



UNIVERSIDAD RICARDO PALMA

**FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**

Gestión de riesgos para el recrecimiento de un depósito de relaves

TESIS

Para optar el título profesional de Ingeniero Civil

AUTORES

Alvarado Lavado, Manuel Alejandro
ORCID: 0009-0000-5485-822X

Vargas Corimanya, Antoni Ernesto
ORCID: 0009-0001-4479-520X

ASESOR

Valencia Gutierrez, Andres Avelino
ORCID: 0000-0002-8873-189X

Lima, Perú

2023

METADATOS COMPLEMENTARIOS

Datos de los autores

Alvarado Lavado, Manuel Alejandro

DNI: 74469927

Vargas Corimanya, Antoni Ernesto

DNI: 72932923

Datos de asesor

Valencia Gutierrez, Andres Avelino

DNI: 07065758

Datos del jurado

JURADO 1

Donayre Cordova, Oscar Eduardo

DNI: 06162939

ORCID: 0000-0002-4778-3789

JURADO 2

Vargas Chang, Esther Joni

DNI: 07907361

ORCID: 0000-0003-3500-2527

JURADO 3

Chavarry Vallejos, Carlos Magno

DNI: 07410234

ORCID: 0000-0003-0512-8954

Datos de la investigación

Campo del conocimiento OCDE: 02.01.01

Código del Programa: 732016

DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD

Nosotros, Alvarado Lavado, Manuel Alejandro, con código de estudiante N° 201321137, con DNI N° 74469927, con domicilio en Calle Sebastián Barranca 3973, distrito Los Olivos, provincia y departamento de Lima, y Vargas Corimanya, Antoni Ernesto, con código de estudiante N° 201720451, con DNI N° 72932923, con domicilio en Jr. Los Diamantes 1745, distrito San Juan de Lurigancho, provincia y departamento de Lima, en nuestra condición de bachilleres en Ingeniería Civil de la Facultad de Ingeniería, declaramos bajo juramento que:

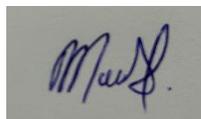
La presente tesis titulada: “Gestión de riesgos para el recrecimiento de un depósito de relaves” es de nuestra única autoría, bajo el asesoramiento del docente Andres Avelino Valencia Gutierrez, y no existe plagio y/o copia de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación presentado por cualquier persona natural o jurídica ante cualquier institución académica o de investigación, universidad, etc.; la cual ha sido sometida al antiplagio Turnitin y tiene el 25% de similitud final.

Dejamos constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en la tesis, el contenido de estas corresponde a las opiniones de ellos, y por las cuales no asumimos responsabilidad, ya sean de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o de internet.

Asimismo, ratificamos plenamente que el contenido íntegro de la tesis es de nuestro conocimiento y autoría. Por tal motivo, asumimos toda la responsabilidad de cualquier error u omisión en la tesis y somos conscientes de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de falsa declaración, nos sometemos a lo dispuesto en las normas de la Universidad Ricardo Palma y a los dispositivos legales nacionales vigentes.

Surco, 15 de Noviembre de 2023



Manuel Alejandro, Alvarado Lavado

DNI N° 74469927



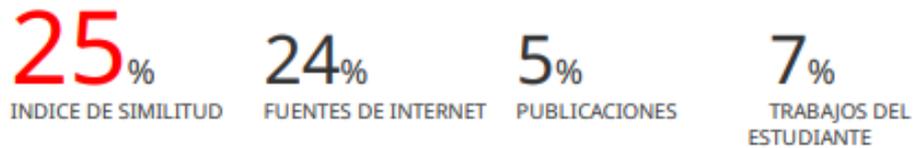
Antoni Ernesto, Vargas Corimanya

DNI N° 72932923

INFORME DE ORIGINALIDAD-TURNITIN

Gestión de riesgos para el recrecimiento de un depósito de relaves

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	repositorioacademico.upc.edu.pe Fuente de Internet	7%
2	repositorio.urp.edu.pe Fuente de Internet	3%
3	hdl.handle.net Fuente de Internet	2%
4	Submitted to Universidad Ricardo Palma Trabajo del estudiante	1%
5	www.repositorioacademico.usmp.edu.pe Fuente de Internet	1%
6	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	1%
7	cybertesis.uni.edu.pe Fuente de Internet	1%
8	repositorio.unsa.edu.pe Fuente de Internet	<1%
9	revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe Fuente de Internet	


Dra. Vargas Chang Esther Joni

DEDICATORIA

Dedico la presente investigación principalmente a Dios por otorgarme fortaleza, perseverancia y salud.

A mis padres por el apoyo constante e incondicional brindado en estos años.

Alvarado Lavado, Manuel Alejandro

A dios por darme éxitos, salud y prosperidad.

A mis padres Angel Vargas Chupurgo y Renee Corimanya Mauricio por haber confiado en mí y alcanzar mis anhelos, muchos de mis logros se los debo a ustedes entre los que se incluye esta investigación.

Vargas Corimanya, Antoni Ernesto

AGRADECIMIENTO

Agradecemos a Dios y a nuestros padres.
A los profesores de la Universidad
Ricardo Palma por la excelente educación
brindada en estos 5 años de nuestra etapa
universitaria.

Alvarado Lavado, Manuel Alejandro
Vargas Corimanya, Antoni Ernesto

INDICE GENERAL

METADATOS COMPLEMENTARIOS	ii
DECLARACIÓN JURADA DE ORIGINALIDAD	iii
INFORME DE ORIGINALIDAD–TURNITIN.....	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
INDICE GENERAL	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
RESUMEN	xviii
ABSTRACT.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.1 Descripción del problema	2
1.2 Formulación del problema.....	11
1.3 Importancia y justificación de la investigación	11
1.4 Delimitación del estudio	12
1.5 Objetivos de la investigación.....	12
1.6 Estado del arte.....	12
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO	19
2.1 Marco histórico	19
2.2 Investigaciones relacionadas con el tema de investigación	23
2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio	26
2.3.1 Recrecimiento de un depósito de relaves.....	26
2.3.1.1 Definición	26
2.3.1.2 Métodos de recrecimientos	27
2.3.1.3 Fallas en presas de relaves	29
2.3.1.4 Tipos de fallas en presas de relaves	33
2.3.1.5 Estadísticas por tipo de fallas en el mundo.....	38
2.3.1.6 Análisis de estabilidad física.....	46
2.3.1.7 Análisis de estabilidad sísmica	48
2.3.2 Fases en la vida del depósito de relaves	48
2.3.2.1 Definiciones	48

2.3.2.2 Selección del sitio y diseño.....	48
2.3.2.3 Construcción	48
2.3.2.4 Operación.....	49
2.3.2.5 Cierre	49
2.3.2.6 Transición.....	49
2.3.2.7 Cierre – Atención Activa.....	49
2.3.2.8 Cierre – Cuidados Pasivos	50
2.3.3 Evaluación de riesgos de deslizamiento adaptado del manual Cenepred.....	50
2.3.3.1 Peligrosidad del recrecimiento del depósito de relaves	50
2.3.3.1.1 Concepto de peligro	50
2.3.3.1.2 Recopilación de datos	50
2.3.3.1.3 Identificación de probable área de influencia del fenómeno en estudio.....	50
2.3.3.1.4 Peligros generados por fenómenos de origen natural	50
2.3.3.1.5 Parámetros de evaluación	51
2.3.3.1.6 Susceptibilidad.....	51
2.3.3.1.7 Niveles de peligrosidad.....	52
2.3.3.2 Vulnerabilidad del recrecimiento del depósito de relaves	53
2.3.3.2.1 Determinación de los niveles de vulnerabilidad.....	53
2.3.3.2.2 Estimación o cálculo del riesgo	54
2.3.3.2.3 Proceso de análisis jerárquico.....	54
2.3.3.2.4 Ponderación de los parámetros descriptores.....	55
2.3.3.3 Riesgo del recrecimiento del depósito de relaves.....	58
2.3.3.3.1. Evaluación y gestión del riesgo en presas de relaves	58
2.3.3.3.2 Identificación de riesgos	58
2.3.3.3.3 Evaluación de riesgos	59
2.3.3.3.4 Manejo de los riesgos	62
2.3.4 Estudios de ingeniería básica	66
2.3.4.1 Ubicación geográfica	66
2.3.4.2 Geología regional.....	66
2.3.4.3 Geología local	68
2.3.4.3.1 Geomorfología	68
2.3.4.3.2 Litoestratigrafía.....	68
2.3.4.3.3 Geología estructural.....	68
2.3.4.3.4 Geodinámica externa	69

2.3.4.4 Hidrología e Hidrogeología	69
2.3.5 Acciones preventivas	70
2.3.6 Plan de contingencia	70
2.3.7 Planes de respuesta a emergencia	70
2.4 Definición de términos básicos	70
2.5 Hipótesis	72
2.6 Variables	72
CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO.....	73
3.1 Tipo de investigación.....	73
3.2 Población y muestra.....	73
3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos	73
3.4 Descripción y procedimiento de análisis	73
CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	74
4.1 Determinación del nivel de peligrosidad	74
4.1.1 Determinación de la susceptibilidad	75
4.1.1.1 Variables condicionantes.....	75
4.1.1.2 Variables desencadenantes	75
4.1.2 Determinación de la vulnerabilidad	76
4.1.2.1 Dimensión social.....	76
4.1.2.1.1 Exposición social	76
4.1.2.1.2 Fragilidad social.....	77
4.1.2.1.3 Resiliencia social	78
4.1.2.2 Dimensión económica.....	78
4.1.2.2.1 Exposición económica	78
4.1.2.2.2 Fragilidad económica.....	79
4.1.2.2.3 Resiliencia económica	79
4.1.2.3 Dimensión ambiental	80
4.1.2.3.1 Exposición ambiental.....	80
4.1.2.3.2 Fragilidad ambiental	80
4.1.2.3.3 Resiliencia ambiental	81
4.1.3. Análisis del nivel de peligrosidad	81
4.1.3.1 Reconocimiento del peligro	81
4.1.3.2 Análisis de Susceptibilidad	84
4.1.3.2.1 Factores condicionantes	84

4.1.3.2.2 Factores desencadenantes	87
4.1.3.3 Valor de susceptibilidad	88
4.1.3.4 Valor de peligrosidad	89
4.2 Análisis de nivel de vulnerabilidad.....	89
4.2.1 Dimensión social.....	89
4.2.1.1 Exposición social	89
4.2.1.2 Fragilidad social.....	91
4.2.1.3 Resiliencia social	93
4.2.2 Dimensión económica.....	95
4.2.2.1 Exposición económica	95
4.2.2.2 Fragilidad económica.....	98
4.2.2.3 Resiliencia económica	100
4.2.3 Dimensión ambiental	102
4.2.3.1 Exposición ambiental.....	102
4.2.3.2 Fragilidad ambiental	104
4.2.3.3 Resiliencia ambiental.....	105
4.2.4 Valor total de vulnerabilidad	107
4.2.5 Análisis de valor de riesgo.....	108
4.3 Matrices con componentes geotécnicos.....	108
4.3.1 Identificación del peligro	108
4.3.2 Susceptibilidad.....	109
4.3.3 Análisis de peligrosidad con matrices con componentes geotécnicos.....	110
4.4 Medidas preventivas	112
4.4.1 Acciones preventivas	112
4.4.2 Plan de contingencia	115
4.4.2.1 Comité central de emergencias	115
4.4.3 Plan de respuesta ante emergencias	116
4.7 Análisis o discusión de resultados	120
CONCLUSIONES	121
RECOMENDACIONES.....	122
REFERENCIAS.....	123
ANEXOS	126
Anexo A: Matriz de consistencia.....	126

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 <i>Modos y condiciones iniciales de falla</i>	9
Tabla 2 <i>Niveles de peligrosidad</i>	53
Tabla 3 <i>Niveles de vulnerabilidad</i>	54
Tabla 4 <i>Niveles de riesgo</i>	54
Tabla 5 <i>Operacionalización de variables</i>	72
Tabla 6 <i>Valoración de variables: Identificación de peligrosidad</i>	75
Tabla 7 <i>Valoración de variables: Variables condicionantes</i>	75
Tabla 8 <i>Valoración de variables: Variables desencadenantes</i>	76
Tabla 9 <i>Valoración de variables: Parámetro exposición social</i>	77
Tabla 10 <i>Valoración de variables: Parámetro fragilidad social</i>	77
Tabla 11 <i>Valoración de variables: Parámetro resiliencia social</i>	78
Tabla 12 <i>Valoración de variables: Parámetro exposición económica</i>	79
Tabla 13 <i>Valoración de variables: Parámetro fragilidad económica</i>	79
Tabla 14 <i>Valoración de variables: Parámetro resiliencia económica</i>	80
Tabla 15 <i>Valoración de variables: Parámetro exposición ambiental</i>	80
Tabla 16 <i>Valoración de variables: Parámetro fragilidad ambiental</i>	81
Tabla 17 <i>Valoración de variables: Parámetro resiliencia ambiental</i>	81
Tabla 18 <i>Reconocimiento del peligro: Parámetro pendiente</i>	82
Tabla 19 <i>Reconocimiento del peligro: Parámetro material del dique</i>	82
Tabla 20 <i>Reconocimiento del peligro: Parámetro capacidad de la estructura</i>	83
Tabla 21 <i>Reconocimiento del peligro: Parámetro erosión</i>	84
Tabla 22 <i>Reconocimiento del peligro: Resumen de valoración del peligro</i>	84
Tabla 23 <i>Variables condicionantes: Parámetro uso actual de suelos</i>	85
Tabla 24 <i>Variables condicionantes: parámetro tipo de suelo</i>	85
Tabla 25 <i>Variables condicionantes: Parámetro cobertura vegetal</i>	86
Tabla 26 <i>Variables condicionantes: Parámetro relieve</i>	86
Tabla 27 <i>Variables condicionantes: Resumen de valor de variables condicionantes</i>	87
Tabla 28 <i>Variables desencadenantes: Parámetro vibración sísmica</i>	87
Tabla 29 <i>Variables desencadenantes: Parámetro inducido por la acción humana</i>	87
Tabla 30 <i>Variables desencadenantes: Parámetro precipitación promedio anual</i>	88
Tabla 31 <i>Variables desencadenantes: Resumen de valor de variables desencadenantes</i>	88

Tabla 32	<i>Valor asignado de susceptibilidad</i>	88
Tabla 33	<i>Valor asignado de peligrosidad</i>	89
Tabla 34	<i>Variable exposición social: Parámetro servicio educativo expuesto</i>	89
Tabla 35	<i>Variable exposición social: Parámetro grupo etéreo</i>	90
Tabla 36	<i>Variable exposición social: Parámetro servicios de salud</i>	90
Tabla 37	<i>Variable exposición social: Resumen de valor de la variable exposición social</i>	91
Tabla 38	<i>Variable fragilidad social: Parámetro cercanía al deslizamiento</i>	91
Tabla 39	<i>Variable fragilidad social: Parámetro material de construcción de la edificación</i>	92
Tabla 40	<i>Variable fragilidad social: Parámetro estado de conservación de la edificación</i>	92
Tabla 41	<i>Variable fragilidad social: Resumen de valor de la variable fragilidad social</i>	92
Tabla 42	<i>Variable resiliencia social: Parámetro actitud frente al riesgo</i>	93
Tabla 43	<i>Variable resiliencia social: Parámetro capacitación en temas de gestión del riesgo</i>	93
Tabla 44	<i>Variable resiliencia social: Parámetro conocimiento histórico de desastres</i>	94
Tabla 45	<i>Variable resiliencia social: Parámetro normatividad y programas de contingencia</i>	94
Tabla 46	<i>Variable resiliencia social: Resumen de valor de variable resiliencia social</i>	95
Tabla 47	<i>Valor de vulnerabilidad: Dimensión social</i>	95
Tabla 48	<i>Variable exposición económica: Parámetro minería</i>	96
Tabla 49	<i>Variable exposición económica: Parámetro agricultura</i>	96
Tabla 50	<i>Variable exposición económica: Parámetro ganadería</i>	97
Tabla 51	<i>Variable exposición económica: Parámetro comercio</i>	97
Tabla 52	<i>Variable exposición económica: Resumen de valor de exposición económica</i>	98
Tabla 53	<i>Variable fragilidad económica: Parámetro agricultura</i>	98
Tabla 54	<i>Variable fragilidad económica: Parámetro ganadería</i>	99
Tabla 55	<i>Variable fragilidad económica: Parámetro comercio</i>	99
Tabla 56	<i>Variable fragilidad económica: Parámetro minera</i>	99

Tabla 57 <i>Variable fragilidad económica: Resumen de valor de fragilidad económica</i>	100
Tabla 58 <i>Variable resiliencia económica: Parámetro PEA desocupada</i>	100
Tabla 59 <i>Variable resiliencia económica: Parámetro ingreso familiar promedio mensual</i>	101
Tabla 60 <i>Variable resiliencia económica: Parámetro ingreso familiar promedio mensual</i>	101
Tabla 61 <i>Variable resiliencia económica: Resumen de valor de resiliencia económica</i>	102
Tabla 62 <i>Valor de vulnerabilidad: Dimensión económica</i>	102
Tabla 63 <i>Variable exposición ambiental: Parámetro pérdida de agua</i>	102
Tabla 64 <i>Variable exposición ambiental: Parámetro flora y fauna</i>	103
Tabla 65 <i>Variable exposición ambiental: Parámetro deforestación</i>	103
Tabla 66 <i>Variable exposición ambiental: Resumen de valor de exposición ambiental</i>	103
Tabla 67 <i>Variable fragilidad ambiental: Parámetro localización de los centros poblados</i>	104
Tabla 68 <i>Variable fragilidad ambiental: Parámetro ecosistemas</i>	104
Tabla 69 <i>Variable fragilidad ambiental: Parámetro explotación de los recursos</i>	105
Tabla 70 <i>Variable fragilidad ambiental: Resumen de valor de fragilidad ambiental</i> ..	105
Tabla 71 <i>Variable resiliencia ambiental: Parámetro capacitación de la población</i> ...	106
Tabla 72 <i>Variable resiliencia ambiental: Parámetro gestión ambiental</i>	106
Tabla 73 <i>Variable resiliencia ambiental: Parámetro capacitación en seguridad ambiental y salud del personal minero</i>	107
Tabla 74 <i>Variable resiliencia ambiental: Resumen de valor de resiliencia ambiental</i>	107
Tabla 75 <i>Valor de vulnerabilidad: Dimensión ambiental</i>	107
Tabla 76 <i>Valor total de vulnerabilidad</i>	108
Tabla 77 <i>Valor del riesgo</i>	108
Tabla 78 <i>Parámetros con componentes geotécnicos - Identificación del peligro</i>	109
Tabla 79 <i>Variables con componentes geotécnicos – Factores desencadenantes</i>	109
Tabla 80 <i>Identificación de peligrosidad: Factor de seguridad estático</i>	111
Tabla 81 <i>Factores desencadenantes: Factor de seguridad pseudoestático</i>	111
Tabla 82 <i>Valor de peligrosidad: Parámetros geotécnicos</i>	111

Tabla 83 *Valor de riesgo: Componentes geotécnicos* 112

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 <i>Fallo de la presa de Brumadinho</i>	3
Figura 2 <i>Fallo de la presa de la minera Samarco</i>	4
Figura 3 <i>Fallo de la presa de Brumadinho</i>	6
Figura 4 <i>Índice producción minera</i>	6
Figura 5 <i>Posición del Perú en el ranking mundial de producción minera</i>	7
Figura 6 <i>Sección de la presa de colas de Stava (dique superior), fallada en 1985</i>	19
Figura 7 <i>Falla de presa de relaves Córrego do Feijao</i>	22
Figura 8 <i>Método de recrecimiento aguas abajo</i>	26
Figura 9 <i>Métodos de construcción de muros de presas de relaves</i>	27
Figura 10 <i>Métodos de construcción de muro aguas arriba</i>	28
Figura 11 <i>Métodos de construcción de muro aguas abajo</i>	28
Figura 12 <i>Métodos de construcción de muro eje central</i>	29
Figura 13 <i>Distribución temporal de fallas de presas de relaves (TSF-Instalación de almacenamiento de relaves)</i>	30
Figura 14 <i>Distribución temporal de fallas de presas de relaves (TSF-Instalación de almacenamiento de relaves)</i>	31
Figura 15 <i>Magnitud de las fallas de las presas de relaves a lo largo del tiempo</i>	32
Figura 16 <i>Gráfico de barras temporal de las principales variables causantes de 46 fallas en embalses de relaves que produjeron flujos masivos</i>	38
Figura 17 <i>Estadísticas sobre las causas de las fallas de las presas de relaves</i>	38
Figura 18 <i>Diagrama tridimensional de la relación entre el método de construcción de la presa y las causas de falla de la presa</i>	39
Figura 19 <i>Distribución global de eventos de presas de relaves</i>	40
Figura 20 <i>Causas en regiones con alta frecuencia de fallas en presas de relaves</i>	41
Figura 21 <i>Causas de las fallas de las balsas de relaves en diferentes minas</i>	41
Figura 22 <i>Distribuciones de altura de presas de fallas de presas de relaves para diferentes minas</i>	43
Figura 23 <i>Análisis de regresión lineal de la altura de la presa</i>	44
Figura 24 <i>Relación entre la proporción de relaves liberados y el método de construcción de la presa después de la falla de la misma</i>	45
Figura 25 <i>Relación entre la proporción de estériles y el nivel de peligro tras la rotura de la presa</i>	45

