20	0.33	1.00
SUMA	1.81	4.70	9.53	15.33	24.00
1/SUMA	0.55	0.21	0.10	0.07	0.04

*Nota.* Fuente: propia.

**Tabla 10**

*Matriz de comparación de pares del parámetro pendiente*

Pendiente	>35°	25-35°	15-25°	8-15°	0-8°	Vector priorización	%
Muy Alta (>35°)	0.55	0.64	0.52	0.39	0.38	0.496	49.62
Alta ( 25-35°)	0.18	0.21	0.31	0.33	0.25	0.258	25.75
Moderada (15-25°)	0.11	0.07	0.10	0.20	0.21	0.138	13.80
Baja (8-15°)	0.09	0.04	0.03	0.07	0.13	0.072	7.20
Muy baja (0-8°)	0.06	0.04	0.02	0.02	0.04	0.036	3.62
						1.00	100.00

*Nota.* Fuente: propia.

El índice de consistencia (IC) y la relación de consistencia (RC) obtenidos del proceso de análisis jerárquico del parámetro pendiente, son:

IC: 0.066

RC: 0.060 < 0.1 ok!

#### 4.1.4.3. Parámetro: Geomorfología

Se encontraron 3 formaciones geomorfológicas, estas son:

**Tabla 11**

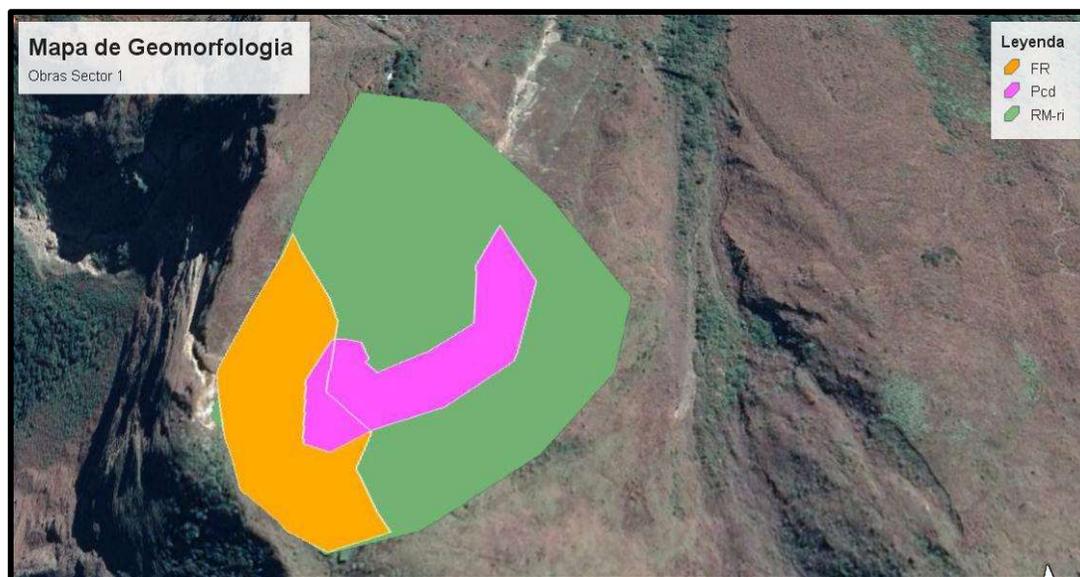
*Descriptor geomorfología*

Descriptor	Nomenclatura
Montaña de Roca Intrusiva	Mri
Piedemonte coluvio-deluvial	Pcd
Fracturas de Roca	FR

*Nota.* Fuente: propia.

**Figura 46**

*Mapa de geomorfología en el área de estudio*



*Nota.* Fuente: propia.

Se realizó la ponderación de los descriptores del parámetro geomorfología.



**Tabla 12**

*Matriz de comparación de pares del parámetro geomorfología*

Geomorfología	Mri	Pcd	FR
Montaña de Roca Intrusiva	1.00	2.00	2.00
Piedemonte coluvio-deluvial	0.50	1.00	2.00
Fracturas de Roca	0.50	0.50	1.00
SUMA	2.00	3.50	5.00
1/SUMA	0.50	0.29	0.20

*Nota.* Fuente: propia.

**Tabla 13**

*Matriz de normalización del parámetro geomorfología*

Geomorfología	Mri	Pcd	FR	Vector priorización	%
Montaña de Roca Intrusiva	0.50	0.57	0.40	0.490	49.05
Piedemonte coluvio-deluvial	0.25	0.29	0.40	0.312	31.19
Fracturas de Roca	0.25	0.14	0.20	0.198	19.76
				1.00	100.00

*Nota.* Fuente: propia.

El índice de consistencia (IC) y la relación de consistencia (RC) obtenidos del proceso de análisis jerárquico del parámetro geomorfología, son:

IC: 0.002

RC: 0.004 < 0.1 ok!

#### 4.1.4.4. Parámetro: Geología

Dentro del área de estudio se encontraron dos formaciones geológicas y tres depósitos cuaternarios:

**Tabla 14**

*Descriptores geología*

Descriptores	Nomenclatura
Plutón Machupicchu (P-mp)	P-mp
Dep. Coluvial (D-c)	D-c
Dep. Fluvial (D-fl)	D-fl
Dep. Aluvial (D-a)	D-a
Complejo Iscaybamba (C-Is)	C-Is

*Nota.* Fuente: propia.

**Figura 47**

*Mapa de geología en el área de estudio*



*Nota.* Fuente: propia.

Se realizó la ponderación de los descriptores del parámetro geología.



**Tabla 15**

*Matriz de comparación de pares del parámetro geología*

Geología	P-mp	D-c	D-fl	D-a	C-Is
Plutón Machupicchu (P-mp)	1.00	3.00	5.00	7.00	9.00
Dep. Coluvial (D-c)	0.33	1.00	3.00	5.00	7.00
Dep. Fluvial (D-fl)	0.20	0.33	1.00	3.00	5.00
Dep. Aluvial (D-a)	0.14	0.20	0.33	1.00	3.00
Complejo Iscaybamba (C-Is)	0.11	0.14	0.20	0.33	1.00
SUMA	1.79	4.68	9.53	16.33	25.00
1/SUMA	0.56	0.21	0.10	0.06	0.04

*Nota.* Fuente: propia.

**Tabla 16**

*Matriz de normalización del parámetro geología*

Geología	P-mp	D-c	D-fl	D-a	C-Is	Vector priorización	%
Plutón Machupicchu (P-mp)	0.56	0.64	0.52	0.43	0.36	0.503	50.28
Dep. Coluvial (D-c)	0.19	0.21	0.31	0.31	0.28	0.260	26.02
Dep. Fluvial (D-fl)	0.11	0.07	0.10	0.18	0.20	0.134	13.44
Dep. Aluvial (D-a)	0.08	0.04	0.03	0.06	0.12	0.068	6.78
Complejo Iscaybamba (C-Is)	0.06	0.03	0.02	0.02	0.04	0.035	3.48



1.00

100.00

*Nota.* Fuente: propia.

El índice de consistencia (IC) y la relación de consistencia (RC) obtenidos del proceso de análisis jerárquico del parámetro geomorfología, son:

IC: 0.061

RC:  $0.054 < 0.1$  ok!

#### 4.1.5. *Análisis del factor desencadenante*

Para el factor desencadenante, se consideraron las precipitaciones anómalas en el área de estudio.

La precipitación se clasificó en función a los porcentajes superiores a su normal climático, como se muestra en el siguiente cuadro:

**Tabla 17**

*Descriptores precipitaciones anómalas*

Descripción	Nomenclatura
60-80% superior a su normal climático (S60)	S60
40-60% superior a su normal climático (S40)	S40
30-40% superior a su normal climático (S30)	S30
25-30% superior a su normal climático (S25)	S25
20-25% superior a su normal climático (S20)	S20

*Nota.* Fuente: propia.

Se realizó la ponderación de los descriptores de precipitaciones anómalas.



**Tabla 18**

*Matriz de comparación de pares del parámetro precipitaciones anómalas*

Precipitación	S60	S40	S30	S25	S20
60-80% superior a su normal climático (S60)	1.00	2.00	3.00	4.00	5.00
40-60% superior a su normal climático (S40)	0.50	1.00	2.00	3.00	4.00
30-40% superior a su normal climático (S30)	0.33	0.50	1.00	2.00	3.00
25-30% superior a su normal climático (S25)	0.25	0.33	0.50	1.00	2.00
20-25% superior a su normal climático (S20)	0.20	0.25	0.33	0.50	1.00
SUMA	2.28	4.08	6.83	10.50	15.00
1/SUMA	0.44	0.24	0.15	0.10	0.07

*Nota.* Fuente: propia.

**Tabla 19**

*Matriz de normalización del parámetro precipitaciones anómalas*

Precipitación	S6	S4	S3	S2	S2	Vector priorizaci ón	%
60-80% superior a su normal climático (S60)	0.4 4	0.4 9	0.4 4	0.3 8	0.3 3	0.416	41.62
40-60% superior a su normal climático (S40)	0.2 2	0.2 4	0.2 9	0.2 9	0.2 7	0.262	26.18
30-40% superior a su normal climático (S30)	0.1 5	0.1 2	0.1 5	0.1 9	0.2 0	0.161	16.11



25-30% superior a su normal climático (S25)	0.1	0.0	0.0	0.1	0.1			
	1	8	7	0	3	0.099	9.86	
20-25% superior a su normal climático (S20)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0			
	9	6	5	5	7	0.062	6.24	
							100.0	
							1.00	0

*Nota.* Fuente: propia.

El índice de consistencia (IC) y la relación de consistencia (RC) obtenidos del proceso de análisis jerárquico del parámetro geomorfología, son:

IC: 0.017

RC:  $0.015 < 0.1$  ok!

#### 4.1.6. *Análisis del parámetro tiempo de retorno*

Para el siguiente parámetro se empleó el proceso de análisis jerárquico, con el objetivo de los pesos ponderados del parámetro de evaluación.

La precipitación se clasificó como se exhibe en el siguiente cuadro:

**Tabla 20**

*Descriptor tiempo de retorno*

\_\_\_\_\_  
Tiempo de retorno

\_\_\_\_\_  
5 años

10 años

25 años

50 años

100 años  
\_\_\_\_\_

*Nota.* Fuente: propia.

Se realizó la ponderación de los descriptores de precipitaciones anómalas.



**Tabla 21**

*Matriz de comparación de pares del parámetro tiempo de retorno*

Tiempo de retorno	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años
5 años	1.00	3.00	5.00	7.00	9.00
10 años	0.33	1.00	3.00	5.00	7.00
25 años	0.20	0.33	1.00	3.00	5.00
50 años	0.14	0.20	0.33	1.00	3.00
100 años	0.11	0.14	0.20	0.33	1.00
SUMA	1.79	4.68	9.53	16.33	25.00
1/SUMA	0.56	0.21	0.10	0.06	0.04

*Nota.* Fuente: propia.

**Tabla 22**

*Matriz de normalización del parámetro precipitaciones anómalas*

Tiempo de retorno	5 años	10 años	25 años	50 años	100 años	Vector priorización	%
5 años	0.56	0.64	0.52	0.43	0.36	0.503	50.28
10 años	0.19	0.21	0.31	0.31	0.28	0.260	26.02
25 años	0.11	0.07	0.10	0.18	0.20	0.134	13.44
50 años	0.08	0.04	0.03	0.06	0.12	0.068	6.78
100 años	0.06	0.03	0.02	0.02	0.04	0.035	3.48
						1.00	100.00

*Nota.* Fuente: propia.

El índice de consistencia (IC) y la relación de consistencia (RC) obtenidos del proceso de análisis jerárquico del parámetro geomorfología, son:



IC: 0.061

RC: 0.054 < 0.1 ok!

**Tabla 23**

*Resumen del análisis de peligro ante deslizamiento*

FACTOR		PARÁMETRO		DESCRIPTOR		Ppa	r x	
NOMBRE	PES O	NOMBRE	PES O	NOMBRE	PES O	CLASIFICA CIÓN	PES O	Pde sc
SUCEPTIBIL IDAD DE MOVIMIEN TOS EN MASA	90 %	Condicion ante	80 %	Pendiente	0.4 11	Muy Alta (>35°)	0.4 96	0.2 04
						Alta ( 25-35°)	0.2 58	0.1 06
						Moderada (15-25°)	0.1 38	0.0 57
						Baja (8-15°)	0.0 72	0.0 30
						Muy baja (0-8°)	0.0 36	0.0 15
						Geomorfolo gía	0.2 61	Montaña de Roca Intrusiva
		Geología	0.3 28	60-80% superior a su normal climático (S60)	Piedemonte coluvio-deluvial	0.3 12	0.0 81	
					Fracturas de Roca	0.1 98	0.0 52	
					Plutón Machupicchu (P-mp)	0.5 03	0.1 65	
					Dep. Coluvial (D-c)	0.2 60	0.0 85	
					Dep. Fluvial (D-fl)	0.1 34	0.0 44	
					Dep. Aluvial (D-a)	0.0 68	0.0 22	
					Complejo Iscaybamba (C-Is)	0.0 35	0.0 11	
Desencade nante	20 %	Precipitació n anómala	1.0 00	0.4 16	0.4 16			



				40-60% superior a su normal climático (S40)	0.2	0.2
				30-40% superior a su normal climático (S30)	0.1	0.1
				25-30% superior a su normal climático (S25)	0.0	0.0
				20-25% superior a su normal climático (S20)	0.0	0.0
				5 años	0.5	0.5
				10 años	0.2	0.2
				25 años	0.1	0.1
				50 años	0.0	0.0
				100 años	0.0	0.0
PARÁMETRO DE EVALUACIÓN	10 %	Tiempo de retorno	1.000			

Nota. Fuente: propia.

**Tabla 24**

*Análisis de susceptibilidad del territorio ante deslizamientos*

Condicionante		Desencadenante					
$\sum P_{par}$	X	Peso con	Valor con	$\sum P_{des}$	x	Peso des	Valor des
0.497			0.398	0.262			0.052
0.273			0.218	0.262			0.052
0.152	80%		0.122	0.262	20%		0.052
0.052			0.041	0.262			0.052
0.026			0.021	0.262			0.052

Nota. Fuente: propia.