Figura 26 <i>Relación entre el volumen de almacenamiento de estériles y el volumen de liberación</i>	46
Figura 27 <i>Esquema de un análisis de estabilidad de taludes.</i>	47
Figura 28 <i>Gráfico identificación y caracterización de peligros generados por fenómenos naturales</i>	51
Figura 29 <i>Factores condicionantes del peligro</i>	52
Figura 30 <i>Factores desencadenantes del peligro</i>	52
Figura 31 <i>Factores de la vulnerabilidad: exposición, fragilidad y resiliencia</i>	53
Figura 32 <i>Escala de Saaty</i>	55
Figura 33 <i>Matriz de comparación de pares</i>	55
Figura 34 <i>Matriz de normalización</i>	56
Figura 35 <i>Vector priorización</i>	56
Figura 36 <i>Vector suma ponderada</i>	57
Figura 37 <i>Cálculo λ máx</i>	57
Figura 38 <i>Resumen riesgos asociados a depósitos de relaves</i>	59
Figura 39 <i>Análisis bow-tie típico</i>	63
Figura 40 <i>Matriz típica de evaluación de riesgos cualitativa</i>	63
Figura 41 <i>Ubicación general del área de estudio</i>	66
Figura 42 <i>Mapa geológico del cuadrángulo de Chincheros (INGEMMET, BOLETIN N°70).</i>	67
Figura 43 <i>Vista aguas arriba del Río Mishca, valle en forma de “V”</i>	68
Figura 44 <i>Sobreelevación del depósito de relaves filtrados Ramahuayco</i>	74
Figura 45 <i>Distancias entre los principales centros poblados y las operaciones de Catalina Huanca Sociedad Minera (CHSM). Distancias expresadas en km.</i>	104
Figura 46 <i>Tablas resumen de los factores de seguridad obtenidos en los análisis de estabilidad física.</i>	110
Figura 47 <i>Factores de seguridad objetivo para la estabilidad de taludes en las fases de construcción, operación y transición - evaluación estática</i>	115
Figura 48 <i>Comité central de emergencias</i>	116
Figura 49 <i>Cartilla de respuesta ante emergencias</i>	116
Figura 50 <i>Comunicaciones</i>	117
Figura 51 <i>Caso de emergencias ambientales</i>	118
Figura 52 <i>Reporte de emergencia</i>	118

Figura 53 <i>Medidas de contingencia</i>	119
Figura 54 <i>Medidas de contingencia</i>	119

RESUMEN

La minería en el Perú es uno de los pilares de la economía peruana y exportaciones, siendo los principales la plata, el cobre, el zinc y el oro. La minería ha generado empleo en la construcción de infraestructuras en las regiones donde prima la minería, estos minerales son almacenados en depósitos que si llegasen a fallar ocasionarían contaminación por la alta toxicidad que poseen.

En la presente investigación tiene como objetivo evaluar el riesgo de deslizamiento del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco a fin de proponer medidas preventivas. Esta tesis se basa en una recopilación de información nacional e internacional el cual nos permite evaluar el riesgo usando el manual del Cenepred el cual nos permite dar un control y seguimiento ante posibles fallas por deslizamiento en depósitos de relaves, para obtener los resultados y a partir de ello realizar medidas que permitan una mejora para mitigar los riesgos provocados por esta falla.

En el desarrollo de esta investigación primero se realizó un análisis de riesgo de deslizamiento para el depósito de relaves para encontrar el nivel del riesgo que provocaría en caso ocurra algún fenómeno inesperado como es el deslizamiento, ya que al producirse esta falla provocaría el desborde del relave y conduciría al río o quebrada y centros poblados cercanos lo cual terminaría perjudicando al medio ambiente y a las personas cercanas, para posteriormente realizar medidas preventivas siguiendo reglamentos internacionales como son los boletines técnicos, pautas de seguridad del CDA y Revisiones de Seguridad de Presas el cual ayuden a mitigar el riesgo producido por esta falla.

Finalmente se concluye de esta evaluación que este depósito de relaves se encuentra en un riesgo alto, por lo que se propone medidas en la etapa de operación de la mina.

Palabras clave: Depósito de Relaves, Evaluación de riesgos, Medidas Preventivas.

ABSTRACT

Mining in Peru is one of the pillars of the Peruvian economy and exports, the main ones being silver, copper, zinc and gold. Mining has generated employment in the construction of infrastructure in the regions where mining is a priority, these minerals are stored in deposits that if they were to fail would cause contamination due to their high toxicity.

The objective of this research is to evaluate the risk of landslide of the Ramahuayco tailings deposit regrowth in order to propose preventive measures. This thesis is based on a compilation of national and international information which allows us to evaluate the risk using the Cenepred manual which allows us to control and monitor possible failures due to landslides in tailings deposits, to obtain the results and from this to carry out measures that allow an improvement to mitigate the risks caused by this failure.

In the development of this research, first a landslide risk analysis was carried out for the tailings deposit to find the level of risk that would occur in the event of an unexpected phenomenon such as a landslide, The risk of this failure would cause the tailings to overflow and lead to the river or creek and nearby towns, which would end up harming the environment and people nearby, and then carry out preventive measures following international regulations such as technical bulletins, CDA safety guidelines and Dam Safety Reviews, which help mitigate the risk caused by this failure.

Finally, it is concluded from this evaluation that this tailings deposit is at high risk, and therefore measures are proposed for the mine operation stage.

Key words: Tailings deposit, Risk assessment, Preventive measures.

INTRODUCCIÓN

En la presente investigación se realiza una evaluación del riesgo provocado por deslizamiento para poder realizar medidas preventivas y así disminuir el riesgo que representa a las personas y al medio ambiente, las medidas preventivas son indispensable en todas las etapas de la mina para el correcto ciclo de vida del proyecto.

La característica principal de este tipo de proyectos de depósito de relaves, es el personal no capacitado, existencia de un incorrecto plan de contingencia y medidas preventivas.

Para analizar esta problemática es necesario determinar los parámetros que ayuda a determinar la condición en la cual está situada esta estructura y así determinar el posible impacto que exista en las zonas colindantes, para ello se considera parámetros donde interviene la topografía, geología, hidrología, hidrogeología y sismicidad; esto conlleva a una falla en la estructura que produce desastres y contaminación ambiental.

Esta investigación, permite conocer el nivel del riesgo que ocasionaría un desastre como es el deslizamiento y así proponer medidas que permitan la mitigación y precaución ante este desastre.

La información se obtuvo de fuentes gubernamentales como es la SENACE y recopilación de tesis elaboradas en base a información ambiental, económica y social pertenecientes a la minera Catalina Huanca. Posterior a ello realizamos la evaluación con los datos aplicando el manual del Cenepred para identificar el peligro y la vulnerabilidad bajo un análisis multicriterio que conlleva a determinar el nivel del riesgo y mitigarlo a través de medidas preventivas.

CAPITULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción del problema

De 1993 a 2009, la población mundial creció un 23%, mientras que la economía mundial creció un 153%. El rápido crecimiento económico y el aumento de la población requieren el suministro de más recursos minerales. En este contexto, ahora se están extrayendo incluso minerales de baja ley. La extracción de minerales daña el medio ambiente y genera grandes cantidades de subproductos. El material particulado fino que se produce después del beneficio se denomina relaves y generalmente se almacena en forma de lodo en grandes diques artificiales, es decir, represas de relaves destinadas a proteger el medio ambiente natural de la contaminación (Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag, 2022, p. 1).

De acuerdo a Mireles (2019), mencionan que la industria minera ha presentado problemas en la etapa de diseño a lo largo de los años, ya que no siempre se toma en cuenta los eventos sísmicos e hidrológicos externos, lo que ha ocasionado roturas y desbordes en diferentes tipos de depósitos de relaves en todo el mundo.

Comentario: El problema se manifiesta con la disminución de la biodiversidad en los alrededores de la presa de relaves.

La causa del fallo se debe a la acción de las fuerzas de gravedad, hidrostáticas e hidrodinámicas sobre un suelo fácil de humedecer. Estas fuerzas debilitan las fuerzas internas de interacción entre las partículas, dando lugar a un suelo con una baja capacidad portante. Los efectos de estas fuerzas pueden variar en función al tipo de infraestructura y de las condiciones geológicas del entorno (Hernández y Guardado, 2010).

Entre ellas se encuentra la presa de Fundao en Brasil, se encontró en investigaciones que derramó aproximadamente 50 millones de toneladas de residuos, ocasionando pérdidas humanas y materiales, así como daños ambientales. A nivel nacional, podemos mencionar la que afectó al río Opamayo en Huancavelica, donde otra represa colapsó y liberó aproximadamente 500 toneladas de relaves mineros, afectando a las comunidades aledañas.

Los primeros afectados por el recrecimiento de depósito de relaves son las comunidades locales cercanas, flora y fauna, recursos hídricos, así como a los trabajadores mineros debido a que en algunos casos no se consideran los eventos sísmicos que provocan rupturas y desbordes tanto a nivel nacional como internacional, quienes están expuestos al polvo y partículas en suspensión, y otros peligros asociados al manejo de relaves.

Además, los residuos mineros generados son una fuente de contaminación para el ecosistema aledaño al lugar de extracción del mineral. Las consecuencias para los ecosistemas y la población circundante suelen ser catastróficas.

Así, los residuos o relaves mineros generados por la extracción del mineral son una fuente de contaminación para el ecosistema y lugares cercanos.

En la ingeniería se toman medidas preventivas para garantizar la seguridad de las personas, en zonas muy aledañas a las operaciones de mina, así que el medio ambiente puede verse afectado por las posibles fallas en los depósitos de relaves causadas por diferentes factores, incluyendo un diseño deficiente y factores externos que no se toman en cuenta, lo que indica un riesgo ambiental, social y económico alto.

De acuerdo a Van Teijlingen (2019), menciona que los depósitos de relaves son proyectos de ingeniería de alto riesgo porque contienen cantidades significativas de materiales potencialmente tóxicos y deben mantener su estabilidad física para siempre. Inicialmente, las barreras de contención de los estériles pueden fallar, liberando millones de metros cúbicos de estériles al medio ambiente. Cuando esto ocurre, las consecuencias para los ecosistemas y la población circundante suelen ser catastróficas. En enero de 2019, por ejemplo, el cantón de Brumadinho, en el sureste de Brasil, se transformó en un mar de relaves mineros procedentes de una mina de hierro situada aguas arriba (ver Figura 1). El fallo de la presa de relaves Córrego do Feijó provocó la muerte de al menos 235 personas, que se ahogaron en el lodo. Cientos de kilómetros del río Paraopeba se utilizaron para transportar los residuos, lo que acabó con la vida acuática del río y lo convirtió en no apto para el consumo humano.

Figura 1

Fallo de la presa de Brumadinho



Nota. MSIA (2019)

De acuerdo a Van Teijlingen (2019), comenta que, según un análisis técnico de las causas de fallo de varios depósitos de relaves en el mundo, la mayoría de los depósitos fallan por resultado de la licuefacción, o exceso de agua en el material de la presa. Un alto nivel de hidratación afloja el material de la presa, provocando su erosión en ciertas zonas o su colapso total bajo la presión ejercida por los relaves depositados detrás de la presa.

La inundación de los depósitos de relaves se debe a las condiciones meteorológicas extremas como las precipitaciones en épocas de máximas avenidas, el fallo se debe por la ausencia de un sistema de impermeabilización el cual protege el dique o la mala gestión del sistema de drenaje los cuales desvían la escorrentía para evitar un alto nivel de saturación del dique (Roche et al., 2017; Emmerman, 2018).

La pérdida de estabilidad de los diques debido a la actividad sísmica cerca del proyecto minero, que puede ir desde un temblor moderado hasta un terremoto de gran magnitud, es otra causa de rotura.

A continuación, se muestra la Figura 2, que muestra el fallo de la presa de la minera Samarco.

Figura 2

Fallo de la presa de la minera Samarco



Nota. ProActivo (2015)

De acuerdo a Van Teijlingen (2019), comentan que la erosión parcial de la presa o la filtración de agua contaminada a través del fondo del embalse o presa hacia ríos y acuíferos también pueden tener efectos significativos sobre el medio ambiente y la sociedad. Sin embargo, la rotura de una presa es lo más catastrófico para el medio ambiente y la sociedad. El procedimiento de "drenaje ácido de rocas" puede generar ácido a partir de los relaves. Este proceso se produce cuando los suelos ricos en sulfuros entran en contacto con el oxígeno y el agua y se oxidan. Los yacimientos de cobre suelen ser

ricos en sulfuros, por lo que los residuos de las minas de cobre son especialmente susceptibles a la producción de ácido. Su filtración puede contribuir a la acidificación de los suministros de agua. Los metales pesados sólidos de los relaves se disuelven mucho más fácilmente en agua ácida, lo que constituye un problema adicional del drenaje ácido de rocas. Los metales pesados pueden ser transportados a ríos y acuíferos en estado disuelto y contaminarlos.

Comentario: El efecto que podría ocurrir en la falla por el recrecimiento del depósito de relaves trae consigo contaminación del suelo, del agua y del aire causando problemas socioeconómicos a las comunidades aledañas.

De acuerdo a Mireles (2019), menciona que es sumamente difícil controlar algunas variables internas y externas el impacto socioeconómico, ya que influyen en el rendimiento de los proyectos de construcción y en su capacidad para cumplir sus objetivos, por lo que los proyectos de construcción se desarrollan bajo una incertidumbre considerable. En la actualidad, un número significativo de proyectos de construcción no se completan con éxito, siendo la ausencia de prevención de riesgos durante la fase de planificación del proyecto una de las principales causas de retrasos y sobrecostos.

Comentario: Podría ocurrir un impacto socioeconómico negativo por falla en la presa de relaves provocando derrames que afecta directamente a la agricultura, ríos y a la biodiversidad contaminando también los suelos afectando seriamente la agricultura, así como la captación de fuentes de agua.

A lo largo de la historia se han producido roturas de presas, siendo ejemplos recientes la presa de Patel en Kenia y la de Xepian-Xe Nam Noy en Laos, así como la crisis de Hidroituango en Colombia, que no causó pérdidas sustanciales. Además, no existe una estadística mundial de la población vulnerable por rotura de presas, pero aproximadamente el 40% de la población mundial es vulnerable a este tipo de catástrofes y aproximadamente el 80% está afectado por daños colaterales es decir cortes en las vías de comunicación, servicio eléctrico y agua potable. (Padrino, 2018).

No todas las presas tienen la misma vulnerabilidad; el peligro y la gravedad del suceso varían en función del tamaño de la presa y la capacidad de volumen de relaves almacenados, generalmente las presas más vulnerables son las construidas con materiales arcillosos que son más fáciles de degradarse hidráulicamente, en especial las presas de tierra homogénea, son los más frecuentes ya que es el 90% de los casos de rotura. (Padrino, 2018). A continuación, se muestra la Figura 3 donde se observa la falla de la presa de Brumadinho.

Figura 3

Fallo de la presa de Brumadinho.

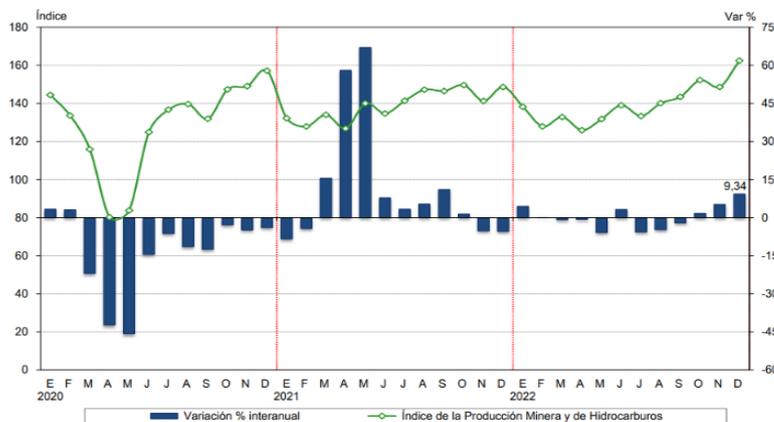


Nota. Minas Gerais (2019)

La minería ha sido uno de los motores más importantes del desarrollo económico del Perú durante muchos años. “El Índice de Producción Minera e Hidrocarburos aumentó 9,34% en diciembre de 2022 (ver Figura 4), debido a un incremento de 11,05% en la actividad minera metálica por mayores niveles de producción de cobre, hierro, plomo y estaño”. (INEI, 2022).

Figura 4

Índice producción minera



Fuente: Instituto Nacional de Estadística e Informática.

Nota. INEI (2022)

Según la más reciente encuesta mundial del Servicio Geológico de los Estados Unidos (2022), el Perú reportó incrementos en los niveles producidos en cuatro principales minerales en enero del 2022 respecto al mismo mes del 2021: cobre (12,7%), oro (+4,5%), estaño (+14,7%) y molibdeno (+0,2%); el Perú escaló posiciones en el ranking mundial de producción minera (ver Figura 5); de esta manera, nuestro país se consolida como un importante destino para las inversiones mineras.

Figura 5

Posición del Perú en el ranking mundial de producción minera

2021: Posición del Perú en el ranking mundial de producción minera

PRODUCTO	LATINOAMÉRICA	MUNDO
Cobre	2	2
Oro	2	11
Plata	2	3
Zinc	1	2
Plomo	1	4
Estaño	1	3
Molibdeno	2	4
Arsenico	1	1
Indio	1	7
Andalucita / kyanita y minerales relacionados	1	4
Selenio	1	10

Nota. U.S.Geological Survey (USGS), Mineral Commodity Summaries 2022. Fecha de publicación: 31 de enero de 2022.

Sin embargo, la industria minera ha presentado varios problemas en la ingeniería de detalle y en la etapa de construcción de depósitos de relaves a lo largo de los años, debido a que en algunos casos no se consideran los eventos sísmicos que provocan rupturas y desbordes tanto a nivel nacional como internacional, afectando a las comunidades locales cercanas, flora y fauna, recursos hídricos, así como a los trabajadores mineros, quienes están expuestos al polvo y partículas en suspensión, y otros peligros asociados al manejo de relaves. En consecuencia, el propósito de esta tesis es sugerir medidas preventivas, dada la naturaleza del problema. Esta estrategia debe contener medidas preventivas y correctivas para reducir el impacto ambiental, garantizar la seguridad de las estructuras de la presa y preservar los recursos naturales y la salud humana.

Como ya se señaló, la minería es una de las industrias que más contribuye al crecimiento económico de la nación, aunque ocasionalmente puede generar disputas ambientales y socioeconómicas. Como ejemplo Ancash, que generó alrededor de 750 millones de soles en ingresos en 2014, le siguieron Arequipa, Cajamarca y La Libertad, que en conjunto generaron más de 410 millones de soles.

Sin embargo, si bien es cierto que la minería trae consigo un gran aporte económico a la población cercana, en algunos casos producto de la mala gestión o diseño de los relaves mineros genera un impacto socioeconómico negativo debido a que podría producirse una falla en el relave provocando derrames que afectan directamente a las actividades económicas de las personas debido a la contaminación que podría generar en el suelo y en las fuentes de captación de agua.