**Tabla 25**

*Rangos de peligrosidad ante deslizamientos*

Susceptibilidad		Parámetro de Evaluación		Peligrosidad
Valor Susc	Peso Susc	Valor Par-Eval	Peso Par-Eval	
0.450		0.503		0.455
0.270		0.503		0.294
0.174	90%	0.503	10%	0.207
0.094		0.503		0.135
0.073		0.503		0.116

*Nota.* Fuente: propia.

**Tabla 26**

*Niveles de peligro ante deslizamientos*

Nivel de peligro	Rango
Peligro muy alto	$0.294 \leq P \leq 0.455$
Peligro alto	$0.207 \leq P < 0.294$
Peligro medio	$0.135 \leq P < 0.207$
Peligro bajo	$0.116 \leq P < 0.135$

*Nota.* Fuente: propia.

#### 4.1.7. Mapa de peligro de deslizamientos

Para conseguir el mapa de peligro ante deslizamientos, en el software ArcGIS, los valores del factor condicionante se multiplican con el valor del factor desencadenante y posteriormente con el valor del parámetro de evaluación. De esta forma se asigna distintos niveles de peligro en toda la zona estudiada.

Por lo que la matriz de peligro sería:

Peligro muy alto: Precipitación entre 60-80% superior a su normal climático, pendiente: Mayor a 35°. Unidades geológicas: Plutón Machupicchu (P-mp) Depósito



coluvial (D-c). Unidades geomorfológicas: Montaña de roca intrusiva (Mri) y Fracturas de roca (FR)

Figura 48

Mapa de Peligro ante deslizamientos



Nota. Fuente: propia.

#### 4.1.8. Evaluación de obras de protección

##### 4.1.8.1.1. Resultados de la evaluación de desempeño:

Figura 49

Presentación de resultados de desempeño de los gaviones



Nota. Fuente: propia.

Los gaviones de los niveles 2,3 y 4 no cumplen con el coeficiente de serviciabilidad mínimo.



**Figura 50**

*Resultados del análisis de estabilidad*

<b>Empuje Activo y Pasivo</b>		<b>Vuelco</b>	
Empuje Activo [kN/m]	352.37	Momento Activo [kN/m x m]	620.19
Punto de aplicación con ref. al eje X[m]	2.46	Momento Resistente [kN/m x m]	442.53
Punto de aplicación con ref. al eje Y[m]	1.85	Vuelco	0.71
Dirección del empuje con ref. al eje X [°]	17.85		
Empuje Pasivo [kN/m]	30.41	<b>Tensiones Actuantes en la Fundación</b>	
Punto de aplicación con ref. al eje X[m]	0.00	Excentricidad	1.81
Punto de aplicación con ref. al eje Y[m]	0.16	Tensión normal a la izquierda [kN/m <sup>2</sup> ]	-178.56
Dirección del empuje con ref. al eje X [°]	0.00	Tensión normal a la derecha [kN/m <sup>2</sup> ]	0.00
		Tensión última de la fundación[kN/m <sup>2</sup> ]	11.65
		Tension de la Base izq.	-
		Tension de la Base der.	-
<b>Deslizamiento</b>		Cuidado!!: La base no es totalmente utilizada!	
Fuerza normal en en la base [kN/m]	218.14	<b>Estabilidad Global   Bishop</b>	
Punto de aplicación con ref. al eje X[m]	-0.81	Centro del arco con referencia al eje X [m]	-30.29
Punto de aplicación con ref. al eje Y[m]	0.00	Centro del arco con referencia al eje Y [m]	41.00
Fuerza actuante tangencial [kN/m]	335.40	Global	1.06
Fuerza resistente tangencial [kN/m]	179.17		
Deslizamiento	0.53		

*Nota.* Fuente: propia.



## 5. DISCUSIÓN

### 5.1. Discusión N° 01

¿Dentro del análisis y estimación del peligro de deslizamientos en la zona de estudio, porque el parámetro pendiente tiene el mayor peso en la evaluación jerárquica?

Entendiendo que, en el caso de deslizamientos, las pendientes y el tipo de material presente son los factores principales para considerar. Los resultados mostrados en el capítulo 4 evidencian que el mayor grupo de pendientes presentes en área de estudio están en el rango “MUY ALTO” de más de  $35^\circ$ , ángulos de pendientes que según se muestra en el marco teórico del capítulo 2 incrementan el peligro de deslizamientos por lo que, en comparación a los parámetros de geomorfología y geología de la zona, el parámetro pendiente condiciona en mayor medida la presencia de deslizamientos.

### 5.2. Discusión N° 02

¿En qué medida las características del talud influyen en la evaluación de las estructuras de protección?

Para evaluar las estructuras de protección fueron consideradas las propiedades del suelo del talud, como lo son: Peso específico ( $\text{kN/m}^2$ ), ángulo de fricción ( $^\circ$ ) y la cohesión ( $\text{kN/m}^2$ ). Así como se consideró los ángulos de inclinación ( $^\circ$ ) de la superficie natural del terreno que se encuentra en la parte superior en relación a las estructuras de protección. Los parámetros ángulo de fricción, cohesión e inclinación permitieron calcular el coeficiente de empuje activo, el cual multiplicado por el peso específico del suelo y otros parámetros de la estructura permite calcular el empuje activo, todo esto descrito en el capítulo 4 de resultados. Por lo que estas características son imprescindibles para el correcto cálculo en cuanto a estabilidad de las estructuras de protección se refiere.

### 5.3. Discusión N° 03

¿las obras de protección proyectadas mejoraran el factor de seguridad del talud?

Primero se evaluó el talud sin el gavión, luego se evaluó el talud con el gavión, lo cual muestra que, si mejora el factor de seguridad, pero no de todo el talud, solo mejora en el área donde tiene influencia, el gavión no afecta al área más crítica del



talud, por lo cual no mejora el factor de seguridad del área más crítica del talud, pero si hay una mejora considerable en el área donde tiene influencia.

#### 5.4. Discusión N° 04

¿En el análisis de estabilidad de taludes por que se utilizó el método de Auto Refine Search y no otro método en el modelamiento?

El método de Grid Search, es un método donde prioriza la pendiente del talud, su topografía es su principal parámetro a tomar en cuenta, pero el mismo método muestra valores más **conservadores**, en cambio el método Auto Refine Search genera factores más críticos que en los otros métodos, ya que no se centra solo en la topografía.

#### 5.5. Discusión N° 05

¿las obras de protección proyectadas serán estables?

El gavión inicial no cumple con el factor de seguridad mínimo requerido para ser estable (Factor de seguridad de 1.06, menor a 1.10 que es el mínimo), por lo cual se presenta una propuesta de mejora del gavión, el cual si cumple con el factor mínimo de seguridad y si será estable en el tiempo:

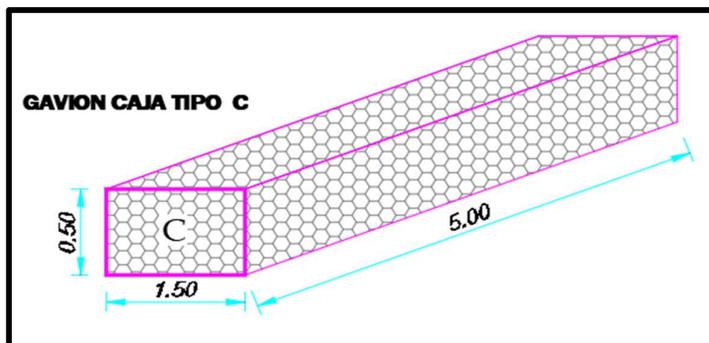
Propuesta de estructuras de protección:

Manteniendo las características de los gaviones Tipo A y Tipo B anteriormente mostradas en el capítulo IV, se propone un nuevo tipo de Gavión en este caso Tipo C, donde solamente varían las dimensiones, el gavión tipo C se comporta de mejor manera frente al tipo A o tipo B, ya que este tiene una altura de 0.5m y el tipo A y B tienen una altura de 1.00 m. y 1.00 m. respectivamente. Dos gaviones tipo C se comportan de mejor manera que un gavión tipo A o un tipo B.

- GAVIÓN TIPO C: 0.5 m. \* 1.50 m. \* 5.00 m.

**Figura 51**

*Dimensiones gavión C*

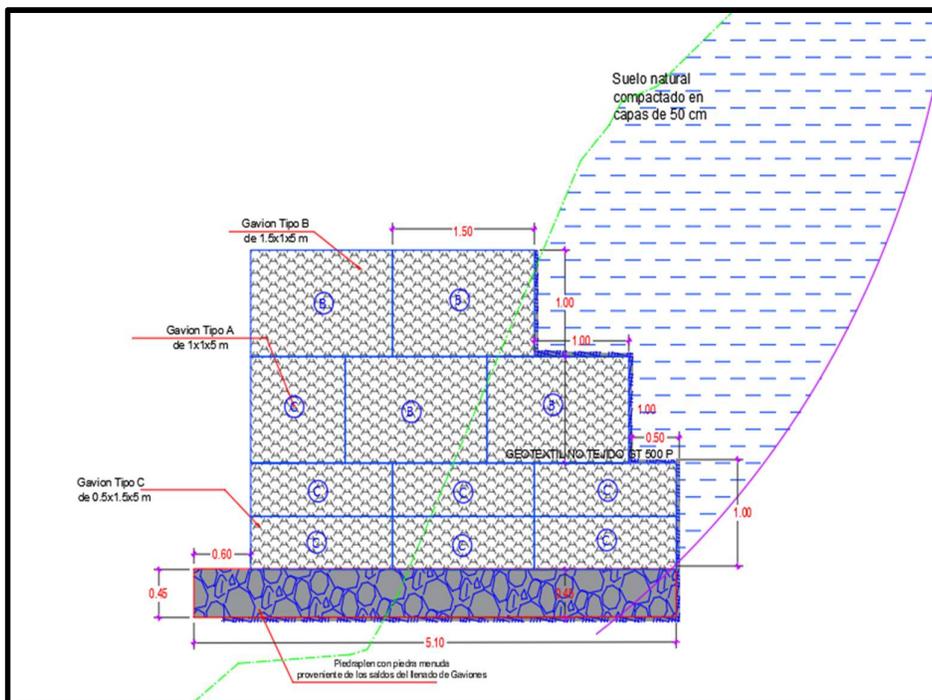


*Nota.* Fuente: propia.

Un cambio en la distribución de las capas de los gaviones. Mostrándose a continuación:

**Figura 52**

*Ubicación de los gaviones propuestos en el sector 01*

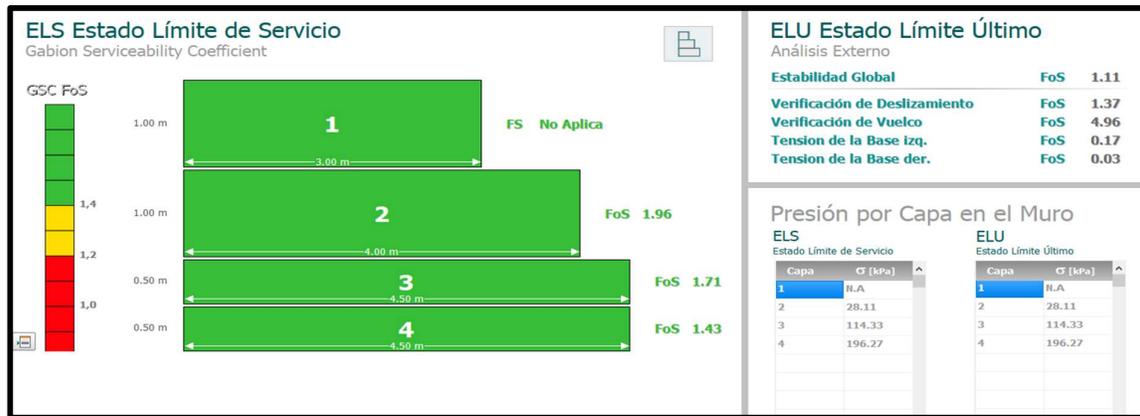


*Nota.* Fuente: propia

Resultados de la evaluación de desempeño

**Figura 53**

*Presentación de resultados de desempeño de los gaviones propuestos*



*Nota.* Fuente: propia.

Los cuatro 4 niveles de gaviones cumplen satisfactoriamente con el coeficiente de serviciabilidad.

**Figura 54**

*Análisis de estabilidad de los gaviones propuestos*

<b>Empuje Activo y Pasivo</b>		<b>Vuelco</b>	
Empuje Activo [kN/m]	929.38	Momento Activo [kN/m x m]	676.77
Punto de aplicación con ref. al eje X[m]	3.80	Momento Resistente [kN/m x m]	3354.02
Punto de aplicación con ref. al eje Y[m]	1.39	Vuelco	4.96
Dirección del empuje con ref. al eje X [°]	58.45		
Empuje Pasivo [kN/m]	30.41	<b>Tensiones Actuantes en la Fundación</b>	
Punto de aplicación con ref. al eje X[m]	0.00	Excentricidad	-0.51
Punto de aplicación con ref. al eje Y[m]	0.16	Tensión normal a la izquierda [kN/m <sup>2</sup> ]	68.07
Dirección del empuje con ref. al eje X [°]	0.00	Tensión normal a la derecha [kN/m <sup>2</sup> ]	362.59
		Tensión última de la fundación[kN/m <sup>2</sup> ]	11.65
		Tensión de la Base izq.	0.17
		Tensión de la Base der.	0.03
		<b>Estabilidad Global   Bishop</b>	
		Centro del arco con referencia al eje X [m]	-14.17
		Centro del arco con referencia al eje Y [m]	33.56
		Global	1.11

*Nota.* Fuente: propia.

## 5.6. Discusión N° 06

¿Cuáles son las ventajas de los métodos utilizados en la evaluación de estructuras de protección?



Ya que estas estructuras tienen como fin dar seguridad frente a la excesiva deformación y rotura, se utilizó el criterio de estados límites tanto de servicio como el estado límite último, La ventaja principal de estos, es que evalúan la estructura frente a la máxima deformación aceptable (servicio) y destrucción de la estructura (último), estos estados permiten evaluar la seguridad de la estructura con la finalidad de asignar coeficientes de seguridad tanto globales y parciales. Siendo los coeficientes de seguridad globales tradicionalmente más utilizados.



## GLOSARIO

**Peligro:** Se define como la probabilidad de que se produzca un fenómeno natural o artificial potencialmente dañino en un plazo de tiempo determinado en un lugar o zona conocidos.