El Perú cuenta con unidades en cada sector que se encargan de gestionar la contaminación y el medio ambiente para gestionar y controlar estos daños. Entre los más significativos se encuentran el sector de Energía y Minas, que colabora con los Estudios de Impacto Ambiental (EIA) de acuerdo con sus estándares para el bienestar humano, así como con la Gestión Ambiental y los Planes de Adecuación y Manejo Ambiental (PAMA).

Las razones principales de los colapsos de los depósitos de relaves son por la inestabilidad del talud del dique, la mala impermeabilización, el rebosamiento, así como fuerzas externas impredecibles como terremotos y filtraciones. Estos posibles riesgos geológicos tanto la fase de construcción como el cierre de la presa requieren una identificación y evaluación especializadas. Ground Probe (2022).

La falla de los depósitos de relaves causa contaminación minera, como se sabe las mineras producen daños al agua, al aire, disminución de la capacidad portante del suelo por elementos tóxicos perjudicando al medio ambiente, como consecuencia ocasionan pérdidas de tipo natural y poblacional.

Los riesgos ambientales y económicos de fallas catastróficas, combinados con una mayor recuperación de agua y un menor efecto medioambiental, han hecho que la industria cambie gradualmente por la eliminación de relaves espesados. En este contexto, los ingenieros de relaves utilizan la regla empírica de que permitir que los relaves se sequen más allá del límite de contracción reduce el peligro de deformaciones significativa.

Los modos de falla se definen en función de la configuración geométrica de las instalaciones de la mina, sus condiciones operacionales, análisis de riesgo y zonas críticas (SGV, 2015).

Las categorías de consecuencia se basan en la gravedad del daño, Población en Riesgo (del inglés Population at Risk, PAR) y la Pérdida Potencial de Vida (del inglés Population Loss of Life, PLL), los que deben asignarse a escenarios de falla de día soleado y día lluvioso (CDA, 2019).

También, debe analizarse la ocurrencia de eventos no deseados (del inglés Material Unwanted Events, MUE) que podrían conducir a la falla hipotética de una presa. Los MUE son eventos o modos de falla que podrían afectar la estabilidad física de la instalación y provocar una ruptura o brecha en la presa. Tanto los modos de falla como las condiciones iniciales de falla se presentan en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1*Modos y condiciones iniciales de falla*

Modos de falla	Condiciones iniciales
Desbordamiento de dique de presa	Inundación
Falla de dique de presa	Tubificación
Falla de la cimentación	Filtración
Degradación del dique de presa	Falla de talud de dique de presa
	Desplazamiento sísmico
	Pérdida de tensión en cimentación (licuefacción sísmica y estática)
	Erosión

Nota. CDA (2019)

Para estimar la población en riesgo (PAR) se realiza lo siguiente: ubicación de áreas pobladas aguas abajo de las presas de relave; estimación de áreas pobladas afectadas por inundación natural de agua según escenarios de análisis día soleado o día lluvioso; estimación de áreas afectadas por el desarrollo del evento de rotura de presas según Modo de Falla Creíble, esto contabilizado hasta su distancia de recorrido; estimación incremental de áreas únicamente afectadas por el desarrollo del evento de rotura de presas según Modo de Falla Creíble (CDA, 2019).

Para estimar el riesgo potencial de vidas perdidas (PLL), se requiere de una metodología que clasifique el nivel de riesgo al que se expone la población. En ese sentido, la literatura especializada recomienda el uso de indicadores combinados en base a los parámetros de profundidad de inundación (D) y velocidad de flujo (V) para establecer la ratio de fatalidad (CDA, 2019).

La clasificación de rotura de presa es baja, media, alta y extrema según el nivel de afectación a los criterios de PAR y PLL.

Weerasinghe et al. (2022) han dividido los principales factores que contribuyen a la rotura de las presas en fuentes internas y externas. A pesar de la compleja ingeniería necesaria para la construcción de presas, factores internos como fallos de diseño, técnicos y de gestión pueden provocar su rotura. Los autores también destacaron que pueden producirse erosiones interiores, efectos mecánicos o eléctricos y fallos en las presas. La principal

causa externa es el cambio climático, donde el calentamiento global, que aumenta la temperatura de la atmósfera, supone una amenaza para las presas al incrementar el riesgo de inundaciones debido al deshielo de los glaciares y al aumento de las precipitaciones. Además, las actividades humanas, como las catástrofes provocadas por el hombre, son otra causa externa importante de la rotura de presas.

La técnica más básica para aprender y comprender los procesos y fenómenos geotécnicos de este tipo de obras es analizar sucesos pasados de rotura de presas de residuos mineros. Identificar el mecanismo y la dinámica del fallo, así como comprender los elementos y fenómenos que lo provocaron, son procesos que siempre es útil entender. Los derrumbes de depósito de relaves mayormente son provocados por la mala estabilidad de taludes. (Hernández y Guardado, 2010).

La forma más básica para comprender los fenómenos geotécnicos de este tipo de obras es analizar sucesos pasados de rotura de presas de residuos mineros. Identificar los fallos y comprender los fenómenos que lo provocaron. Los colapsos de los depósitos de relaves han sido ocasionados por inestabilidad o deslizamiento de taludes. (Hernández y Guardado, 2010).

De acuerdo a Hernández y Guardado (2010), los incidentes más frecuentes ocurridos en presas son: Deslizamiento de taludes, fallas por terremoto, fallas por sobrepaso, falla de la fundación y falla de estructuras auxiliares.

Según Oldecop y Rodriguez (2007), la causa más común de fallo en el análisis de 251 incidentes de rotura de presas de relaves mineros en todo el mundo es el deslizamiento del talud de la presa o de toda la presa sobre los cimientos.

Los eventos que determinan el inicio del deslizamiento pueden ser de diferente naturaleza. Hay tres escenarios principales que suelen causar un deslizamiento cerca de los depósitos de relaves.

- 1) La superficie freática se eleva y se aproxima al talud.
- 2) Desarrollo de presión de poros durante las operaciones de recarga (tasa de recarga excesiva que permite la generación de presión de poros), durante el desarrollo de las etapas de recarga o debido al traslado de maquinaria pesada.
- 3) La acción sísmica provoca la licuefacción de las zonas saturadas de la presa.

De acuerdo con el Modo de Falla Creíble, se simulan escenarios de día lluvioso y día soleado. En estos se va a identificar la huella de inundación tanto de inundaciones de agua natural como de la rotura de presa, este último bajo la aplicación de condiciones

newtonianas de flujo y según los parámetros reológicos característicos para cada concentración de sólidos (CDA, 2019).

1.2 Formulación del problema

Problema general

¿Cómo evaluar el riesgo de deslizamiento del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco a fin de proponer medidas preventivas?

Problemas específicos

- a) ¿En qué medida el nivel de peligrosidad del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco influye en las acciones preventivas?
- b) ¿En qué medida el nivel de vulnerabilidad del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco influye en el plan de contingencia?
- c) ¿En qué medida el nivel de riesgo del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco influye en el plan de respuesta ante emergencias?

1.3 Importancia y justificación de la investigación

Debido a la creciente presencia de la explotación de minerales, la actividad minera está generando actualmente un impacto ambiental negativo que repercute directamente en el ser humano, el suelo, el agua, la fauna, la flora y el ecosistema en general, por lo que su investigación y estudio se considera fundamental. Como resultado, el siguiente estudio tiene como objetivo proporcionar medidas preventivas para mitigar el impacto ambiental negativo y así reducir las fallas causadas por el mal diseño y construcción.

Como justificación se tiene que, en la actualidad, la actividad minera viene generando un impacto ambiental negativo que afecta directamente al suelo, agua, fauna, flora y en general el ecosistema debido a la mayor presencia de explotación de minerales por lo que se considera crucial su análisis y estudio. Por ello con la siguiente investigación se busca proponer medidas preventivas que evite el impacto ambiental negativo y así reducir las fallas provocadas por un mal diseño y construcción.

Como importancia, se tiene en cuenta que en un recrecimiento de depósito de relaves se busca continuar las operaciones sin perjudicar el presupuesto de la minera, y evitar retrasos de la planta de la mina. Por consiguiente, es importante minimizar los costos, y es un hecho que, al realizar un recrecimiento de un depósito de relaves, el costo es menor, debido a que en la etapa de diseño se analiza los criterios más convenientes, el cual no repercute la economía y así no construir otro depósito de relaves, el cual llevaría a otros estudios y autorizaciones. (Contreras, 2021).

1.4 Delimitación del estudio

a) Teórica:

Esta investigación cumplirá con los protocolos exigidos por la Universidad Ricardo Palma; para sustentar esta investigación se utilizará recopilación de textos y estudios de ingeniería básica que brindan conceptos sobre el recrecimiento de un depósito de relaves para así proponer medidas preventivas.

b) Espacial:

El proyecto de investigación consta de analizar 01 proyecto sobre el recrecimiento de un depósito de relaves en Perú para así evaluar los riesgos que estos presentan y por consiguiente proponer medidas preventivas.

c) Temporal:

Los datos que consideramos para el desarrollo de la presente investigación radican de investigaciones comprendidas entre los años 2014 – 2022 en Perú.

d) Limitaciones del investigador:

1. La presente investigación tendrá limitaciones de carácter bibliográfico nacional, debido a que no se dispone de una vasta información respecto al tema estudiado.
2. Limitación por acceso a la información en campo donde se ha puesto en estudio la investigación.

1.5 Objetivos de la investigación

Objetivo general

Evaluar el riesgo de deslizamiento del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco a fin de proponer medidas preventivas.

Objetivos específicos

- a) Determinar el nivel de peligrosidad del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco a fin de proponer acciones preventivas.
- b) Determinar el nivel de vulnerabilidad del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco a fin de evaluar plan de contingencia.
- c) Determinar el nivel de riesgo del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco a fin de evaluar el plan de respuesta ante emergencias.

1.6 Estado del arte

Objetivo general: Evaluar el riesgo de deslizamiento del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco a fin de proponer medidas preventivas

ITEM	AUTOR / AÑO / INSTITUCIÓN	TÍTULO	VARIABLES	RESULTADOS	CONCLUSIÓN	METODOLOGÍA
1	Huallpa, Maria; Medina, Santiago / 2020	Análisis comparativo entre los métodos de recrecimiento en una presa de relaves tipo pulpa en Cajamarca	Método de aguas abajo/ Método de Línea central / Presa de relaves		Se concluye que el análisis comparativo muestra variaciones bajas para el análisis estático y pseudoestático, siendo el más óptimo el método de aguas abajo; y para el análisis dinámico de deformaciones, el de línea central.	Descriptivo
2	Olaya, Elizabeth; Sevillano, Brahan / 2019	Análisis comparativo entre método aguas abajo y suelo reforzado para el	Metodo aguas abajo		Para el análisis de estabilidad la implementación del método de suelo	Descriptivo

		recrecimiento de la presa de relaves Viluyo			reforzado en el recrecimiento de la presa de relaves Viluyo, demostró el cumplimiento de los requisitos de estabilidad.	
3	Solier, Ronald; Vento, Lisbeth / 2021	Propuesta de plan de gestión de riesgos para la ejecución del sistema de estabilización de soil nailing y muro de contención en el acantilado de la costa verde - miraflores	Plan de gestión de riesgos	La finalidad es evaluar los riesgos y proponer un plan de respuesta. Para desarrollar la Gestión de Riesgos es necesario seguir una serie de procesos de acuerdo con la Guía PMBOK.	Se propuso, para el Sistema de estabilización de Soil Nailing, 9 planes de respuesta a los riesgos de alta prioridad que responderán de manera efectiva con estrategias y acciones a fin de reducir la exposición del proyecto al riesgo en un 32%.	Transversal
4	Buendia, Rosmary;	Construcción e implementación del recrecimiento de la	Plan de gestión de riesgos	En la gestión de plazos, costos, riesgos y calidad es primordial contar con	Para el presente proyecto la necesidad de comunicación tanto	Descriptivo

	Caceres, Claudio / 2020	presa de relaves en mina de cobre y zinc del distrito de San Marcos para la empresa Minera S.A		información histórica de proyectos similares puesto que permite aterrizar el proyecto y optimizar la planificación y gestión.	interna como externa entre los stakeholders estará en función de satisfacer sus intereses y gestionar sus expectativas.	
5	Arias, Cesar / 2021	Mejoramiento de la gestión de una presa de relaves para disminuir los riesgos ambientales y de seguridad	Geometría de la presa	Una descripción del evento no deseado, así como sus amenazas y consecuencias. La identificación de los controles que previenen el evento no deseado. La identificación de los controles que mitigan las consecuencias del evento no deseado. La identificación de los factores que pueden hacer que los controles fallen o que puedan socavar su	La mejora de la gestión de la presa de relaves permitió que se reduzca la cantidad de incidentes de seguridad y ambientales ocurridos desde julio del 2020, notándose un decremento de la cantidad de incidentes hasta llegar a cero accidentes durante cuatro meses continuos.	Descriptivo

				efectividad. Un análisis de la confiabilidad de los controles.		
6	Morales, Lixandra / 2019	Control de calidad CQC para el recrecimiento de la presa de relaves de la U.E.A. Animón – Pasco – 2018	Recrecimiento de la presa de relaves de la U.E.A. Animón	Procedimientos de gestión, procedimiento de no conformidad, procedimiento de inspección y medición de equipos.	Se logró realizar una metodología para el control de calidad CQC para recrecer la presa de relaves de la U.E.A. Animón. En función a las especificaciones técnicas, reglamentos y normas nacionales e internacionales.	Descriptivo
7	Arroyo, Jaime / 2017	El consumo sostenible del desmonte mina para el recrecimiento de presa de relave Andaychagua Volcan S.A.A.	Producción sostenible del desmonte mina. / Recrecimiento de la presa del relave	La producción del desmonte mina para el recrecimiento de la presa del relave en la mina Andaychagua Volcán S.A.A. es sostenible.	Se determinó que la producción sostenible del desmonte mina y el recrecimiento de la relavera es sostenible en función a los datos	Aplicado

					obtenidos en la prueba de la hipótesis.	
8	Cristobal, Elvys / 2018	Construcción del recremento de la presa de relaves Animón, Etapa II a la cota 4621 m.s.n.m. para el control de contaminación ambiental en la compañía minera Chungar S.A.C. - Pasco - 2017	Controlar la contaminación ambiental en la Compañía Minera Chungar S.A.C / Construcción del recremento de la presa de relaves Animón, etapa II a la cota 4621 m.s.n.m.	Los resultados de estabilidad son aceptables según los factores de seguridad.	Con la nueva geometría evaluada y la topografía proporcionada por CMCH, el contratista deberá construir las estructuras de concreto.	Aplicado
9	De La Cruz, Yoselin; Valderrama, Edith / 2021	Evaluación del riesgo de deslizamiento de un depósito de relave inoperativo en la	Riesgo de deslizamiento de un depósito de relave	Evaluación del riesgo aplicando el manual de CENEPRED tradicional	Se realizó la evaluación de riesgos de un depósito de relave inoperativo considerando variables	Descriptivo

		Cabecera de cuenca del Río Rímac, Chicla – Huarochirí – Lima considerando variables geotécnicas en el proceso de análisis jerárquico	inoperativo / análisis jerárquico	Evaluación del riesgo usando variables geotécnicas	geotécnicas y aplicando manual de Cenepred, se encuentra que el valor del riesgo se ubica dentro del Nivel muy alto.	
10	Paullo, Victor; Segovia, Marco / 2020	Evaluación del riesgo geotécnico de la Presa de Relave N°03 en la Unidad Minera Pallancata - Ayacucho	Presa de Relave / Riesgo Geotécnico	Se determinó los parámetros geotécnicos de la Presa de Relaves para luego cuantificar los riesgos de distintos escenarios asociados a eventos que pudiesen ocurrir y las consecuencias que estos conllevarían.	Se obtuvo un riesgo aceptable en 2 escenarios y 2 intolerables, siendo posible de reducir a un nivel de riesgo aceptable tomando medidas de mitigación social tal como se indicó en el análisis de resultados.	Descriptivo

CAPITULO II: MARCO TEÓRICO

2.1 Marco histórico

La construcción de presas de agua hechas por el hombre data de los años 5000 A.C. A diferencia de las presas de relaves para la industria minera que fueron creadas mucho después. Se reconocieron registros de las mineras antiguas fenicia y romana en Cartagena y la Faja Pirítica Ibérica-FPI. Las grandes presas para almacenar residuos mineros fueron construidas por la necesidad de los gobiernos a mediados del s.XX (Rodríguez y Gómez de las Heras, 2006, p 1).

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022), “Desde principios del siglo XX, la frecuencia de fallas en las presas de relaves ha sido alta en todo el mundo. Las fallas de presas que causaron daños extremadamente severos son las siguientes”. (p. 2)

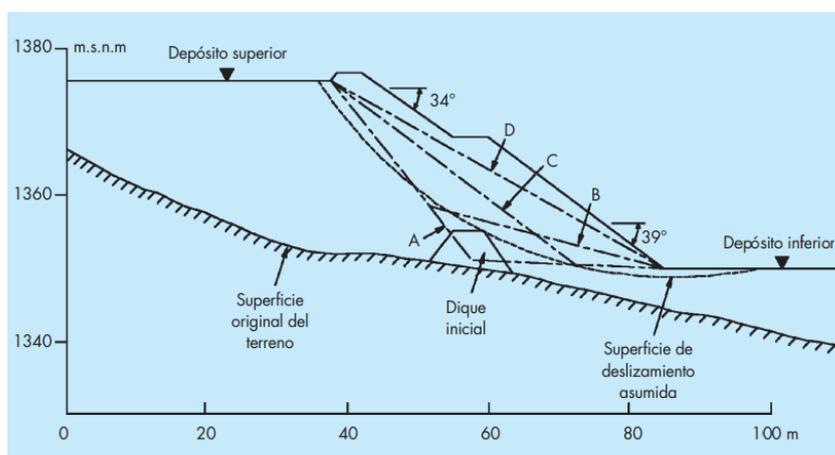
El 28 de marzo de 1965, 16 balsas de relaves en Chile se derrumbaron casi simultáneamente debido a un terremoto de magnitud 7,25, lo que provocó 270 muertos.

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022), “El 26 de febrero de 1972, los estanques de relaves de Buffalo en West Virginia, Estados Unidos, se derrumbaron debido a la inestabilidad de la presa, lo que provocó 125 muertes, destruyó 500 hogares y causó daños económicos por más de \$ 65 millones”. (p. 2)

Para Oldecop y Rodriguez (2007), “El 19 de julio de 1985, la represa de relaves de Prealpi Mineraia en Stava, Italia, falló debido a un sistema de drenaje congelado (ver Figura 6), lo que provocó 268 muertes; Se liberaron aproximadamente 180.000 metros cúbicos de relaves semifluidos, enterrando las aldeas de Stava y Tesero río abajo”. (p. 183)

Figura 6

Sección de la presa de colas de Stava (dique superior), fallada en 1985.



Nota. Oldecop y Rodríguez (2007)

Según (Diniz y Beirigo, 2006), “La presa de relaves de la Mina Fernandinho tenía aproximadamente 40 m. de altura en el momento del accidente, con un nivel de relaves de 2 m. por debajo de la cresta. La ruptura de la presa ocurrió el 16 de mayo de 1986, resultando en el movimiento de aproximadamente 350000 m³ de material”. (p. 269)

Según (Diniz y Beirigo, 2006), “Durante la investigación de este caso, no se descubrieron pruebas de la existencia de instrumentos de control de la presa. El talud aguas abajo de la parte rota presentaba una inclinación media de 42°, habiéndose identificado pocas grietas longitudinales aisladas en el talud”. (p. 269)

A partir del análisis de la situación y de los factores implicados, se determinó que el deslizamiento se produjo porque la inclinación y la altura del talud eran incompatibles con la resistencia al corte del material y las presiones piezométricas desarrolladas en el dique de estériles.

Al no haber llovido en el periodo, se admitió que el sistema de drenaje de la fundación de la presa perdió gradualmente su eficiencia debido a la obstrucción producida por los finos, lo que provocó la elevación de la línea piezométrica. Estas condiciones, combinadas con la presencia de cuatro equipos trabajando en la coronación de la presa al mismo tiempo, llevaron el talud a un punto crítico, provocando su rotura.