**Desastre:** Es la ocurrencia de un suceso que daña de forma significativa a las personas, los bienes o el medio ambiente, a la vez que perjudica la capacidad de funcionamiento de una comunidad, provocando daños significativos a las personas, los bienes o el medio ambiente.

**Deslizamiento:** Masas de suelo o roca que se han desplazado hacia abajo como consecuencia de una posible falta de estabilidad provocada por la saturación de agua.

**Análisis jerárquico:** Proceso de toma de decisiones que de manera subjetiva asigna distinta importancia a cada uno de los factores que influyen en esta.

**Talud:** Zona con una pendiente que va desde la base de una ladera hasta su cima.

**Superficie de falla:** Superficie que separa la pendiente en dos secciones: la pendiente que se desliza y la pendiente que permanece estacionaria.

**Empuje activo:** Es un tipo de empuje que ocurre cuando la estructura de contención se desplaza hacia el exterior, ocasionando que el terreno contenido se descomprima.

**Factor de Seguridad:** La relación entre la resistencia al cizallamiento y la tensión de cizallamiento es la que importa.

**Coefficiente de seguridad:** Coeficiente asignado de acuerdo a la evaluación de la estructura frente a máximas deformaciones y su destrucción.

**Gavión:** Estructura de forma rectangular fabricada en una malla metálica que en su interior se encuentran rocas apiladas, es utilizada para fines de contención.

**Estado límite:** Es un enfoque utilizado en el cálculo estructural para evaluar la respuesta de una estructura frente a situaciones de riesgo que puedan afectarla.



## CONCLUSIONES

### Conclusión N°01

Se logró comprobar la hipótesis general que dice “Las estructuras de protección proyectadas en la zona del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu, con respecto al movimiento de masas que establece un nivel de peligro, se mantendrán estables de acuerdo a la simulación y el análisis de peligro respectivo.”. De acuerdo a la figura N°53 del capítulo 4 resultados, se determinó que el gavión con la propuesta de mejora si cumple con el factor de seguridad mínimo requerido para ser estable, ya que la propuesta inicial no cumple con el factor de seguridad mínimo para ser estable en el tiempo.

### Conclusión N°02

Se logró comprobar la su hipótesis N° 01 que dice “Se podrán caracterizar correctamente los distintos movimientos de masa presentes en la zona del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu”. De acuerdo al capítulo 4 resultados, se determinó que según el tipo de movimiento en masa hay un deslizamiento rotacional de rocas y detritos, según la velocidad del movimiento en masa hay una velocidad moderada (1.5 m/mes a 1.6 m/día) y según la profundidad de la masa deslizada es superficial (<1.5m de profundidad).

### Conclusión N°03

Se logró comprobar la subhipótesis N° 02 que dice “Se podrán identificar las medidas geométricas del movimiento de masas seleccionados de la zona donde se ubica el patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu.”. De acuerdo con el capítulo 4 resultados, se determinó la altura = 48m, el pie del talud, la pendiente = 42°, se logró hallar el escarpe principal, se logró hallar la cabeza, se logró hallar la corona, la superficie de falla y el pie de la superficie de falla.

### Conclusión N°04

Se logró comprobar la subhipótesis N° 01 que dice “Se podrán identificar los parámetros físicos y mecánicos del movimiento de masas influyen en el comportamiento geo mecánico de los movimientos de masas.”. De acuerdo al capítulo 4 resultados, se logró hallar el peso específico del estrato superior (0m -1m) es: 15.927 KN/m<sup>3</sup> y del estrato superior (1m - 2m) es: 18.590 KN/m<sup>3</sup>, la cohesión del del estrato superior (0m -m) es: 1.96 KN/m<sup>2</sup> y la del



estrato inferior (1m -2m) es: 0.98 KN/m<sup>2</sup>, el Angulo de fricción del estrato superior (0m -1m) es: 18° y del estrato inferior (1m -2m) es: 32°. Se logró determinar el tipo de suelo del estrato superior (0m -1m) es: relleno constituido por gravas, arenas, limos, piedras, cobertura vegetal y materia orgánica, y del estrato inferior (1m -2m) es: Grava arcilloso- limosa con arena.

#### **Conclusión N°05**

No se logró comprobar la subhipótesis N° 04 que dice “Las estructuras de protección proyectadas en la zona del sector 1 del proyecto de obras de protección del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu, son las adecuadas para mitigar el nivel de riesgo presente.” Ya que como se muestra en la figura N°54 el capítulo 4 resultados, Los factores de seguridad la estructura de protección proyectada en cuanto a verificación de deslizamiento (0.53) y vuelco (0.71) y por ende el factor de seguridad global (1.06) no son satisfactorios al ser menores de 1.1, factor de seguridad que garantiza que la estructura de protección brinda seguridad frente a deformaciones y destrucción total de esta por lo que se propone una nueva estructura que cumple con los factores de seguridad correspondientes.

#### **Conclusión N°06**

Se logró comprobar la subhipótesis N° 05 que dice “El simulador GAWACWIN es el mejor modelador de acuerdo a la evaluación, se podrá determinar la estabilidad frente al movimiento de masas de las estructuras de protección proyectadas en la zona del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu.” ya que es el único software que utiliza los estados límites tanto el estado límite último y el de servicio para evaluar la seguridad de la estructura de protección, en este caso gaviones. así también utiliza el método de equilibrio límite para calcular el empuje activo del suelo en la estructura, cuya principal ventaja es que permite evaluar gran variedad de casos.

#### **Conclusión N°07**

Se logró comprobar la subhipótesis N° 06 que dice “El nivel de peligro calculado es muy alto en función de las estructuras de protección proyectadas en la zona del sector 1 del proyecto de obras de protección del patio de llaves de la central hidroeléctrica de Machupicchu.” De acuerdo a la evaluación de peligro frente a deslizamientos tomando como referencia los parámetros designados por CENEPRED. Tal y como muestra la Tabla N°28 del



capítulo 4 resultados, el nivel muy alto pertenece al intervalo de entre 0.294 y 0.455 donde se encuentra la zona de estudio.

## RECOMENDACIONES

### **Recomendación 01**

Analizar de forma más detallada y profunda los taludes y las obras de protección que se quieren implementar, mediante empresas especializadas en estos temas, para así garantizar la seguridad y funcionamiento correcto de estas obras.

### **Recomendación 02**

Calcular las medidas geométricas de los distintos movimientos de masa mediante empresas especializadas y con mayor experiencia con la finalidad de obtener resultados más certeros.

### **Recomendación 03**

Analizar futuros deslizamientos de masa con programas más especializados que simulen de forma conjunta el talud a estudiar.

### **Recomendación 04**

Analizar los parámetros físicos y mecánicos del movimiento de masas en los demás sectores del cerro el calvario para garantizar valores más cercanos a la realidad y hacer un estudio más detallado de los demás sectores.

### **Recomendación 05**

Analizar la vulnerabilidad y hallar el nivel de riesgo del sector estudiado y demás sectores donde se pueda presenciar movimientos de masa.

### **Recomendación 06**

Se recomienda que las obras de protección puedan ser diseñadas y ejecutadas por empresas especializadas, ya que de acuerdo a esta investigación el hacerlas mediante administración directa presenta mayores dificultades y deficiencias.