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022), “El 22 de febrero de 1994, la represa de relaves de Merriespruit en Sudáfrica falló debido a una brecha en la represa causada por fuertes lluvias, lo que resultó en la pérdida de 600 000 m³ de relaves que afectaron infraestructura hasta 4 km aguas abajo y causaron 17 muertes”. (p. 2)

La pendiente de construcción de la presa aguas abajo era sustancialmente mayor de lo previsto en el proyecto. Aunque en este caso no se produjo el derrumbamiento del talud, la elevada pendiente contribuyó a aumentar las tensiones de corte en la cimentación por debajo de la punta de la presa aguas abajo.

Por último, la baja permeabilidad y homogeneidad de la presa de arcilla retrasó la disipación de las presiones de poro generadas durante la construcción y el llenado de la presa.

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022), “El 30 de enero de 2000, el depósito de relaves de Baia Mare en Rumania colapsó, contaminando gravemente las fuentes de agua; como resultado, más de 2 millones de personas tenían acceso limitado al agua potable”. (p. 2)

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022), “El 8 de septiembre de 2008, la mina Xinta en el condado de Xianfen, provincia de Shanxi, se derrumbó debido a una construcción ilegal y daños por filtraciones locales, lo que provocó 277 muertes”. (p.2)

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

El 4 de agosto de 2014, en el estanque de relaves de la mina Mount Polley en Canadá, no tener en cuenta la capa de hielo provocó el colapso de la capa del lago glacial en la base de la presa, lo que resultó en la descarga de unos 17 millones de m³ de aguas residuales y 8 millones de m³ de relaves en el lago, causando una contaminación extremadamente grave a las fuentes de agua. (p. 2)

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

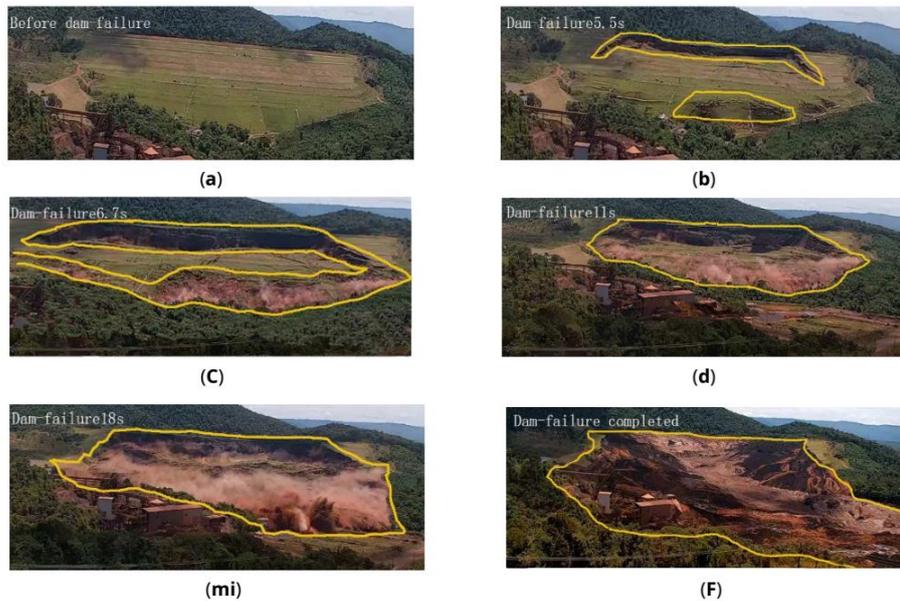
El 5 de noviembre de 2015, la presa de relaves de mineral de hierro de Samarco en Brasil se derrumbó debido a un pequeño terremoto que provocó la licuefacción de la presa; alrededor de 32 millones de m³ de relaves se derramaron, inundando 158 casas en pueblos río abajo, matando al menos a 17 personas y contaminando 650 km del río que desemboca en el Océano Atlántico. (p. 2)

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

El 25 de enero de 2019, la presa de desechos de mineral de hierro de Vale en Brasil Córrego do Feijao, que ha operado a un nivel de agua alto durante años, experimentó una falla momentánea debido a la inestabilidad de la pendiente de la represa, dejando 325 personas muertas o desaparecidas y causando 12 millones de m³ de relaves a fluir, contaminando 650 km de ríos. Este accidente final es reconocido como la falla de presa minera más catastrófica de todos los tiempos. La evolución de este evento se muestra en la Figura 7. (p. 2)

Figura 7

Falla de presa de relaves Córrego do Feijao



Nota. Minas Gerais (2019).

(a) antes de la rotura de la presa; (b) rotura de presa 5,5 s; (C) rotura de presa 6,7 s; (d) Presa-falla 11s; (mi) Presa-falla 18s; (F) Presa-fallo completado.

El gobierno chileno reconoció 740 depósitos de relaves a través del Instituto Nacional de Geología y Minería (Sernageomin) a marzo de 2018, con 469 inactivos, 170 abandonados y 101 en funcionamiento. El método de depositación más prevalente es el de relaves convencionales. Estos tranques de relaves representan el 80% de los tranques existentes en Chile. Las presas de relaves ocupan el segundo lugar (16%) cuando los muros de contención se construyen con materiales de préstamo. Los tranques restantes emplean tecnologías de relaves en pasta, espesados y filtrados (Sernageomin, 2018).

El volumen de relaves ya recogidos por las presas de relaves operativos es de 6,4 Mm³, con un volumen total permitido para estas presas de 14,3 Mm³ (6.600 millones de toneladas) (Sernageomin, 2018).

Además, la alta sismicidad de Chile ha resultado en el desarrollo de estrictas normas y sistemas de gestión de riesgos para asegurar el diseño, construcción y operación segura de las presas de relaves (Sernageomin, 2018).

Para Rodríguez y Odelcop (2011):

El funcionamiento hidráulico es una parte crucial de la seguridad de las presas de relaves. En algunas situaciones, deslizamientos, terremotos, sobrepaso, tubificación y fallo de estructuras auxiliares, indican que las condiciones de

funcionamiento hidráulico sugieren que las circunstancias de rendimiento hidráulico desempeñan un papel clave en el desarrollo del fallo y sus consecuencias. El fallo de una presa de estériles puede tener consecuencias económicas y medioambientales mínimas en el caso de un deslizamiento de pequeño volumen y corta duración o consecuencias catastróficas en el caso de un fallo de flujo. Por el momento, se desconocen las causas concretas de tales acciones. Por otra parte, se reconoce que la humedad tiene un efecto importante tanto en el comportamiento global de la presa como en las cualidades mecánicas de los estériles.

Según Espí y Rodríguez (2017) concluyen que el TFM (Mecanismos de Falla de Taludes) creó con éxito una técnica que utiliza el árbol de fallas para descubrir las causas o factores naturales y su liberación de material al medio ambiente.

Zarandin Irarorre, M. (2021) concluye que:

como resultado de la experiencia de los fracasos de presas de relaves, la normativa chilena ha evolucionado y que, a la luz de los recientes fracasos catastróficos de Mont Polley, Samarco y Fundao, se considera necesario establecer un sistema de gestión de riesgos basado en la gobernanza, la gestión del cambio y la gestión operativa preventiva-predictiva, mejorando así la comunicación y la respuesta entre las partes ante posibles situaciones de emergencia que permitan mitigar y controlar los riesgos ocasionados por las presas de relaves. Esto implica desarrollar criterios adecuados de diseño de la presa evaluando en primer lugar las repercusiones de su falla. (p. 580)

2.2 Investigaciones relacionadas con el tema de investigación

Investigaciones nacionales:

De La Cruz Gutiérrez, Y; Valderrama, E. (2021), en su tesis “Evaluación del riesgo de deslizamiento de un depósito de relaves inoperativo en la Cabecera de cuenca del Río Rimac, Chicla – Huarochirí – Lima considerando variables geotécnicas en el proceso de análisis jerárquico” tuvo como objetivo evaluar el riesgo de deslizamiento de un depósito de relaves inoperativo a la cabecera de la cuenca del Río Rimac, considerando variables geotécnicas en el proceso de análisis jerárquico. Se desarrolló bajo el Manual del CENEPRED, para la evaluación de riesgos originados por fenómenos naturales, el cual a través de un análisis jerárquico evalúa el origen natural como también la vulnerabilidad con la finalidad de calcular el riesgo de manera subjetiva, adicionalmente se adicionaron matrices con parámetros geotécnicos, el cual hay una mayor aproximación, por ende,

queda demostrado que este análisis multicriterio jerárquico del CENEPRED puede adoptarse a la ingeniería geotécnica.

Huallpa, M. (2020), en su tesis “Análisis comparativo entre los métodos de recrecimiento en una presa de relaves tipo pulpa en Cajamarca” Tuvo como objetivo crear una comparación utilizando variaciones porcentuales, así como analizar la estabilidad física, el análisis estático y pseudoestático, y las deformaciones dadas sin un evento sísmico, y finalmente realizar un análisis de infiltración para determinar el mejor método para reducirlas. En este diseño se propuso una presa de relaves tipo pulpa y una comparación de los procedimientos de recrecimiento aguas abajo y eje central; el yacimiento está ubicado en Cajamarca. Se descubrió que al elaborar el análisis de estabilidad estática y pseudoestática entre los enfoques antes mencionados, se obtuvieron resultados mayores a los valores mínimos en ambas circunstancias, permitiendo determinar la estabilidad favorable para cada caso. Se descubrió que, en ausencia de sismo inducido, la técnica aguas abajo supera al método de la línea central en cuanto a resultados de deformación; sin embargo, en presencia de sismo inducido, el método de la línea central supera al método aguas abajo.

Olaya, S. (2019), en su tesis “Análisis comparativo entre el método aguas abajo y suelo reforzado para el recrecimiento de la presa de relaves Viluyo”, el objetivo de este estudio era realizar una comparación entre el método aguas abajo y el suelo reforzado para el recrecimiento de la presa. La investigación comparativa incluye análisis de estabilidad estática, sísmica, dinámica y de infiltración, así como parámetros geotécnicos de los materiales utilizados para construir la estructura y parámetros sísmicos del entorno circundante. Según las fuentes investigadas, los resultados obtenidos en ambos casos superan los parámetros mínimos establecidos para el diseño de una presa, demostrando la buena estabilidad para cada escenario. El factor de seguridad se calculó utilizando los métodos Bishop Simplified, Spencer y GLE, con un coeficiente sísmico de 0,12 g para el análisis pseudoestático. Los factores de seguridad para el enfoque de suelo reforzado difirieron en un 3,43% en el estudio estático y en un 13,65% en el análisis pseudoestático. Según Aguirre (2017), para obtener el título de Ingeniero Geólogo, presentó su tesis en la UNSA-Arequipa: “Análisis de la Estabilidad Física de Presas de Relaves de la Concesión de Beneficio de la Minera Titan del Perú S.R.L.” Concluye que: para asegurar la estabilidad física de la presa de relaves N°5, es necesario asegurar la formación de una playa de relaves adosada al talud aguas arriba del dique de contención de la presa de relaves N°5, además se deberá controlar la formación de cuerpos de agua adosados al

talud aguas arriba, ya que se espera la formación de agua en el vaso debido a la disposición de relaves en pulpa.

Deberá respetarse el borde libre de 1 metro como medida de contingencia en caso de posible colapso del dique de contención por desbordamiento; para ello, deberá controlarse el asentamiento de la corona del dique de contención y, en caso de crecidas máximas, se instalará un estanque flotante en la masa de agua con dos bombas (una en espera), que desviarán el agua a la planta de tratamiento para su aprovechamiento.

Para la siguiente fase de recarga se propone la técnica de aguas abajo, ya que es más segura que el método previsto anteriormente (línea central), que requiere un cambio en el método de recarga que debe presentarse a las autoridades pertinentes antes de obtener las autorizaciones correspondientes. Para evitar fallos por desbordamiento, debe regularse y respetarse el borde libre mínimo de diseño (1,0 metro).

Investigaciones internacionales:

Bernal (2012), en su tesis "Estabilidad sísmica de un tranque de relaves construido por el método de eje central" para evaluar el diseño y factibilidad de un tranque de relaves construido por el método de eje central. La muestra utilizada es la totalidad de los relaves recuperados del tranque Ovejería, perteneciente a la división Andina de Codelco y ubicado aproximadamente a unos 50 km al norte de la ciudad de Santiago. Se obtuvo a partir de un estudio pseudoestático de un muro típico por el método de eje central, que da como resultado la falla de las zonas soportadas por las lamas.

Montaño (2021), en su tesis "Diseño de un plan de manejo ambiental para mitigar los impactos generados por la minería artesanal en Camilo Ponce Enríquez". El trabajo de investigación fue realizado en el cantón Camilo Ponce Enríquez ubicado en Azuay, este trabajo fue de tipo no experimental, Se utilizó la matriz de Leopold, ya que con esta matriz se identificó que el recurso hídrico fue el más afectado, y esto se debe a la cantidad de desechos que genera la minería y que son depositados en los ríos o zonas aledañas. Esto se debe a la poca eficacia por el Ministerio del Ambiente del Ecuador. Se sugirió que la minera cuente con una estrategia de gestión ambiental para reducir los problemas de contaminación causados por la minería artesanal.

Pastor (2017), sugiere que, para desarrollar un plan de mitigación de impactos, primero se identificarán, caracterizarán y evaluarán aquellos posibles problemas ambientales negativos tomando medidas preventivas.

2.3 Estructura teórica y científica que sustenta el estudio



2.3.1 Recrecimiento de un depósito de relaves

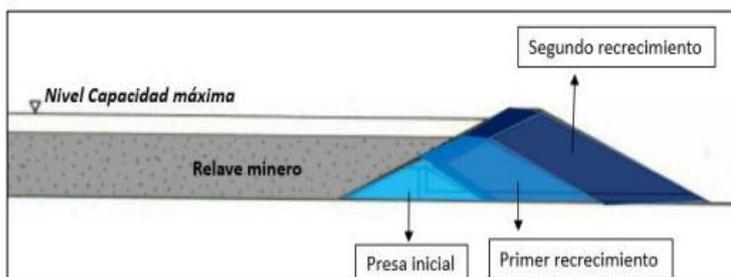
2.3.1.1 Definición

Para Bendia y Caceres (2020):

La RAE un recrecimiento es la acción y efecto de acrecentar o aumentar, es así que, el recrecimiento de una presa de relaves consiste en la elevación de los niveles existentes a través de procesos constructivos e ingenieriles con la finalidad de brindar mayor cabida de residuos y evitar un desborde de capacidad. En la Figura 8 se explica visualmente una forma de recrecimiento. (p. 15)

Figura 8

Método de recrecimiento aguas abajo



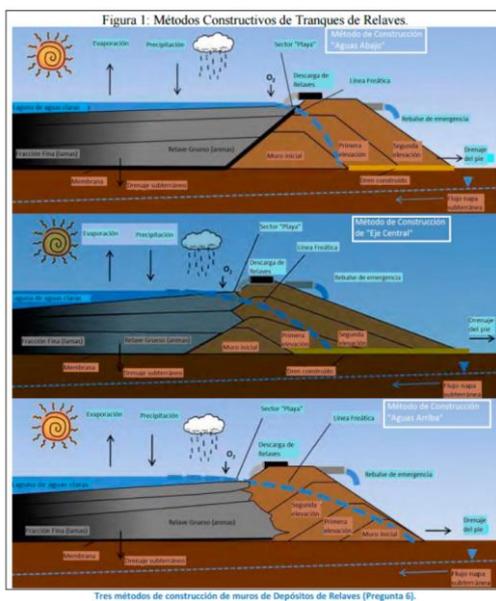
Nota. Buendia y Caceres (2020)

Las presas de relaves se construyen mediante la elevación de muros de contención, durante la etapa de operación de la presa, salvo en el caso de uso de depresiones naturales que no requieren muros. Como se observa en la Figura 9, modificada de la Figura 4-6 del GARD Guide, www.gardguide.com, la presa se inicia con la construcción de un pequeño

muro, que luego se eleva a medida que hay más relave que depositar. Existen 3 formas de recrecer muros, pero en Chile, desde 1970 sólo se permiten 2 tipos: “Construcción Aguas Abajo” (primera figura) y “Construcción de Eje Central” (segunda figura). El método de “Construcción Aguas Arriba” (tercera figura) está prohibido en Chile desde 1970, ejemplo que se ha seguido progresivamente en los demás países con vocación minera (Sernageomin, 2007).

Figura 9

Métodos de construcción de muros de presas de relaves



Nota. Sernageomin (2007)

2.3.1.2 Métodos de recrecimientos

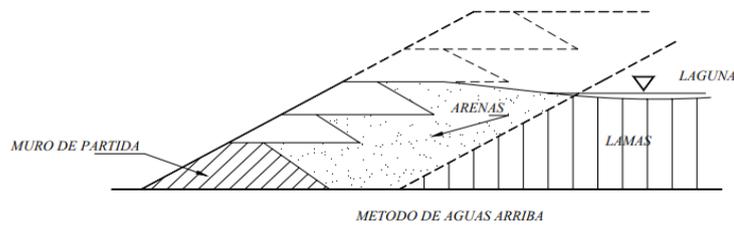
➤ Método de aguas arriba

Consiste en un muro inicial elaborado con material prestado compactado el cual se inicia de la deposición de relaves, la porción de relaves más gruesa es descargado por el flujo interior, se almacena junto al dique inicial; mientras que la porción de relaves más fina o también llamada lamas, es descargado por el flujo superior, almacenándose en el centro de la presa más alejado del muro, formando así la laguna de sedimentación (Sernageomin, 2007).

En la Figura 10, se muestra el método de aguas arriba; asimismo, un porcentaje significativo de presas de relaves que fallaron han sido aquellas que se levantaron en la dirección aguas arriba (Lyu et al., 2019; Franks et al., 2021).

Figura 10

Métodos de construcción de muro aguas arriba



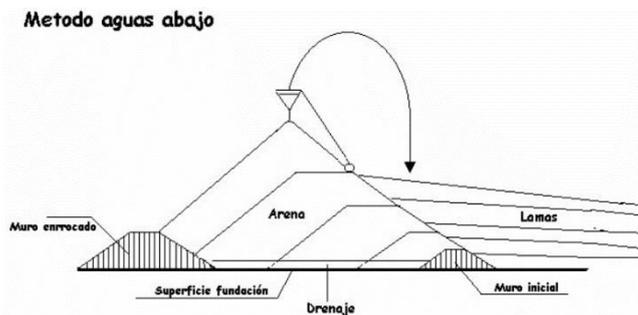
Nota. Sernageomin (2007)

➤ Método de aguas abajo

La construcción inicia con material de préstamo compactado, consiste en vaciar la arena gruesa hacia el lado aguas abajo del muro y las arenas finas se depositan hacia el talud aguas arriba así como se muestra en la Figura 11. Cuando el muro llega a un peralte suficiente aproximadamente 2 a 4 metros, se inicia el crecimiento del muro, movilizándolo los hidrociclones en dirección aguas abajo (Sernageomin, 2007).

Figura 11

Métodos de construcción de muro aguas abajo



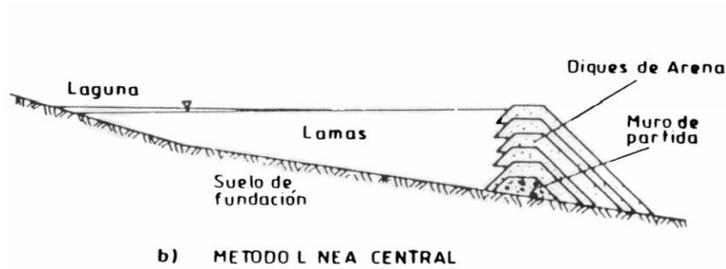
Nota. Sernageomin (2007)

➤ Método de eje central

El muro, al igual que los otros métodos, comienza con material de préstamo compactado, con la cual las arenas gruesas son vertidas aguas abajo y las lamas colocadas aguas arriba, así como es apreciado en la Figura 12. Tras el vaciado de las arenas en la presa inicial, la alimentación de arena se eleva, siguiendo el plano vertical de la berma de coronación de la presa original, lo que da lugar a un muro de arena cuyo eje sigue el mismo plano (Sernageomin, 2007).

Figura 12

Métodos de construcción de muro eje central



Nota. Sernageomin (2007)

La industria, los organismos reguladores y los especialistas están de acuerdo en que las presas de relaves situadas aguas abajo y en el centro, diseñadas, construidas y explotadas adecuadamente, son intrínsecamente más seguras que las situadas aguas arriba (Valenzuela, L., 2016).

2.3.1.3 Fallas en presas de relaves

Estadísticas de fallas en presas de relaves

En 2010, Azam y Li (2010) analizó la regularidad del tiempo de falla de las represas de relaves, la geografía y las razones con base en las estadísticas de fallas de las represas de relaves que ocurrieron en los últimos 100 años. Descubrieron que las razones principales de la falla de la presa de relaves fueron las lluvias anormales y la mala gestión. Al mismo tiempo, los desastres causados por fallas en las represas de relaves se han desplazado geográficamente de los países desarrollados a los países en desarrollo a lo largo del tiempo (Azam S y Li Q, 2010).

La base de datos global actualizada de fallas de presas de relaves actualizada en 2020 revela que los accidentes por fallas de presas de relaves están aumentando nuevamente (Lyu et al., 2019).

El desastre por falla de la presa de relaves se ve afectado por varios factores, lo que significa el mecanismo del desastre. Por lo tanto, el análisis de los factores de riesgo y la evaluación del riesgo de falla de la presa de relaves son los puntos de partida de la gestión del riesgo de falla de la presa de relaves (Menglong Wu y Yicheng Ye, 2022).

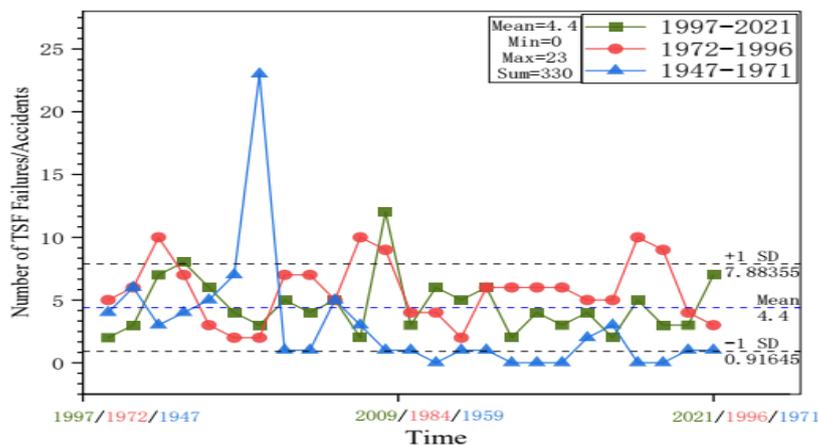
Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

Los años 1947-2021 se pueden dividir en tres fases (el período de 1915-1946 se excluye debido a la pérdida de datos), y cada 25 años se clasifica como una fase distinta. En la primera fase (1947–1971), ocurrieron 73 fallas en presas de estanques de relaves. En la segunda fase (1972–1996), ocurrieron fallas en 143

represas de estanques de relaves. Durante la tercera fase (1997–2021), ocurrieron 115 fallas en estanques de relaves. Figura 15 muestra un análisis estadístico de la frecuencia de fallas en las balsas de relaves; como se puede observar, el promedio anual de fallas en estanques de relaves a nivel mundial fue de al menos 4,4 de 1947 a 2021, es decir, 5,7 de 1972 a 1996 (línea roja), 4,6 de 1997 a 2021 (línea verde), y 2,9 de 1947 a 1971 (línea azul), así como se observa en la Figura 13. La frecuencia de fallas en las balsas de relaves entre 1972 y 1996 fue la más alta. Se encontró que la probabilidad de fallas en los estanques de relaves es más de 10 veces mayor que la probabilidad de fallas en las presas. (p. 3)

Figura 13

Distribución temporal de fallas de presas de relaves (TSF-Instalación de almacenamiento de relaves)



Nota. Shui-Quan Lin y Guang-Jin Wang (2022)

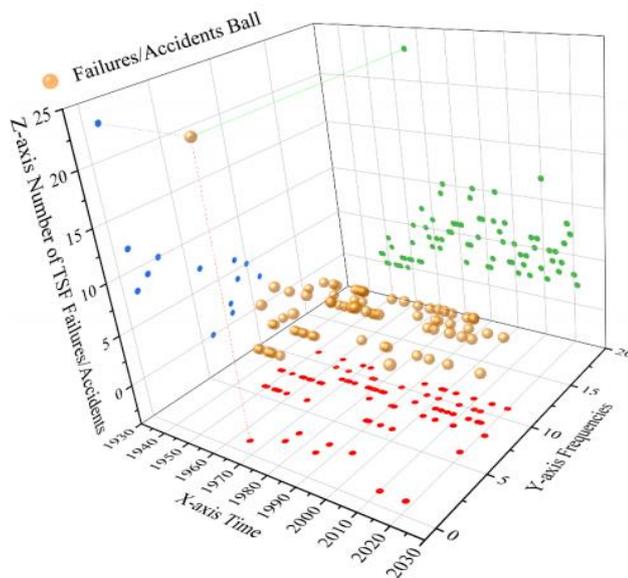
Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

Las esferas amarillas en la Figura 14 indican fallos en presas de relaves. Cuando el valor del eje Z (que indica el número de fallas en depósitos de relaves) es de 0 a 5, los puntos de proyección (puntos verdes) en la superficie XZ son los más densos, lo que indica la probabilidad más alta de 0 a 5 accidentes por fallas de represas en estanques de relaves en todo el mundo cada año. A medida que aumenta el valor del eje Z, los puntos de proyección son cada vez más dispersos. La esfera amarilla en el punto más alto indica el mayor número de accidentes de estanques de relaves en todo el mundo en 1965 (n=23), cuando ocurrieron 18 de estos eventos casi simultáneamente debido a un terremoto en Chile. Los puntos de proyección (puntos rojos) en la superficie XY son los más densos (n=62) cuando el valor del eje es 1974–1983, lo que significa que hubo más accidentes

por fallas en presas en estanques de relaves durante este período. Cuando el valor del eje Y es 5–10, el número de puntos de proyección en la superficie XY es el mayor. (p. 3)

Figura 14

Distribución temporal de fallas de presas de relaves (TSF-Instalación de almacenamiento de relaves)



Nota. Shui-Quan Lin y Guang-Jin Wang (2022)

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

La magnitud de las fallas de las balsas de relaves se clasifica de acuerdo con el número de víctimas humanas, el grado de contaminación del medio ambiente aguas abajo y la cantidad de relaves descargados. La clasificación es la siguiente:

1. Fallas muy graves de represas de relaves: múltiples pérdidas de vidas (>20) y/o liberación de 1.000.000 m³ descarga total y/o distancia de viaje de liberación de 20 km o más.
2. Fallas graves en represas de relaves: pérdida de vidas y/o liberación de ≥ 100.000 m³ semisólidos.
3. Otras fallas de presas de relaves: fallas de ingeniería/instalaciones distintas de las clasificadas como muy graves o graves, sin pérdida de vidas.

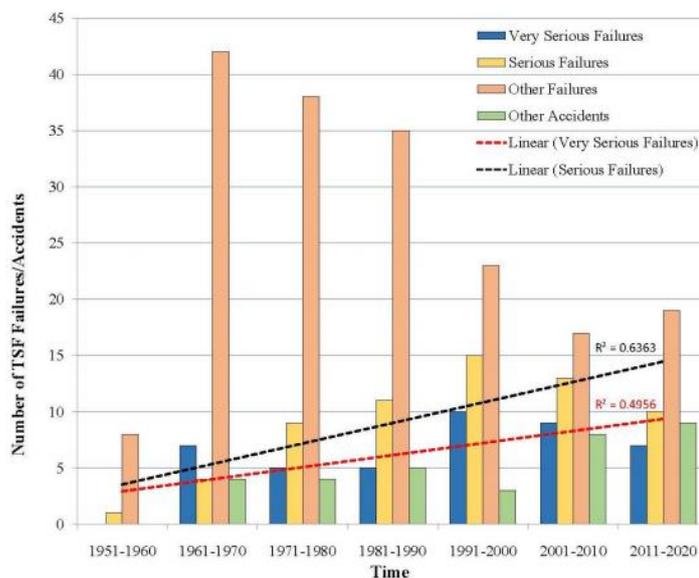
Otros accidentes relacionados con relaves: los accidentes son distintos a los clasificados como tipo 1, 2 o 3. (p. 4)

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

En la Figura 15 demuestra la relación entre la gravedad de las fallas de las balsas de relaves y el tiempo. Otras fallas ocupan la mayor proporción, seguidas de fallas graves; el número de fallos muy graves ocupa el tercer lugar. En términos de un análisis de regresión lineal, tanto las líneas rojas como las negras muestran una tendencia creciente, lo que indica que las fallas de las balsas de relaves son cada vez más graves, lo que puede estar relacionado con el crecimiento de la altura de las presas de las presas de relaves. (p. 4)

Figura 15

Magnitud de las fallas de las presas de relaves a lo largo del tiempo.



Nota. Shui-Quan Lin y Guang-Jin Wang (2022)

Dado que la eliminación de relaves es necesaria en la medida en que las operaciones continúan, las presas de relaves son estructuras en constante evolución que se levantan en etapas a lo largo de varios años o décadas, y algunos embalses se encuentran entre las estructuras más grandes hechas por el hombre en el mundo (Vic, 1983; ICOLD, 2001). Cuando las condiciones desfavorables persisten en una instalación de almacenamiento (es decir, cuando un gran volumen de relaves está muy húmedo, contractivo y/o cubierto por agua estancada), un mecanismo desencadenante puede iniciar una ruptura de la presa que resulta en un movimiento masivo de materiales fallados hacia el entorno aguas abajo (Robertson, 2019).

Estos casos de falla también ocurren en un momento de aumento de la producción de desechos mineros en proporción con la disminución de las leyes del mineral y el aumento

de la demanda de metales (Owenet, 2020), lo que plantea la urgente necesidad de reducir la frecuencia y las consecuencias de estos incidentes.

Las evaluaciones geotécnicas se han llevado a cabo convencionalmente para examinar retrospectivamente las causas fundamentales de las fallas catastróficas de las presas de relaves, con un enfoque particular en la estabilidad del terraplén, los relaves y los cimientos (Robertson, 2019).

Los tipos de relaves se pueden agrupar generalmente como roca dura (p. ej., plomo, zinc, cobre, oro, plata, molibdeno, hierro, níquel y uranio) o roca blanda (p. ej., carbón, cenizas volantes, fosfato y bauxita), según el tipo específico. gravedad (Vic, 1983; Pequeño et al., 2017; Ghahramani et al., 2020).

Para protegerse contra la contaminación ambiental, los relaves se depositan convencionalmente detrás de una represa compactada que generalmente se construye con la fracción gruesa (arenosa) de relaves, materiales de cimentación y/o desechos de escollera/relleno de tierra (Tizón, 2010; Kossoff et al., 2014).

Los grandes embalses representan fuentes de energía potencial significativa capaces de tener consecuencias geomorfológicas, geoquímicas y socioeconómicas aguas abajo extremas en caso de falla catastrófica (Lima, 2020).

2.3.1.4 Tipos de fallas en presas de relaves

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

A partir de los casos de fallas de represas existentes, se encontró que existen numerosas causas de fallas en las presas de relaves y que los patrones y mecanismos correspondientes son muy complejos. Las fallas de las presas de relaves no son provocadas por un solo factor, sino que a menudo son el resultado de múltiples factores que actúan juntos. En esencia, se deben a la influencia del medio exterior (terremotos, lluvias, inundaciones, hundimiento de cimientos de presas, etc.), que provoca cambios en los campos de tensión y filtraciones, lo que lleva a la desestabilización de la estructura. (p. 5)

Las causas de las fallas de las presas de relaves ICOLD se clasifican de la siguiente manera:

Estructura y estado de la fundación de la presa (FN):

Los cimientos que han sido sometidos a grandes presiones y empujes horizontales pueden causar daños a la estabilidad del cuerpo de la presa por deformación o deslizamiento. Las dos causas principales de este fenómeno son las siguientes:

1. Baja resistencia de los cimientos de la presa, especialmente cuando existe un cimiento kárstico.

2. Mala resistencia al deslizamiento de los cimientos de la presa. La fractura de la cimentación, el ablandamiento de la roca o las modificaciones pueden hacer que disminuya la resistencia al deslizamiento de la cimentación.

Terremotos (EQ)

Los mecanismos por los cuales los sismos provocan fallas en las presas de relaves son los siguientes:

1. licuefacción de arena de relaves
2. debilitamiento del material de la presa de relaves; y
3. desestabilización de la presa misma.

Los principales factores que afectan la licuefacción sísmica de la presa son:

1. condiciones de carga dinámica
2. las propiedades físicas de las condiciones de los relaves; y
3. Las condiciones del entierro. (Wang, W, 2018).

La mayoría de las balsas de relaves dañadas a causa de los terremotos eran presas del tipo aguas arriba; tales presas tienen problemas, que incluyen líneas de infiltración generalmente altas y poca resistencia sísmica.

Subsidencia de la mina (MS)

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022), “En términos generales, el suelo no puede soportar la enorme presión del asentamiento o el colapso de la presa de relaves, lo que lleva a la falla de la presa. Estas presas de relaves generalmente se construyen sobre una mina subterránea”. (p. 6)

Erosión externa (RE)

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022), “A escala de la estructura, la erosión por flujo de agua se puede dividir en dos tipos: si el agua erosiona la parte visible de la estructura, se denomina erosión externa; por el contrario, si el agua erosiona una parte invisible de la estructura o de sus cimientos, se denomina erosión interna”. (p. 6)

A gran escala, la lluvia puede dañar el suelo y arrastrarlo por la escorrentía, lo que podría causar fallas en las presas de relaves (Coulibaly, 2017).

Filtraciones y erosión interna (SE)

Control de la erosión interna o tubificación.

La distribución de los materiales dentro del cuerpo de la presa trata de controlar el nivel freático y, al mismo tiempo, evitar la transferencia de tierra o residuos.

Según Cedergren (1967) y Sherard (1984), se requieren filtros para evitar la erosión interna.

La erosión interna y la infiltración inadecuada en el cuerpo de la presa de relaves son frecuentes cuando el material de relleno es sólo Residuo Sólido de Mina (Rojas Linares, 2002).

Debido a la durabilidad y corta vida activa de las presas, el uso de geosintéticos es una opción para controlar la erosión interna; en consecuencia, los filtros sintéticos deben sustituirse por filtros de arena. Bajo la acción del campo de filtración, el material de arena de relaves puede sufrir deformación por infiltración. Para las presas de relaves, cuando se cumplen las condiciones de deformación por infiltración, se producirá un oleaje en la tubería dentro del cuerpo de la presa, lo que provocará grietas y colapso local dentro del vaso e inestabilidad local de la pendiente de la presa, lo que eventualmente conducirá a la falla de la presa de relaves (Shui-Quan Lin y Guang-Jin Wang, 2022).

Análisis contra flujo incontrolado.

La incapacidad de controlar el flujo de aguas subterráneas produce problemas importantes en el cuerpo de la presa, entre ellos:

- Vulnerabilidad en la estabilidad de los taludes aguas abajo.
- Incapacidad de gestionar el gradiente hidráulico.
- Erosión interna del cuerpo de presa.

El nivel freático, según Rojas Linares (2002), tiene un impacto sustancial en la estabilidad de la presa bajo presiones sísmicas y estáticas. Por ello, es fundamental mantener el nivel freático a un nivel bajo y disponer de material permeable en el cuerpo de la presa, particularmente en la dirección del flujo.

Rebasamiento (OT)

Según Rojas Linares (2002), un control inadecuado del agua embalsada puede provocar el rebasamiento sobre la corona y, a largo plazo, el colapso de la presa. La presa debe diseñarse con un borde libre mínimo para controlar el aumento del caudal de relaves, el aumento del nivel debido a las precipitaciones y la escorrentía superficial de la cuenca. Además, en función del número de años que lleve en servicio la presa de estériles, deberá construirse un aliviadero para eliminar el caudal excedente que entre en el embalse.

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

La falla de la presa provocada por la inundación se puede resumir de la siguiente manera, la velocidad del viento o las precipitaciones excesivas, el bloqueo o la destrucción de las estructuras de descarga y drenaje de inundaciones, o la

reducción de la capacidad de descarga de inundaciones pueden hacer que el agua impacte en la presa o que suba el nivel del agua, lo que eventualmente conducirá a la destrucción de la presa. (p. 6)

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

Las inundaciones en los estanques de relaves a menudo son el resultado de una combinación de múltiples factores, siendo la lluvia el factor principal, el bloqueo de incrustaciones, los daños y otros fenómenos son factores secundarios. Como tal, se puede decir que las fuertes lluvias son una condición necesaria para la falla de las presas de relaves (p. 6)

Sin embargo, el desbordamiento por inundación se reconoció como la principal causa de fallo de las presas de esteriles (Villavicencio y Espinace, 2014).

Según, (Sun, E. y Zhang, X.K, 2012), descubrieron que el desplazamiento de la presa dependía del grado de saturación de la presa durante la erosión por rebase. Sin embargo, las mediciones reales de la erosión por rebase son un proceso costoso y largo que suele limitarse a pequeñas pruebas experimentales (He, Z.G y Hu, P., 2015, p. 4283-4304).

Inestabilidad de taludes (SI)

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

La desestabilización de presas se refiere al daño debido a la extrusión o construcción de arena de relaves, fuertes lluvias u otros factores (disturbios no relacionados con filtraciones). Las grietas de la presa o la resistencia al deslizamiento del cuerpo de la presa suelen ser insuficientes para provocar la falla de la presa de relaves. Los signos habituales de daño son el agrietamiento y el abultamiento de la cara de la presa, la protuberancia de la pendiente, el hundimiento de la parte superior de la presa y la deformación del borde del dique. (p. 6)

Licuefacción

Numerosos estudios de casos según Robertson (2019), indican que una alta propensión de los relaves a licuarse en masa ya sea inducida estática o sísmicamente, es típicamente congruente con altos contenidos de humedad que se acercan o exceden el límite líquido (es decir, índice de liquidez > 1.0) y parámetros de estado positivo que indican propiedades contractivas.

En condiciones saturadas, materiales sueltos y contractivos ($+\psi$) son potencialmente licuables al corte sin drenaje, mientras que los materiales dilatadores ($-\psi$) son más compactos y demuestran mayor resistencia a la licuefacción. (Morgenstern, 2016).

También se han iniciado varios flujos de relaves debido a la liberación incontrolada o accidental de un estanque de sobrenadante, independientemente de la susceptibilidad a la licuefacción de los relaves embalsados. Casos como Los Cedros de 1937 y Mt. Polley de 2014 han involucrado la descarga prolongada y rápida de agua libre con relaves no licuados erosionados, mostrando un comportamiento de campo similar a una inundación repentina rica en sedimentos (Cuervo, 2017).

Cuando los efectos de la licuefacción del flujo se combinan con la disponibilidad de un gran embalse, la salida de flujo resultante puede distinguirse por una fluidificación adicional, tasas de descarga catastróficas, múltiples oleadas de flujos, mayores volúmenes de salida de flujos e inundaciones generalizadas de los acuíferos (CDA, 2020).

Las variables causales se agrupan de la siguiente manera:

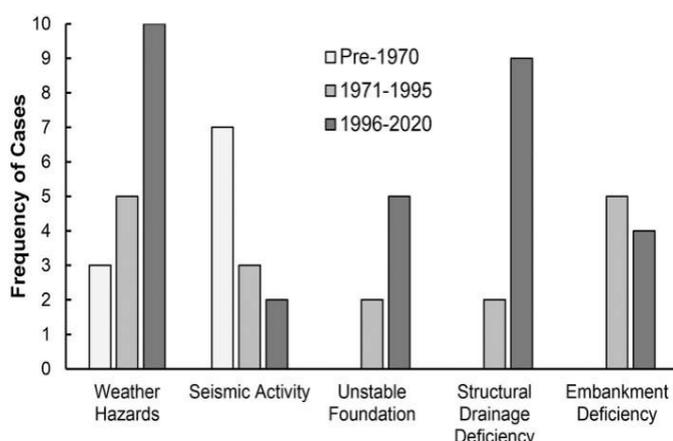
- Los peligros meteorológicos: Incluyen fuertes lluvias, nevadas, tormentas y ciclos de congelación y descongelación. Estos factores pueden dar lugar a una serie de mecanismos de falla, como el desbordamiento, la erosión interna (tuberías), la filtración, el exceso de presión intersticial y los problemas de drenaje estructural.
- Deficiencia de terraplén: destaca los problemas estructurales del núcleo de la presa de relaves (es decir, falta de compactación, uso de materiales de construcción inadecuados y/o pendientes demasiado empinadas) que pueden promover la erosión interna, las tuberías, el exceso de filtración y/o la inestabilidad de la pendiente.
- Actividad sísmica: se refiere a fallas de licuefacción inducidas por terremotos o temblores sísmicos que aceleran el embalse hacia la falla.
- Cimientos inestables: se refiere a cimientos de embalses que hidrogeológicamente y/o topográficamente no eran aptos para soportar cargas verticales altas y rápidas.
- Deficiencia de drenaje estructural: se refiere a las deficiencias dentro del sistema de drenaje del estanque intersticial y sobrenadante, que resultan en licuefacción estática, desbordamiento o fallo estructural.