### **Recomendación 07**



Seguir investigando sobre estos métodos experimentales de evaluación de estados límites de estructuras de protección del tipo gavión para establecer estándares de diseño y construcción.

## REFERENCIAS

- Albinez, L., & Ancco, K. (2018). Caracterización de zonas susceptibles por movimientos en masa en la quebrada Chakán. (Bachiller). Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.
- Baena P, G. (2017). Metodología de la investigación. México: grupo editorial patria.
- Bonachea, J. (2006). Desarrollo, aplicación y validación de procedimientos y modelos para la evaluación de amenazas, vulnerabilidad y riesgo debidos a procesos geomorfológicos. Cantabria-España: Universidad de Cantabria.
- Carreño, M., Cardona, O., & Barbat, A. (2005). Sistema de indicadores para la evaluación de riesgos. Monografía CIMNE.
- Castillo, Y. & Ojeda, H. (2019). Evaluación del nivel de peligrosidad originado por movimientos en masa en la quebrada Saqramayo distrito Santiago (Bachiller). Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.
- CENEPRED. (2014). Manual Para la Evaluación de Riesgos originados por Fenómenos Naturales (2.a ed.). Neva studio.
- Cruden, D., Varnes, D. (1996). Landslide types and processes, en Turner, K., y Schuster. Landslides investigation and mitigation: Washington D. C. National.
- De Matteis, Á. (2003). Geología y geotecnia. Universidad Nacional de Rosario.
- EGEMSA. (2020) Historia de la Empresa de Generación Eléctrica Machupicchu S.A.
- Gómez, G. (2018). Análisis de riesgos por inestabilidad de taludes en la subcuenca río Canipaco, tramo distrito de Colca. (Maestro en gestión ambiental). Universidad Nacional Federico Villareal.



- Hernández, Y. & Ramírez, H. (2016). Evaluación del riesgo asociado a vulnerabilidad física por taludes y laderas inestables en la microcuenca cay, Ibagué. Tolima-Colombia: Universidad Cooperativa de Colombia.
- Hoek, E., & Bray, J. (1981). “Rock slope engineering: Institution of mining and metallurgy”.
- Kaseng, F. (2017). Los modelos de investigación científica. Lima Perú: Universidad Nacional Federico Villarreal.
- Jaime, S. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Bucaramanga – Colombia.
- Oliva, A., González, J. (2015). Evaluación del riesgo por inestabilidad de laderas. Trabajo de investigación presentado por el Grupo ITEICO Euroamericano. México: Universidad de las Californias Internacional.
- Ramírez G. (2010). Metodología de la investigación. Bogotá: Pontificia Universidad Javeriana.
- Ramos, A. (2017). Análisis de estabilidad de taludes en rocas. Simulación con SY-DYNA y comparación con SLIDE (Master universitario en ingeniería geológica). Universidad Politécnica de Madrid.
- Rico, A. & Del Castillo, G. (2013). Ingeniería de suelos en las vías terrestres. México: Limusa.
- Baptista, P. & Hernández, R. (2004). Metodología de la investigación. Compañías McGraw-Hill.
- Rodríguez, R. & Tolentino, V. (2015). Método de investigación geológico-geotécnico para el análisis de inestabilidad de laderas por deslizamientos zona Ronquillo-Corisorgona Cajamarca-Perú. Revista del Instituto de Investigación, FIGMMG –UNMSM, 20, 167–174.
- Suarez, J. (1998). Deslizamientos y estabilidad de taludes en zonas tropicales. Colombia: Ingeniería de Suelos.
- Suarez, J. (2013). Deslizamientos: Análisis geotécnico. Colombia: Ingeniería de Suelos.
- Tamayo, F. & Tamayo, M. (1999). El proceso de la investigación científica. México: Limusa.



Tume, C. (2016). Estudio geodinámico y estabilidad de taludes para la seguridad física de los poblados de Sarahuarca y Choquepuquio. (Bachiller). Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.

UNDRO. (1979). Natural Disasters and Vulnerability Analysis. Report of Experts Group Meeting.

Vila, R., & Vásquez, W. (2016). Evaluación del riesgo originado por movimientos en masa, quebrada Thuniyoc, distritos de San Sebastián y San Jerónimo. (Bachiller). Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco.

Yang, L., Wang, W., Zhang, N., & We, Y. (2020). Análisis de las características y el modelado numérico de la desviación del deslizamiento de tierra de Xinmo en Sichuan, China, 24, 169–181.



ANEXOS

A. MATRIZ DE CONSISTENCIA

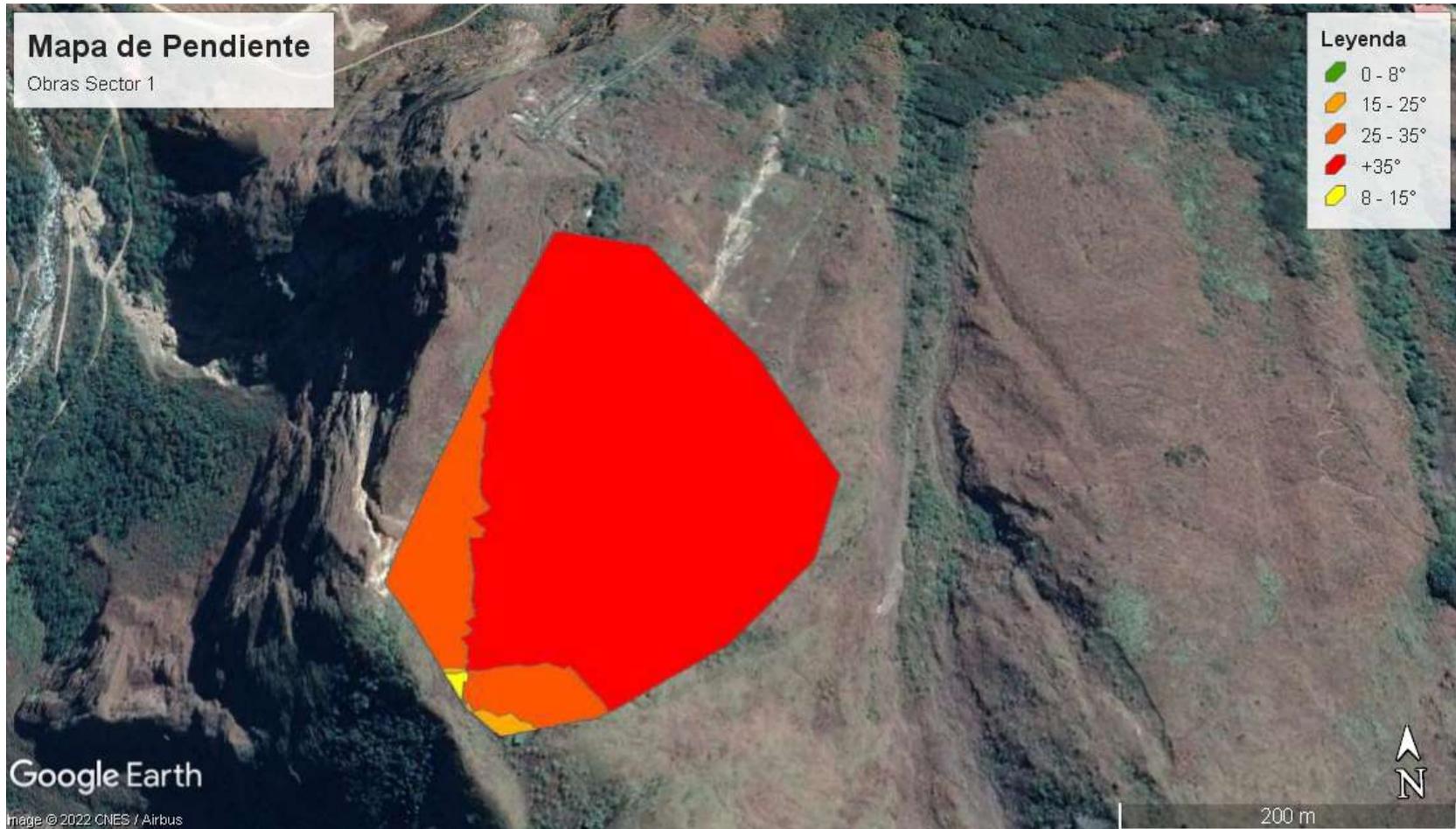
“Análisis de peligrosidad mediante simulaciones de movimientos de masas y estructuras de protección. Central Hidroeléctrica de Machupicchu, Machupicchu, Urubamba, Cusco, 2022”		
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General
¿Será posible establecer una simulación que obtenga el nivel de peligrosidad, frente a los movimientos de masas, de las estructuras de protección proyectadas de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu, Machupicchu, Urubamba, Cusco?	Analizar la peligrosidad mediante simulaciones de movimientos de masas en estructuras de protección de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu, Machupicchu, Urubamba, Cusco.	De acuerdo a la simulación y el análisis de peligrosidad respectivo las estructuras de protección de la Central Hidroeléctrica de Machupicchu, Machupicchu, Urubamba, Cusco, con respecto al movimiento de masas, se mantendrán estables.
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas
¿Qué tipos de movimiento de masas están presentes en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu?	Caracterizar los movimientos de masas presentes en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu, para su posterior caracterización geométrica y físico-mecánica.	Se podrán caracterizar correctamente los distintos movimientos de masa presentes en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.
¿Cuáles serán las medidas geométricas de los movimientos de masas seleccionados de la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu?	Identificar las medidas geométricas de los movimientos de masas en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu, para su posterior análisis.	Se podrán identificar las medidas geométricas del movimiento de masas seleccionados en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.