Los peligros meteorológicos contribuyeron al 39 % de los 46 casos, seguidos de la actividad sísmica (26 %), la deficiencia de drenaje estructural (24 %), la deficiencia de terraplenes (20 %) y la inestabilidad de los cimientos (15 %). (M. Rana y Ghahramani, 2021).

En la Figura 16, se muestra las variables principales causantes de fallos en presas de relaves.

Figura 16

Gráfico de barras temporal de las principales variables causantes de 46 fallas en embalses de relaves que produjeron flujos masivos.



Nota. Shui-Quan Lin y Guang-Jin Wang (2022)

2.3.1.5 Estadísticas por tipo de fallas en el mundo

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

Se identificaron las causas de 258 fallas, mientras que se desconocen las de las 84 fallas restantes. Entre las 258 fallas de estanques de relaves con causas conocidas, 10,1 % fueron causadas por ST (26), 22,1 % por SI (57), 17,1 % por EQ (44), 5 % por ER (13), 11,2 % por SE (29), más del 24,4% por OT (63), 0,4% por MS (1), 9,7% por FN (25). La mayoría de las fallas de las presas de relaves estuvieron directamente relacionadas con fuertes lluvias o terremotos, como se muestra en la Figura 17. (p. 7)

Figura 17

Estadísticas sobre las causas de las fallas de las presas de relaves.

Reason	Number of Accidents	Region
SI	n = 57 (22.1%)	n = 1 (Bulgaria, Italy, Ukraine, Russia, Yugoslavia, Romania, Zambia, Spain, Australia, South Africa); n = 2 (Brazil); n = 3 (South Africa); n = 4 (UK); n = 5 (Canada); n = 11 (China); n = 21 (USA)
MS	n = 1 (0.4%)	n = 1 (China)
SE	n = 29 (11.2%)	n = 1 (Finland, Hungary, Peru, South Africa, France, UK, Australia); n = 3 (Canada); n = 4 (China); n = 15 (USA)
ST	n = 26 (10.1%)	n = 1 (UK, Ecuador, India, Canada, Macedonia, Romania, Hungary, Bulgaria Mexico); n = 2 (Brazil); n = 3 (China, Philippines); n = 8 (USA)
FN	n = 25 (9.7%)	n = 1 (China, Australia, New Zealand, Russia, Spain, China); n = 2 (UK); n = 3 (Philippines); n = 5 (Canada); n = 10 (USA)
OT	n = 63 (24.4%)	n = 1 (Zambia, Portugal, Peru, Zimbabwe, South Africa, Spain, Brazil); n = 2 (Mexico, Canada); n = 3 (Australia); n = 5 (UK); n = 6 (Chile, Philippines); n = 10 (China); n = 14 (USA); n = 1 (Region unknown)
EQ	n = 44 (17.1%)	n = 1 (USA); n = 2 (Peru Argentina); n = 3 (China); n = 5 (Japan); n = 29 (Chile)
ER	13 (5%)	n = 1 (Philippines, China, Chile, Sweden, Guyana, Montenegro, Bulgaria, Brazil); n = 2(Canada, USA).

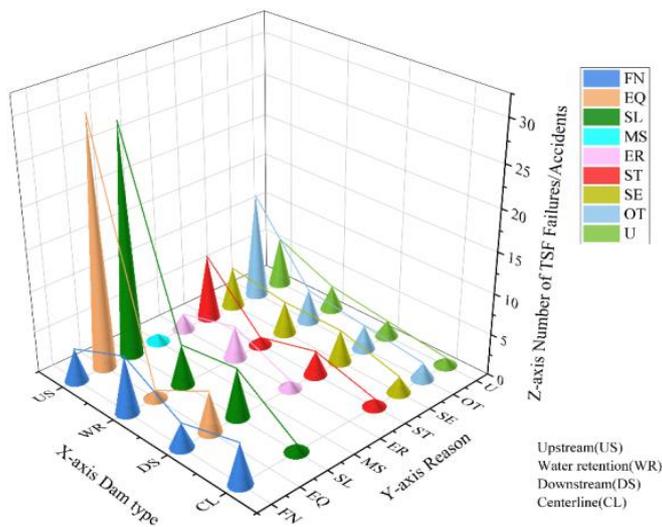
Nota. Shui-Quan Lin y Guang-Jin Wang (2022)

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

En la Figura 18, representa las relaciones entre los métodos de construcción de presa de relaves (X), las causas de la falla de la presa de relaves(Y) y el número de fallas de la presa de relaves (Z). Los métodos de recrecimiento de presa de relaves generalmente se dividen en los siguientes tipos: aguas arriba (US), retención de agua (WR), aguas abajo (DS) y línea central (CL). Se puede observar que el método de recrecimiento US es el más común, mientras que el método CL es el menos utilizado. Entre las presas de relaves que utilizan el método US, 30 fallaron debido a EQ y 28 debido a SI. Tanto EQ como SI causan muchas más fallas en presa de relaves que aplican el método de US que otros factores. Vale la pena señalar que EQ (cono amarillo) y SI (cono verde oscuro) también representan una proporción mucho mayor de fallas totales de presas que otros factores (FN, MS, ER, ST, SE, OT); MS (cono cian) causa la menor cantidad de fallas. (p. 7)

Figura 18

Diagrama tridimensional de la relación entre el método de construcción de la presa y las causas de falla de la presa.



Nota. Shui-Quan Lin y Guang-Jin Wang (2022)

Análisis de fallas en presas de presa de relaves

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

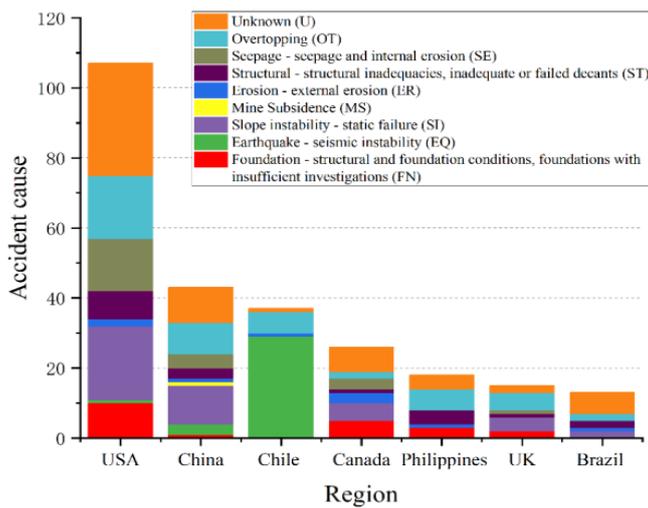
La Figura 19, muestra la distribución global de las fallas en las presas de relaves. En Estados Unidos (n=107) se tuvo el mayor número de accidentes por fallas en las presas de relaves, seguido por China (n=43). Figura 21 muestra las causas de las fallas de las presas en siete regiones clave; se puede ver que el número de fallas de presas con causas desconocidas (bloque amarillo, n=62) es alta, lo que indica

por EQ y OT, lo que representa 24 y 13 casos, respectivamente. Además, las balsas de relaves de cobre (n=38) se aplican principalmente con el método de represas de EE. UU. Se indica que la mayoría de las fallas de estanques de relaves de EE. UU. fueron provocadas por EQ (de acuerdo con los resultados en la Figura 19). Veinte fallas de presas en estanques de relaves de minas de cobre chilenas fueron causadas por terremotos. El número de estanques de relaves de oro que utilizaron el método estadounidense también fue el más alto (n=13) y ST (n=9) y AT (n=11) fueron las dos causas más comunes de fallas.

Cinco (45,5%) fallas en estanques de relaves de oro en Filipinas se atribuyeron a OT. Para las fallas de las balsas de relaves de la mina de 23 Pb, las principales causas fueron SI (n=6) y AT (n=8). En falla de presas. (p. 8)

Figura 20

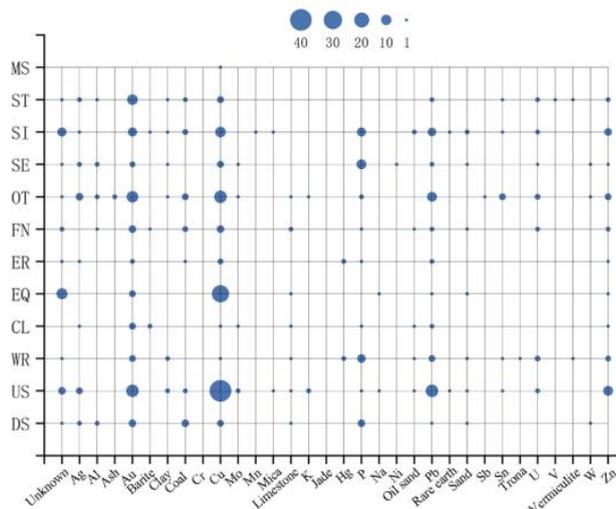
Causas en regiones con alta frecuencia de fallas en presas de relaves.



Nota. Shui-Quan Lin y Guang-Jin Wang (2022)

Figura 21

Causas de las fallas de las balsas de relaves en diferentes minas.



Nota. Shui-Quan Lin y Guang-Jin Wang (2022)

La altura de una presa de relaves es otro factor importante que afecta seguridad. La base de datos de fallas de la presa de relaves contiene información, incluida la altura de la presa, de 159 eventos de falla.

Aproximadamente el 89,9% (n=143) de estos eventos ocurrieron con alturas de presa entre 0 y 50 m; sólo el 8,8% (n=14) ocurrió con alturas de presa entre 50 y 100 m, y 1.3% (n=2) fueron con alturas de presa mayores a 100 m. Sin embargo, aumentar la altura de las presas de relaves no previene las fallas de las presas.

Hay una correlación moderada ($r^2= 0,54$) entre la altura de la presa de relaves y el tamaño de la mina (en términos de producción). Alturas de presas de relaves entre 0 y 100 m corresponden a una producción promedio de alrededor de 104 millones de toneladas, mientras que alturas mayores a 100 m corresponden a una producción promedio de alrededor de 643 millones de toneladas. (Islam, K.; Murakami, S. Global-scale impact analysis of mine tailings dam failures: 1915–2020. Glob. Environ. Chang. 2021, 70, 102361).

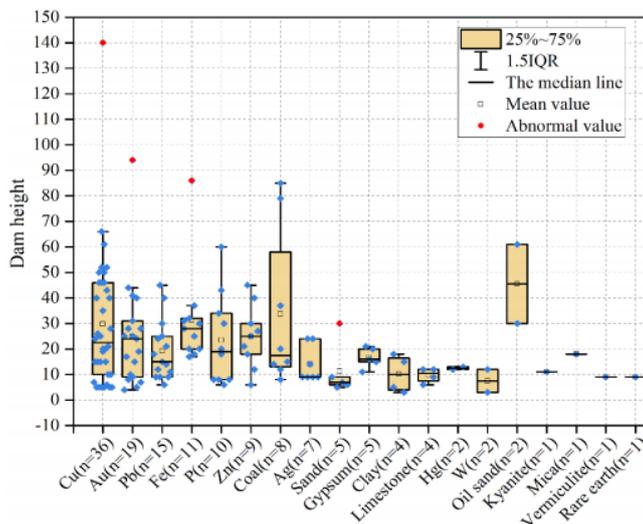
Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

La línea de la caja en la Figura 22 muestra la distribución de las alturas de las presas de relaves en diferentes minas. Los puntos azules representan la altura de la presa de relaves y los cuadrados huecos dentro de los bloques amarillos representan la altura promedio de la presa. Descubrimos que la posibilidad de falla de la presa es mayor en el cobre (n= 36), oro (n=19) y plomo (n=15) minas. Las alturas de las presas en casos de fallas de presas de relaves de cobre fueron de 5 a 140 m, con un promedio de 29,8 m y una mediana de 22,5 m. Las alturas de las presas en casos de fallas de presas de relaves de oro fueron de 5 a 94 m, con un

promedio de 24,9 m y una mediana de 24 m. Las alturas de las presas en los casos de fallas en las balsas de relaves de minas de plomo oscilaron entre 5 y 45 m, con un promedio de 19,2 m y una mediana de 15 m. Tanto la altura promedio como la altura mediana de las fallas de los estanques de relaves de las minas de plomo fueron más bajas que las fallas de los estanques de las minas de cobre y oro. La Figura 23 muestra la distribución del tiempo en relación con la altura de las fallas de las presas de relaves. La ecuación de regresión lineal ($y = (0.28 \pm 0.1) x - (528.74 \pm 200.94)$) indica que los relaves. (p. 10)

Figura 22

Distribuciones de altura de presas de fallas de presas de relaves para diferentes minas.



Nota. Shui-Quan Lin y Guang-Jin Wang (2022)

Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

La Figura 23 muestra la distribución de relaves liberados (porcentaje de almacenamiento) después de la ruptura de una presa de relaves. Los puntos negros representan la proporción de relaves liberados con respecto al volumen de almacenamiento después de que se rompe el estanque de relaves, y el cuadrado hueco representa la altura promedio de la presa de relaves. La proporción promedio de explosión de arena fue de 0,3455, lo que indica que después de la ruptura de la presa, los relaves liberados representaron el 34,6 % del volumen de almacenamiento. Los valores de la media y la mediana de la proporción de relaves liberados por FN fueron 0,561 y 0,463, respectivamente, es decir, mayores que los de la proporción de relaves liberados por otros factores. Figura 25 muestra la relación entre la proporción de relaves liberados después de la falla de una presa de relaves y la gravedad del accidente. Los valores de la media y la mediana de la

proporción de relaves liberados después de fallas muy graves fueron 0,419 y 0,447, respectivamente, es decir, mayores que aquellos después de fallas graves y otras fallas. (p. 11)

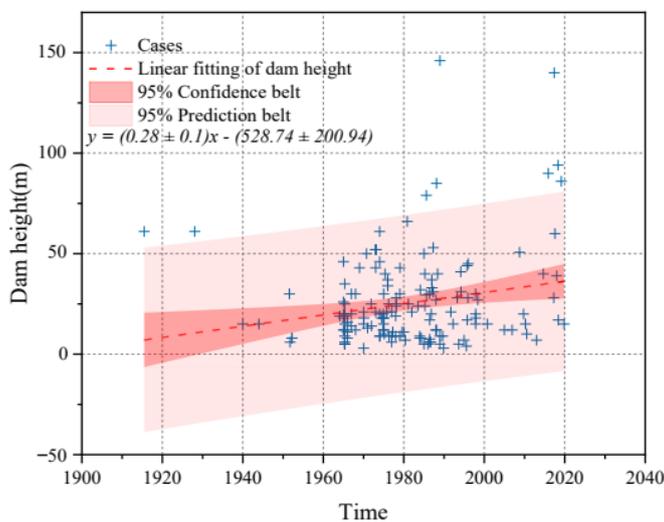
Para Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag (2022):

La Figura 26 muestra la relación entre el volumen de almacenamiento de la balsa de estériles y el volumen de liberación de estériles tras la rotura de una presa.

El eje x del punto azul de la Figura 26a representa el volumen de almacenamiento de residuos y el eje y representa el volumen de liberación de residuos tras la rotura de la presa. Estos datos se transforman logarítmicamente en la Figura 26b. La ecuación de regresión lineal de la Figura 26b muestra una correlación positiva entre el volumen de liberación de relaves y el volumen de almacenamiento de residuos después de la rotura de la presa. $y = (0,79 \pm 0,54) + (0,75 \pm 0,08) x$, donde y es Log (Volumen de liberación) (Mm3), y x es Log (Volumen de almacenamiento) (Mm3). En general, a medida que aumenta el volumen de almacenamiento, también lo hace la liberación de arena de relaves. (p. 11)

Figura 23

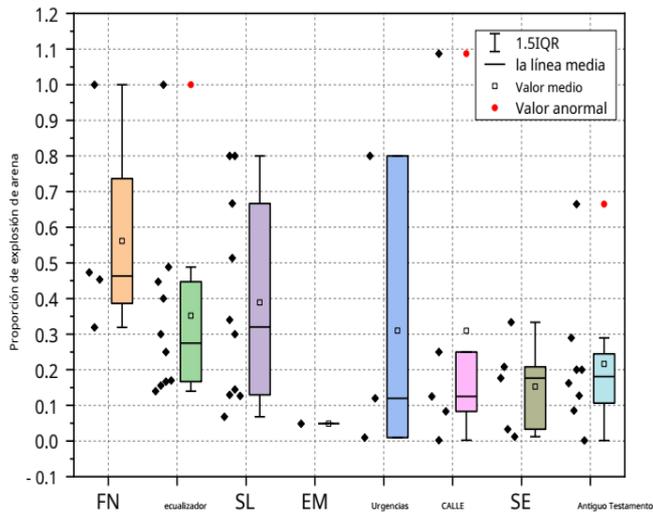
Análisis de regresión lineal de la altura de la presa



Nota. Shui-Quan Lin y Guang-Jin Wang (2022)

Figura 24

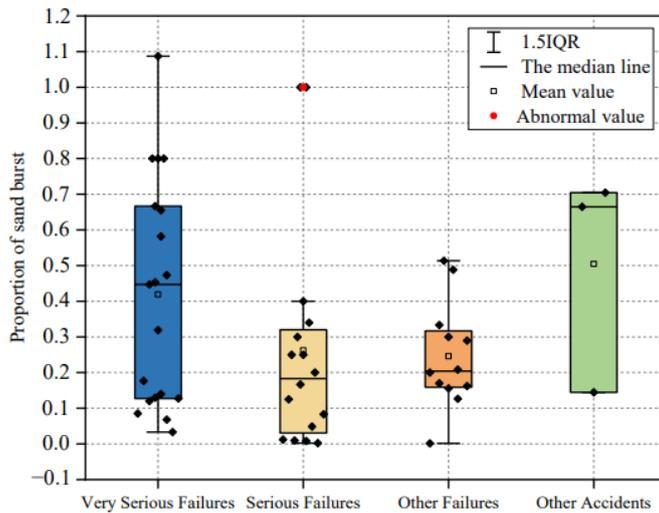
Relación entre la proporción de relaves liberados y el método de construcción de la presa después de la falla de la misma.