“Análisis de peligrosidad mediante simulaciones de movimientos de masas y estructuras de protección. Central Hidroeléctrica de Machupicchu, Machupicchu, Urubamba, Cusco, 2022”		
Problemas Específicos	Objetivos Específicos	Hipótesis Específicas
¿Cuáles son los parámetros físicos y mecánicos que influyen en el comportamiento geo mecánico de los movimientos de masa seleccionados en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu?	Identificar los parámetros físicos y mecánicos que influyen en el comportamiento geo mecánico del movimiento de masas seleccionados de la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.	Se podrán identificar los parámetros físicos y mecánicos del movimiento de masas que influyen en el comportamiento geo mecánico de los movimientos de masas seleccionados en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.
¿Las estructuras de protección proyectadas en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu son las adecuadas para mitigar el nivel de peligrosidad presente?	Demostrar que las estructuras de protección proyectadas en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu, son las adecuadas para mitigar el nivel de peligrosidad presente.	Las estructuras de protección proyectadas en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu, son las adecuadas para mitigar el nivel de peligrosidad presente.
¿Cuál es la mejor simulación para determinar la estabilidad, frente al movimiento de masas, de las estructuras de protección en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu?	Evaluar los distintos tipos de simulación y elegir el más adecuado para determinar la estabilidad, frente al movimiento de masas, de las estructuras de protección en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.	El simulador GAWACWIN es el mejor modelador de acuerdo a la evaluación para determinar la estabilidad frente al movimiento de masas de las estructuras de protección en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.
¿Cuál será el nivel de peligrosidad que obtendrá el movimiento de masas en función a las estructuras de protección bajo la simulación en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu?	Calcular el nivel de peligrosidad que obtendrá el movimiento de masas en función a las estructuras de protección en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.	El nivel de peligrosidad calculado es muy alto en función de las estructuras de protección en la zona del sector 1 de la central hidroeléctrica de Machupicchu.