Nota. Shui-Quan Lin y Guang-Jin Wang (2022)

Figura 25

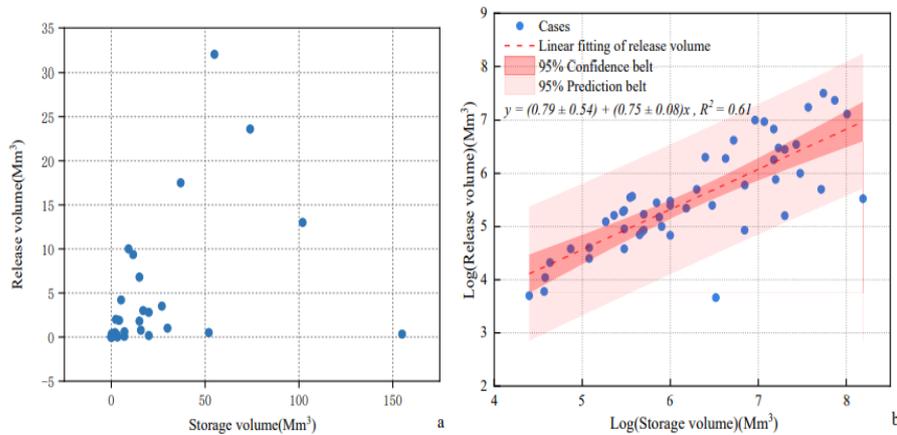
Relación entre la proporción de estériles y el nivel de peligro tras la rotura de la presa



Nota. Shui-Quan Lin y Guang-Jin Wang (2022)

Figura 26

Relación entre el volumen de almacenamiento de estériles y el volumen de liberación



Nota. Shui-Quan Lin y Guang-Jin Wang (2022)

a. Antes de la transformación logarítmica

b. Después de la transformación logarítmica

2.3.1.6 Análisis de estabilidad física

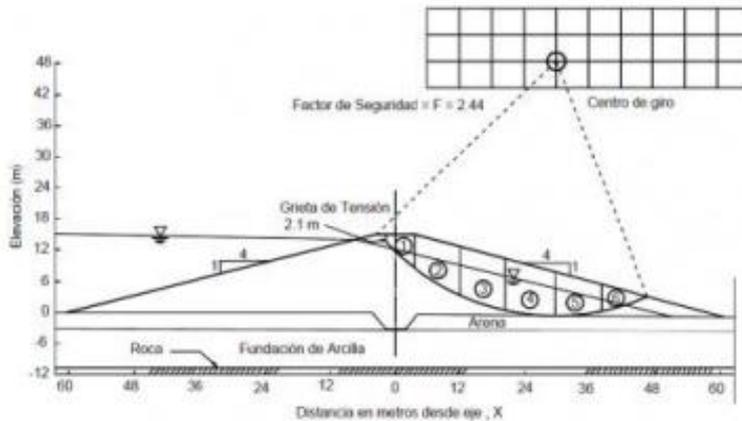
Según (Ventura, P., 2022), los objetivos principales del análisis de estabilidad física de taludes son los siguientes:

- Determinar las condiciones de estabilidad del talud (si es estable o inestable, así como el margen de estabilidad).
- Estudiar los posibles mecanismos de fallo (estudiar cómo se produce el fallo).
- Determinar la sensibilidad o susceptibilidad de los taludes a diversos mecanismos o variables desencadenantes (impacto de las precipitaciones, terremotos, etc.).
- Evaluar la eficacia de los distintos métodos de Remediación o estabilización sobre la estabilidad de los taludes.
- Diseñar los taludes óptimos en términos de seguridad, fiabilidad y economía.

En la Figura 27, se muestra el esquema de un análisis de estabilidad de taludes.

Figura 27

Esquema de un análisis de estabilidad de taludes.



Nota. U.S. Corps of Engineers (2023)

Aunque el porcentaje de ocurrencia es inferior a de algunas otras causas, como la licuefacción sísmica, los defectos estructurales y la mala gestión, las inestabilidades de los taludes son también una de las causas de los incidentes en las presas de residuos. También se observa que, en términos de estabilidad, uno de los factores críticos que afectan a las presas de relaves es la altura de la presa (Golestanifar y Bazzazi, 2010).

La estabilidad de la presa aguas abajo es independiente de las características geotécnicas y dinámicas de los estériles y lodos retenidos por la presa. La geometría de estas presas facilita la deposición hidráulica y la compactación de las arenas, además de reducir al mínimo la zona saturada en el cuerpo de la presa (Valenzuela, L., 2016).

Adicionalmente se determina si la tasa de evaluación de la presa es suficiente para generar presión excedente de poros, después que se ha terminado estos pasos, se puede efectuar el computo de estabilidad. Si no, se debe efectuar una nueva iteración de todos los puntos antes mencionados o quizá de todo el rediseño (guía de estabilidad, 1997).

El análisis de estabilidad de presas de relaves ofrece un marco eficiente para la incorporación sistemática y lógica de la incertidumbre en el diseño de presas. Se ha trabajado mucho para desarrollar metodologías de análisis de estabilidad de presas de relaves (Wang Xingang y Hongbin Zhan, 2018).

Por ejemplo, Lade y Yamamuro, 2011, p. 247-264, analizó el comportamiento de licuefacción estática de presas de sedimentos y luego propuso un método para analizar y evaluar la estabilidad de taludes de presas de sedimentos para predecir posibles áreas de licuefacción de taludes (Lade y Yamamuro, 2011, p. 247-264).

2.3.1.7 Análisis de estabilidad sísmica

Los estudios de análisis sísmico son analizados en base a un comportamiento de tipo dinámico de aquellos componentes que está compuesto el depósito de relaves. Este estudio facilita el cálculo de esfuerzos, deformaciones de la presa y la estabilidad de los taludes (Ventura, 2022).

El correcto control de la compacidad y la cantidad de finos en el relleno contribuye al funcionamiento de la presa. Del mismo modo, durante el diseño debe realizarse un estudio minucioso de dimensiones del dique de presa, el nivel de saturación, los cimientos, el tamaño de la presa del embalse y sismicidad local (Ventura, 2022).

Según James (2012), “Descubrieron que el refuerzo podía mejorar la estabilidad sísmica de las presas de relaves, lo que también podía ayudar a disipar las presiones del agua de poro después de la agitación”.

2.3.2 Fases en la vida del depósito de relaves

2.3.2.1 Definiciones

Según CDA (2019), se describe las fases de la vida útil de un depósito de relaves

- a) Selección del sitio y diseño
- b) Construcción
- c) Operación
- d) Transición
- e) Cierre – cuidado activo
- f) Cierre – cuidado pasivo

2.3.2.2 Selección del sitio y diseño

La selección del sitio y la elaboración del diseño se lleva a cabo antes de la construcción de un depósito de relaves. Una mala ubicación de este ha generado problemas de seguridad a medida que avanza el desarrollo de la mina, para esta ubicación se considera una minuciosa consideración. Para los criterios de diseño para el ciclo operativo de vida y también para el cierre también tiene una influencia significativa en la selección del sitio y diseño del depósito de relaves (CDA, 2019, p. 5).

2.3.2.3 Construcción

En esta etapa se inicia con una presa inicial al inicio de la operación y luego se recrece periódicamente dentro de la fase de operación, algunos depósitos de relaves pueden estar construidas antes de que la mina empiece su operación (CDA, 2019, p. 6).

2.3.2.4 Operación

Durante la fase de operación, el depósito de relaves podrá modificarse los criterios de diseño originales y la composición de los relaves según requisitos reglamentarios, también se podrá recrecer o construir un nuevo depósito de relaves con la finalidad de proporcionar capacidad de almacenamiento adicional. La fase de operación puede durar décadas, la duración de la operación puede variar al diseño inicial y la selección del sitio, ya que la vida de la mina puede verse afectada por la disponibilidad de recursos y factores económicos, sociales y ambientales que se generan a través del tiempo (CDA, 2019, p. 6).

2.3.2.5 Cierre

Según (CDA, 2019), “Cuando termine la operación incluida la transición del área minera y toda estructura estable a largo plazo se procede a dismantelar, recuperar o rehabilitar el cuidado posterior del sitio y el depósito de relaves”. (p. 6)

Según (CDA, 2019), “El término planificado de la disposición de relaves en el depósito de relaves es con el objetivo de lograr estabilidad física, química, ecológica y social a largo plazo con un uso sustentable y ambiental apropiado”. (p. 6)

2.3.2.6 Transición

Según CDA (2019):

La primera fase del cierre es la transición, en esta fase el depósito de relaves ha alcanzado su capacidad máxima y deja de operar o cuando la mina o la operación finaliza el procesamiento permanentemente. Durante este periodo se realiza actividad de preparación para las fases de cierre – cuidado activo o cierre – cuidado pasivo.

Durante la fase de transición podrá ser dismantelada mediante ruptura o remoción. Cuando no existe una opción practica para dismantelar el depósito este debe diseñarse y mantenerse como una estructura a largo plazo y posiblemente permanente. Los depósitos que contienen solidos contaminantes son más fáciles de romperse que las que contienen solidos contaminantes. (p. 8)

2.3.2.7 Cierre – Atención Activa

Según CDA (2019):

En esta fase implica el cuidado activo del depósito de relaves, incluido el monitoreo, la inspección, la gestión del agua, la operación de un sistema de tratamiento de agua, etc. Una vez completado la fase de transición.

En esta etapa se busca alcanzar una condición de estado estable esto podría incluir reducción de presiones de poro, las deformaciones son inexistentes y no presentan preocupación con respecto a la estabilidad del depósito. (p. 10)

2.3.2.8 Cierre – Cuidados Pasivos

Según CDA (2019):

En esta fase no hay operación activa en el depósito de relaves y no se espera que ocurran cambios en el depósito de relave, se considera que el depósito está en condición estable y se ha realizado un seguimiento suficiente para demostrar que no se requiere ninguna intervención adicional por parte del propietario. (p. 11)

2.3.3 Evaluación de riesgos de deslizamiento adaptado del manual Cenepred

2.3.3.1 Peligrosidad del recrecimiento del depósito de relaves

2.3.3.1.1 Concepto de peligro

Peligro es la probabilidad de producir catástrofes de tipo natural, nocivos en lugares determinados con una específica intensidad y con cierta duración de tiempo. Los materiales técnicos relacionados con el examen de sucesos naturales en otros países para referirse al peligro usan el término amenaza (Cenepred, 2014, p. 149).

2.3.3.1.2 Recopilación de datos

La recopilación de datos se basa en la obtención de información proporcionado por las instituciones y gobiernos tanto locales como regionales, los cuales constan de información precisa y actualizada, y se encargan de brindar servicios públicos y privados, puede darse de tres maneras, de naturaleza geográfica, de carácter urbanístico y de infraestructura básica y servicios esenciales (Cenepred, 2014, p. 29).

2.3.3.1.3 Identificación de probable área de influencia del fenómeno en estudio

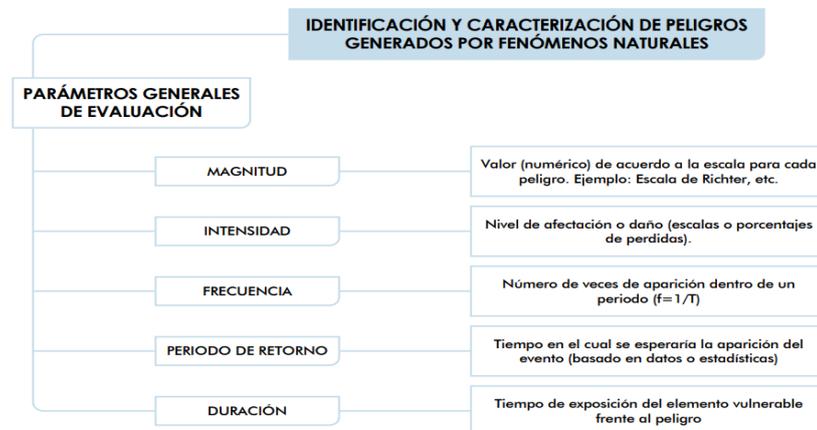
La identificación de áreas probables de influencia se realiza en base de información histórica de impactos producidos en dicha área, para esto se realiza una sistematización de la recopilación de datos geográfica, urbanística y de infraestructura básica (Cenepred, 2014, p.32).

2.3.3.1.4 Peligros generados por fenómenos de origen natural

Luego de identificar la probable área de influencia del fenómeno es importante evaluar y analizar los parámetros de dicho fenómeno como se muestra en la Figura 28. Los peligros generados por fenómenos naturales se pueden dividir en originados por geodinámica interna, externa, hidrometeorológicas y oceanográficas. (Cenepred, 2014, p. 33).

Figura 28

Gráfico identificación y caracterización de peligros generados por fenómenos naturales



Nota. Cenepred (2014)

2.3.3.1.5 Parámetros de evaluación

a) Información histórica de episodios

Los fenómenos naturales proporcionan una visión global el cual es presentado a cierta escala y además las entidades científicas evalúan y registran los datos históricos ocurridos en el territorio nacional, local y regional. Debe ser recopilada desde las direcciones, subdirecciones y gerencias de medio ambiente, en caso de que existan (Cenepred, 2014, p. 103).

b) Estudios previos de peligrosidad y riesgo

Los estudios previos contienen información sobre la región y localidad del área de estudio, análisis de impactos producidos, estos estudios sirven como punto de inicio para hallar los niveles de peligrosidad (Cenepred, 2014, p. 103).

2.3.3.1.6 Susceptibilidad

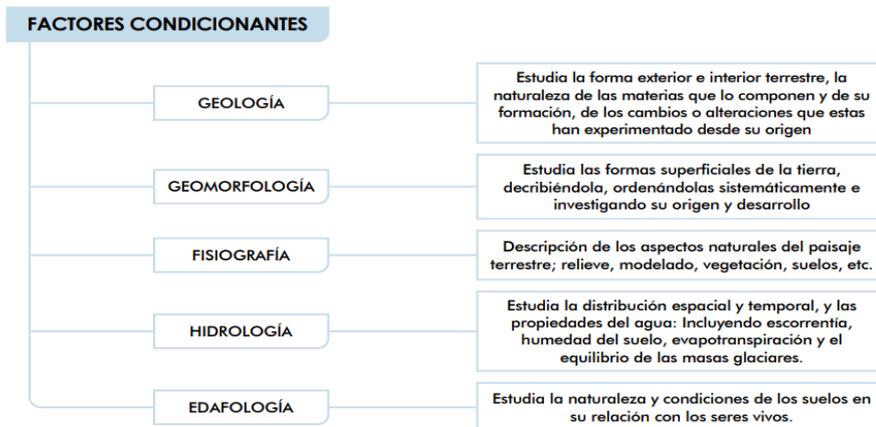
Se define como la mayor o menor probabilidad a que un suceso ocurra o se produzca en un área geográfica específica ya que depende de los factores condicionantes y desencadenantes del fenómeno y su respectivo ámbito geográfico (Cenepred, 2014, p. 106).

a) Factores condicionantes

Se trata de factores geográficamente específicos que influyen positiva o negativamente (ver Figura 29) en la ocurrencia de un fenómeno de tipo natural, que estará medido por una magnitud e intensidad (Cenepred, 2014, p. 106).

Figura 29

Factores condicionantes del peligro



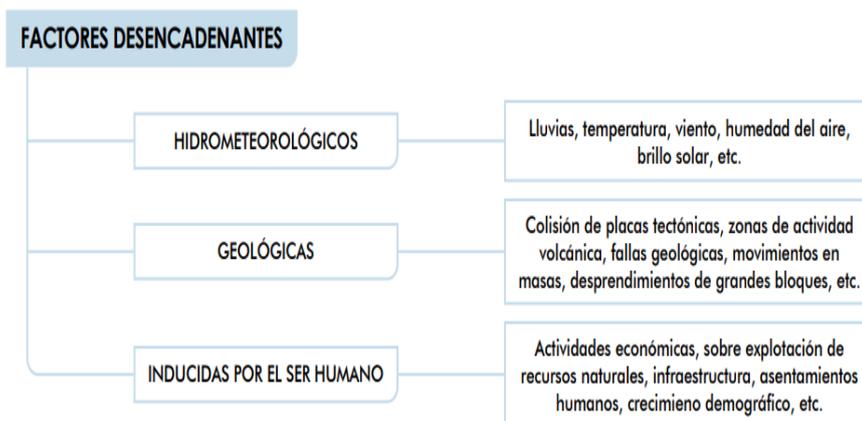
Nota. Cenepred (2014)

b) Factores desencadenantes

Son condiciones que desencadenan acciones y/o sucesos relacionados que pueden dar lugar a riesgos en una región determinada, como se muestra en la Figura 30. Por ejemplo, las lluvias torrenciales pueden provocar corrimientos de tierras de material suelto o erosionado, los terremotos localizados pueden provocar tsunamis, etc (Cenepred, 2014, p. 107).

Figura 30

Factores desencadenantes del peligro



Nota. Cenepred (2014)

2.3.3.1.7 Niveles de peligrosidad

Para fines de la Evaluación de Riesgos, las zonas de peligro pueden estratificarse en cuatro niveles: bajo, medio, alto y muy alto, cuyas características y su valor correspondiente se detallan a continuación según Tabla 2 (Cenepred, 2014, p 115).

Tabla 2

Niveles de peligrosidad

Nivel	Rango
Peligro Muy Alto	$0.260 \leq R < 0.503$
Peligro Alto	$0.134 \leq R < 0.260$
Peligro Medio	$0.068 \leq R < 0.134$
Peligro Bajo	$0.035 \leq R < 0.068$

Nota. Cenepred (2014)

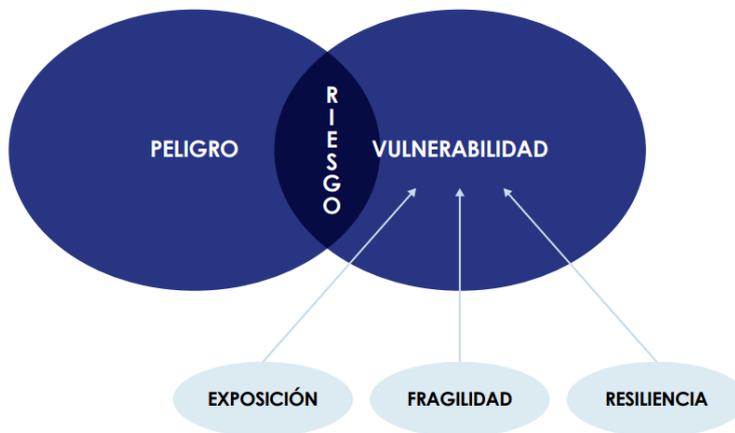
2.3.3.2 Vulnerabilidad del recrecimiento del depósito de relaves

La vulnerabilidad en términos de estructura física y socioeconómicas se define como la susceptibilidad de sufrir daños a la población por un peligro. Utilizando este enfoque, nos permite reducir el riesgo de tal forma que los elementos expuestos son menos vulnerables. (Cenepred, 2014, p. 147).

En la Figura 31, se muestra los factores de la vulnerabilidad.

Figura 31

Factores de la vulnerabilidad: exposición, fragilidad y resiliencia



Nota. Cenepred (2014)

2.3.3.2.1 Determinación de los niveles de vulnerabilidad

La vulnerabilidad según el CENEPRED puede dividirse en 4 niveles: bajo, medio, alto y muy alto, cuyos valores se muestran en la siguiente Tabla 3 (Cenepred, 2014, p. 140).

Tabla 3*Niveles de vulnerabilidad*

Nivel	Rango
Vulnerabilidad Muy alta	$0.260 \leq R < 0.503$
Vulnerabilidad Alta	$0.134 \leq R < 0.260$
Vulnerabilidad Media	$0.068 \leq R < 0.134$
Vulnerabilidad Baja	$0.035 \leq R < 0.068$

Nota. Cenepred (2014)**2.3.3.2.2 Estimación o cálculo del riesgo**

El riesgo es el resultado de relacionar el peligro con la vulnerabilidad de los elementos expuestos para determinar las posibles repercusiones y consecuencias económicas, sociales y ambientales de uno o varios fenómenos. Los cambios en uno o más de estos parámetros alteran el riesgo que comprenden el total de pérdidas y las consecuencias producidas en el lugar determinado. En la Tabla 4 se muestran los niveles del riesgo (Cenepred, 2014, p. 146).

Tabla 4*Niveles de riesgo*

Nivel	Rango
Riesgo Muy Alto	$0.068 \leq R < 0.253$
Riesgo Alto	$0.018 \leq R < 0.068$
Riesgo Medio	$0.005 \leq R < 0.018$
Riesgo Bajo	$0.001 \leq R < 0.005$

Nota. Cenepred (2014)**2.3.3.2.3 Proceso de análisis jerárquico**

Este método busca tratar problemas de criterio múltiple a través de un método jerárquico, permite combinar los aspectos subjetivos, intangibles y emotivos del comportamiento humano con los aspectos objetivos, concretos y racionales de la ciencia tradicional. De este modo, lo subjetivo puede tratarse de forma objetiva (Cenepred, 2014, p. 206).

En la Figura 32, se muestra la Escala de Saaty.

Figura 32

Escala de Saaty

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

Fuente: Saaty (1980)

Nota. Cenepred (2014)

2.3.3.2.4 Ponderación de los parámetros descriptores

Se identifican los parámetros que caracterizan el fenómeno, en función al número de parámetros tendremos el número de filas y columnas de la matriz de ponderación; seguido a ello se efectúa la comparación de pares para determinar la importancia relativa usando la escala de Saaty (Cenepred, 2014, p. 208).

A continuación, se presentan la Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36 y Figura 37, las cuales nos indican los pasos que nos permiten hallar la relación de consistencia.