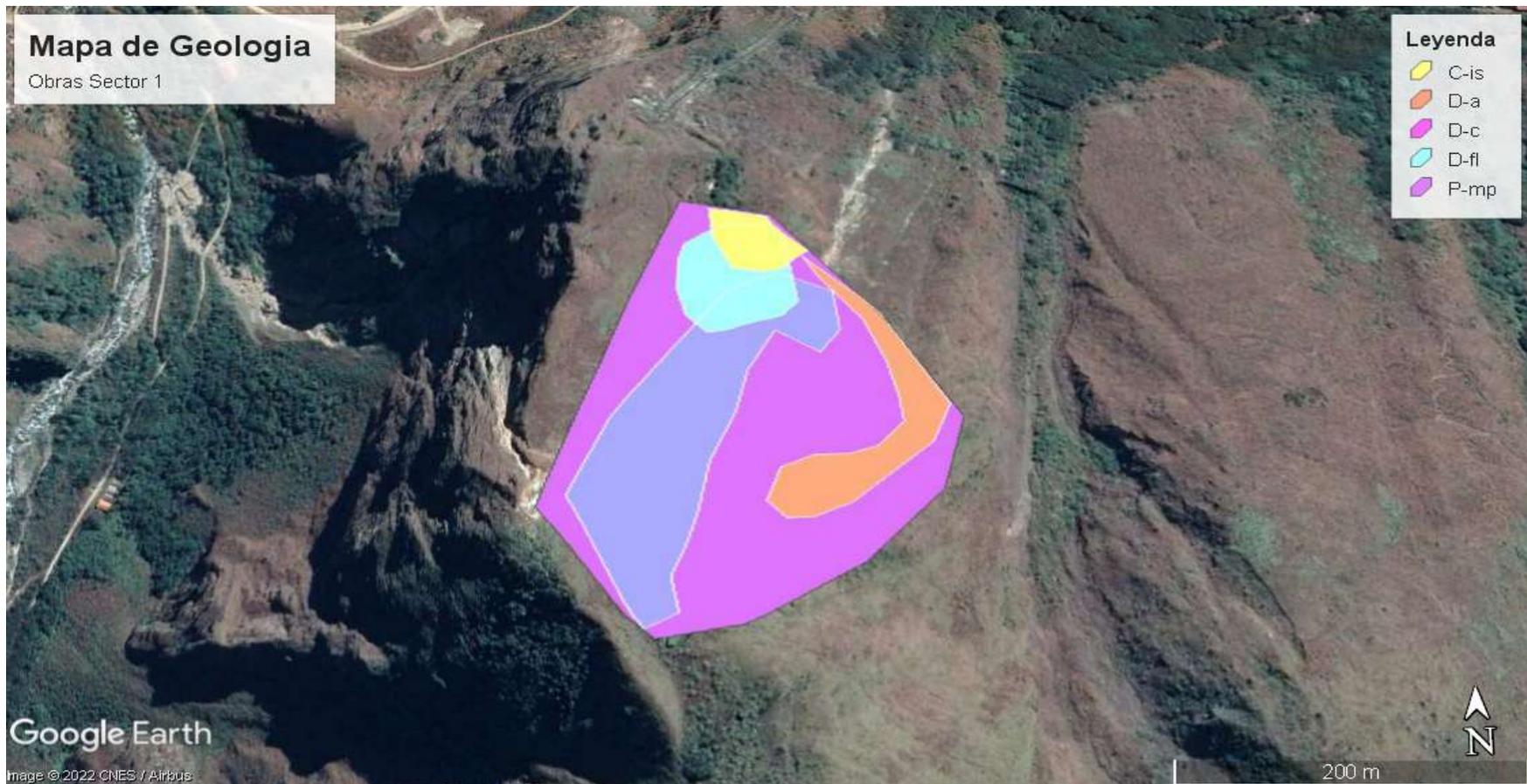


## B. MAPA DE PENDIENTES



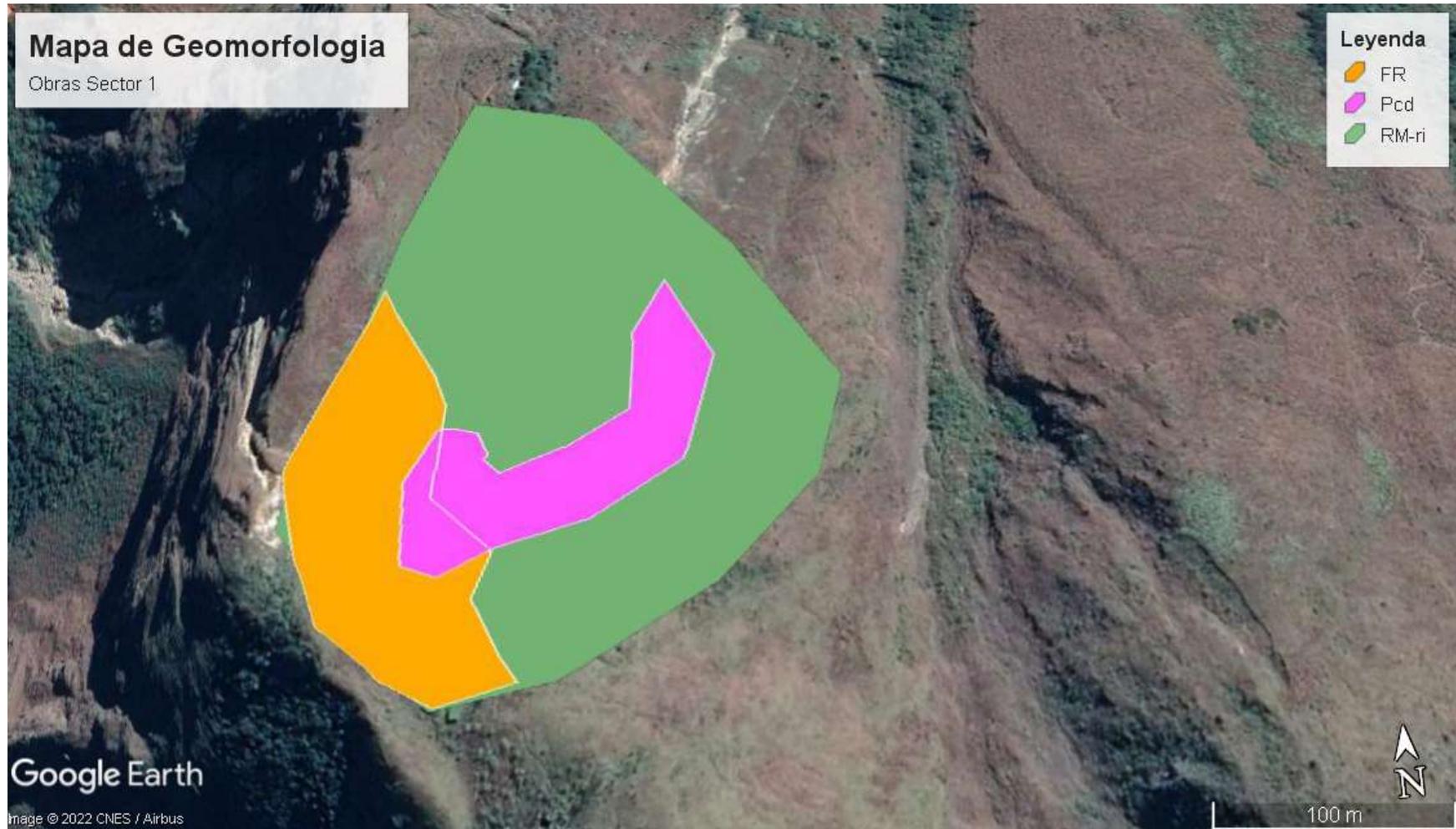


### C. MAPA DE GEOLOGIA





#### D. MAPA DE GEOMORFOLOGIA





### E. MAPA DE PELIGRO





## F. PANEL FOTOGRAFICO



Fotografía tomada en el punto N°1, el punto mas alto del sector 1

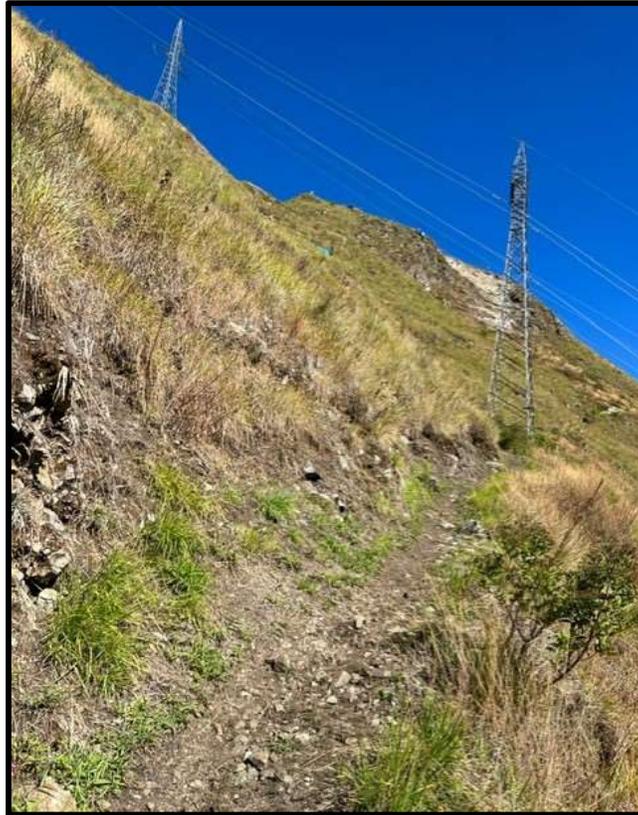




Fotografía de la masa deslizada superficial, rocas y detritos.



Fotografía de la masa deslizada superficial, rocas y detritos.



Fotografía de la pendiente del Cerro el Calvario.



Fotografía de la masa superficial por deslizarse, sujetas con una malla metálica.



Fotografía de la masa superficial a deslizarse, rocas y detritos.



Fotografía de la masa superficial a deslizarse, rocas y detritos.



Fotografía del gavión en el sector N° 01.



Fotografía de la masa superficial.



Fotografía de la zona de ingreso en la parte inferior del cerro El Calvario.