Figura 33

Matriz de comparación de pares

PARAMETRO	Magnitud de sismo	Intensidad de sismo	Aceleración natural del suelo
Magnitud de sismo	1.00	1/3	5.00
Intensidad de sismo	3.00	1.00	7.00
Aceleración natural del suelo	1/5	1/7	1.00

La aceleración natural del suelo es 7 veces menos importante que la intensidad (mucho menos importante)

La intensidad es 7 veces más importante que la aceleración natural del suelo (mucho más importante)

Nota. Cenepred (2014)

Se multiplica cada elemento de su columna con la inversa de las sumas totales.

Figura 34

Matriz de normalización

PARAMETRO	Magnitud de sismo	Intensidad de sismo	Aceleración natural del suelo
Magnitud de sismo	1.00	0.33	5.00
Intensidad de sismo	3.00	1.00	7.00
Aceleración natural del suelo	0.20	0.14	1.00
suma	4.200	1.476	13.000
1/suma	0.238	0.677	0.077

$$0.238 \times 1.00 = 0.238$$

MATRIZ DE NORMALIZACIÓN

PARAMETRO	Magnitud de sismo	Intensidad de sismo	Aceleración natural del suelo
Magnitud de sismo	0.238	0.226	0.385
Intensidad de sismo	0.714	0.677	0.538
Aceleración natural del suelo	0.048	0.097	0.077

Nota. Cenepred (2014)

El vector ponderación es el promedio de cada fila, el cual la suma de la columna es igual a la unidad.

Figura 35

Vector priorización

PARAMETRO	Magnitud de sismo	Intensidad de sismo	Aceleración natural del suelo	VECTOR PRIORIZACIÓN (PONDERACIÓN)
Magnitud de sismo	0.238	0.226	0.385	0.283
Intensidad de sismo	0.714	0.677	0.538	0.643
Aceleración natural del suelo	0.048	0.097	0.077	0.074
	1.000	1.000	1.000	1.000

$$(0.238 + 0.226 + 0.385) / 3 = 0.283$$

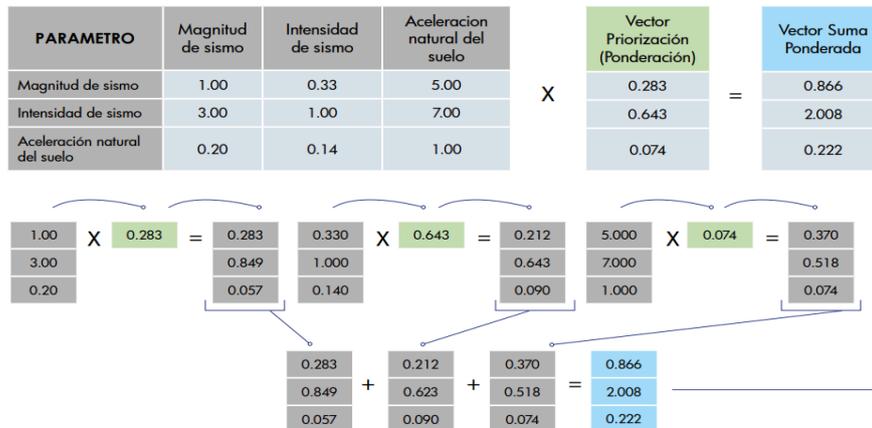
Nota. Cenepred (2014)

Cálculo Relación de Consistencia (RC)

Los criterios para la comparación de pares se verifican a través de un coeficiente, el cual debe ser menor al 10%.

Figura 36

Vector suma ponderada

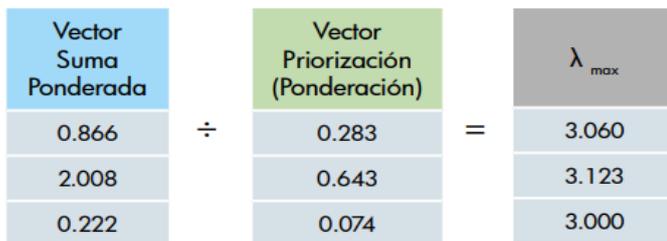


Nota. Cenepred (2014)

De la división del vector suma ponderada y el vector de priorización se obtiene el λ máx.

Figura 37

Cálculo λ máx



$$\lambda_{\max} = \frac{3.060 + 3.123 + 3.000}{3} = 3.061$$

Nota. Cenepred (2014)

Luego hallamos el índice de consistencia (IC)

$$IC = \frac{3.061 - 3}{3 - 1} = 0.0305$$

Finalmente se halla la Relación de Consistencia (RC)

$$RC = \frac{IC}{IA} = \frac{0.0305}{0.525} = 0.058$$

2.3.3.3 Riesgo del recrecimiento del depósito de relaves

2.3.3.3.1. Evaluación y gestión del riesgo en presas de relaves

Chen et al. (2021) señaló que la evaluación del riesgo, el monitoreo y la alerta temprana de las presas de relaves son necesarios para la prevención y mitigación de las presas de relaves a través de un estudio de caso del desastre de la presa de relaves de Brumadinho. La evaluación y administración de riesgos son componentes críticos de una buena administración de presas de relaves y están integradas en todos los elementos del marco de administración de relaves y a lo largo de su ciclo de vida útil. Los peligros físicos y químicos, así como los riesgos operativos, organizativos, financieros y de gestión, deben evaluarse como preocupaciones potenciales de las represas de relaves. Las represas de relaves deben ser conceptualizadas, diseñadas, construidas, operadas y cerradas de tal manera que los peligros se aborden adecuadamente para cumplir con el objetivo de daño mínimo. Los riesgos deben evaluarse continuamente a lo largo del ciclo de vida útil, teniendo en cuenta cualquier cambio significativo en la presa de relaves, como la prolongación de la vida útil de la mina o la interrupción temporal de las actividades. Las medidas de gestión de riesgos deben actualizarse cuando evolucione el perfil de riesgo de la presa de relaves (MCA, 2019)

En general, la gestión de riesgos implica identificar, evaluar y gestionar los riesgos. El método de gestión de riesgos en la gestión de relaves permite la revisión y mejora continua de las medidas de gestión de riesgos a lo largo del ciclo de vida de una presa de relaves. Como resultado, la gestión de riesgos debe ser adaptable e iterativa, así como sensible al cambio. Además, para evaluar, recomendar y aceptar los riesgos económicos, sociales, medioambientales, administrativos y técnicos relacionados con la gestión de relaves, se requiere un nivel adecuado de competencia profesional para la toma de decisiones. La implementación de un enfoque basado en los riesgos requiere que el Propietario de una presa de relaves, en primer lugar, defina el perfil de riesgo de su presa, teniendo en cuenta el entorno operativo interno y externo, así como los factores cuantitativos y cualitativos. Una vez establecido este contexto, se puede realizar la evaluación de riesgos de la presa de relaves (MCA, 2019).

2.3.3.3.2 Identificación de riesgos

Según (Leading Practice Sustainable Development Program for the Mining Industry, 2016) el objetivo del proceso de identificación de riesgos es comprender todos los eventos de riesgo clave que son relevantes para un proyecto, actividad u otro contexto situacional; definir sus relaciones de causa y efecto; identificar la naturaleza y el alcance de todas las

posibles consecuencias (por ejemplo, financieras, ambientales, sociales, económicas, de seguridad); y comprender la probabilidad de que ocurran. Toda la información obtenida durante la identificación del riesgo se utiliza en el posterior análisis y evaluación del riesgo.

Las empresas mineras deben identificar los riesgos y peligros que existen en cada uno de sus procesos y operaciones críticos para evitar accidentes en la mina. Para completar esta labor, la empresa minera debe disponer de información actualizada sobre todo el emplazamiento de la mina, incluidos planos actualizados, dotación, y diagramas de flujo, entre otros (Sernageomin, 2014).

En la Figura 38, se muestra el resumen de riesgos asociados a los depósitos.

Figura 38

Resumen riesgos asociados a depósitos de relaves

	Tipo de riesgo	Efectos primarios	Observaciones
A	Riesgo sísmico	Derrumbe de taludes y remoción en masa.	Se puede producir contaminación de cursos de agua, de zonas agrícolas y víctimas humanas debido a la destrucción o daño de infraestructura.
B	Riesgo hidrológico	Arrastre de desechos y residuos. Drenaje ácido de mina.	Como flujo aluvional puede dañar o cortar fuentes, bocatomas y caudales, provocando la contaminación de cursos de agua superficial y subterránea, además de afectar flora y fauna.
C	Riesgo por generación de polvo	Levantamiento de polvo. Nubes de polvo.	Daños al ser humano y a la fotosíntesis de las plantas.
D	Riesgo por fallas en el sistema de disposición	Fallas en los sistemas de transporte y fallas en los tranques.	Derrames que pueden contaminar cursos de agua y suelo, con el consiguiente efecto al ser humano y al medio ambiente.
E	Riesgo por aumento excesivo del muro	Deslizamientos y flujos. Colapso del muro.	Contaminación de cursos de agua y suelos.

Fuente: Mod. de GUEVARA (1999).

Nota. Calabran, R. (2009)

2.3.3.3 Evaluación de riesgos

Es el proceso que determina si los riesgos existentes los cuales son gestionables y medibles, para así obtener medidas de control. Los resultados de las fases de análisis y evaluación de riesgos se utilizan como insumos en la fase de evaluación de riesgos. La evaluación de riesgos implica tomar decisiones arriesgadas, y todas las partes deben saber que pueden producirse repercusiones negativas, y los propietarios deben afrontar eficazmente las consecuencias del evento de fallo. (Paullo, Victor; Segovia Ortega, 2020). Según (UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, 2014) antes de autorizar la construcción de un depósito de relaves, debe realizarse una evaluación de riesgos. Existen diferentes formas de realizar una evaluación de riesgos. En mayor o menor medida todos incluyen los cinco pasos que se describen a continuación. Estos

pasos o etapas deben ser realizadas por la compañía encargada y los resultados deberán ser evaluados por las autoridades competentes. Este proceso también implica un sexto paso, que es una evaluación de la aceptabilidad de los riesgos.

Etapas 1: Identificación del peligro

El solicitante debe evaluar los posibles peligros, tales como:

- a) La toxicidad y ecotoxicidad del material de los relaves.
- b) Peligros para el medio acuático derivados de efectos distintos de los efectos tóxicos del material de relaves (por ejemplo, pH, demanda química de oxígeno, salinidad, material disperso).
- c) Peligros de inundación debidos al líquido libre en la presa de estériles.
- d) Peligros debidos a las propiedades físicas/mecánicas y al comportamiento del material sólido almacenado (transporte de lodos y/o fenómenos de licuefacción) en caso de accidente.
- e) Peligros derivados de la contaminación del suelo por los relaves/lodos.

Los peligros identificados decidirán el nivel de ambición necesario en la evaluación posterior.

Etapas 2: Supuestos de accidente

Se debe describir escenarios de posibles modos de fallo e identificar todas las causas potenciales. Los escenarios deben tener en cuenta:

- a) El impacto de posibles fenómenos naturales en la ubicación de la presa de relaves (p. ej., lluvias excesivas, nevadas o deshielo, terremotos, corrimientos de tierras, avalanchas).
- b) Fallos de estructuras ya construidas (por ejemplo, otras presas) situadas aguas arriba, cuyo fallo podría causar efectos dominó.
- c) Causas relacionadas con el diseño, la gestión y el control de la presa de relaves, incluido el error humano.

Así también, debe tenerse en cuenta los registros de accidentes y causa de accidentes ocurridos en presas de relaves similares. No debe excluirse ningún escenario posible.

Etapas 3: Identificación de los receptores potenciales

En esta etapa se debe identificar quién y qué puede verse afectado suponiendo posibles escenarios (fallos). Los aspectos a considerar se refieren al medio ambiente (agua, suelo y biota), la salud humana y las condiciones de vida, las pérdidas económicas (daños a infraestructuras o propiedades). Debe prestarse especial atención a los escenarios que pueden causar daños en un contexto transfronterizo.

Etapas 4: Medidas de seguridad

Debe describirse las medidas de seguridad destinadas principalmente a la prevención de escenarios potenciales (causas de fallos) vistas en la etapa de identificación de riesgos. En segundo lugar, deben describirse las medidas destinadas a limitar las consecuencias o impacto en caso de producirse un fallo. Estas últimas incluirán medidas de preparación (sistemas de aviso, alerta y alarma) y planes de respuesta a emergencias. Se recomienda la cooperación entre los operadores de la presa de relaves, las autoridades competentes y las autoridades locales (la comunidad) para la planificación de emergencias.

Etapa 5: Evaluación de impacto

En este punto se evaluará el impacto/efectos de los posibles escenarios sobre los receptores potenciales, identificados en la etapa 3. Al hacerlo, deben tenerse en cuenta las medidas de seguridad propuestas en la etapa 4 y evaluar cómo limitan el impacto o efecto potencial.

Etapa 6: Evaluación de riesgos

Por último, también se debe evaluar la probabilidad de los principales escenarios (fallos potenciales) descritos en la etapa 2, teniendo en cuenta las medidas de seguridad propuestas y su fiabilidad. Para ello, deberán tenerse en cuenta los datos genéricos o específicos del emplazamiento y, si no se dispone de tales datos expertos. En algunos casos será posible cuantificar la probabilidad del escenario, por ejemplo, los periodos de retorno de las inundaciones; en otros casos, sólo será posible hablar de probabilidades bajas y altas en términos generales. Los riesgos resultantes son una combinación de la probabilidad de que un determinado escenario y el impacto potencial en caso de que se produzca. Los distintos escenarios (modos de fallo) estudiados pueden presentarse en una matriz con la probabilidad en un eje y el impacto en el otro.

En este paso, el solicitante también debe juzgar si los riesgos relacionados a los distintos escenarios deben considerarse aceptables. Dicha aceptabilidad Esta evaluación de la aceptabilidad distinguirá entre riesgos potencialmente baja probabilidad y bajo impacto a alta probabilidad y alto impacto. Es útil hacer una división en tres clases de riesgo: verde - aceptable; amarillo - condicionalmente aceptable; y rojo: inaceptable.

Si todos los riesgos asociados a las presas de relaves previsto se consideran aceptables (es decir, entran en la clase de riesgo verde) el solicitante puede seguir adelante con su solicitud, incluyendo o no las medidas de seguridad propuestas en el paso 4. En otros casos, deberán evaluarse criterios de diseño y funcionamiento más estrictos, un control más frecuente y/o otras medidas de reducción del riesgo, según proceda. pertinentes. Si

no existen medidas económicamente viables o técnicamente disponibles para reducir el riesgo a un nivel aceptable, deberá plantearse una objeción a la construcción del TMF. En tales circunstancias, una ubicación alternativa para del TMF puede ser una solución viable. (UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, 2014)

La decisión final sobre la aceptabilidad de los riesgos formará parte del procedimiento de concesión de licencias, y en ella deberán participar las autoridades competentes y otras partes interesadas (por ejemplo, representantes de la comunidad, el público, etc.). (UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE, 2014)

2.3.3.3.4 Manejo de los riesgos

Según la Guía de Seguridad Minera, (2020), las mineras elaboran planes de manejo de riesgo, el cual proporciona la siguiente información:

a) Justificación de la opción de tratamiento elegida, incluidos los beneficios previstos.

La empresa minera debe elegir las soluciones de tratamiento más eficaces tras evaluar los beneficios, los costes y los inconvenientes que puedan surgir como consecuencia de la aplicación y sus vulnerabilidades.

b) Encargado de la aplicación y aprobación.

El plan de contingencia debe especificar la secuencia de tareas de los empleados implicados, identificando explícitamente sus funciones, así como las medidas a tomar durante y después de un incidente desfavorable.

c) Recursos necesarios.

Considera mantener en la organización los recursos humanos, materiales y financieros necesarios para reaccionar eficazmente en la prevención, control, respuesta y remediación de una emergencia.

d) Informe de actuación, seguimiento con plazos para el cumplimiento de las acciones.

En el proceso de gestión de riesgos, la empresa minera debe adoptar informes de rendimiento y seguimiento, así como herramientas de gestión que proporcionen una referencia o información cuantitativa a partir de la cual se pueda realizar una comparación entre los objetivos previstos y el rendimiento alcanzado en los plazos previstos.

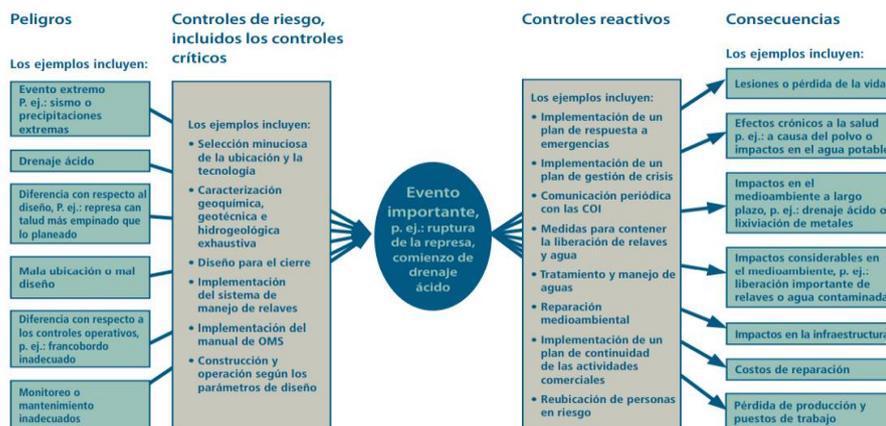
e) Limitaciones. La empresa minera o productora debe definir los recursos disponibles para la contingencia a fin de controlar las actividades y así prevenir y evitar eventos adversos no planificados, teniendo en cuenta que el factor limitante es la dotación de personal existente para garantizar la continuidad operativa, y sin dejar de lado el control de los riesgos inherentes que puedan ocurrir durante el período de paralización de la producción o desaceleración de las operaciones.

f) Medidas de control para la prevención En general, el plan de acción de gestión de riesgos recomendado debe incluir las actividades que se examinarán, adoptarán y llevarán a cabo en el plan de contingencia. Para reducir con éxito los riesgos durante el período de parada o ralentización de la producción, este plan de acción debe diseñarse minuciosamente y presentarse a todas las partes interesadas de conformidad con el artículo 31 del Reglamento de Seguridad Minera.

En la Figura 39, se presenta el análisis bow-tie típico.

Figura 39

Análisis bow-tie típico



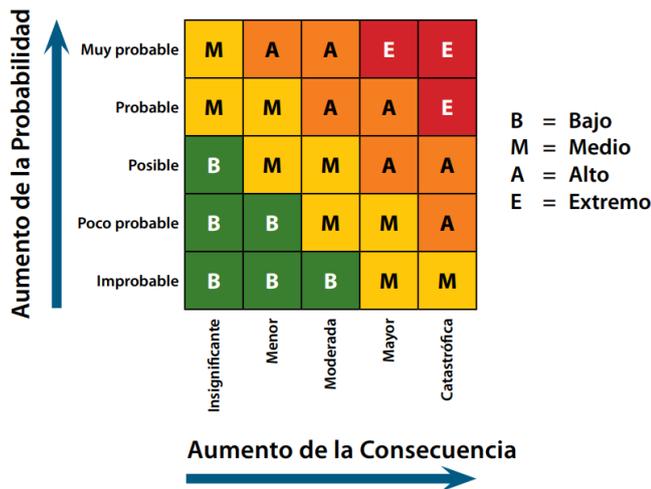
Nota. MCA (2019)

Típica matriz de evaluación de riesgos cualitativa

Los indicadores del nivel de probabilidad, consecuencia y riesgo global (p. ej.: riesgo posible, importante, alto, etc.) son solo a modo de ejemplo, y se pueden usar varios indicadores más siempre y cuando estén definidos, se entiendan y se usen de manera coherente, como se muestra en la Figura 40 (MCA, 2019).

Figura 40

Matriz típica de evaluación de riesgos cualitativa



Nota. MCA (2019)

Circunstancias excepcionales

La posibilidad y las consecuencias de tales sucesos sirven de base lógica para la evaluación del riesgo en circunstancias inusuales.

lógicamente sobre la posibilidad y las consecuencias de tales sucesos.

1. Inundaciones

Los aliviaderos insuficientes han sido los culpables de la mayoría de las inundaciones. aliviaderos insuficientes. Si la evaluación de riesgos para este elemento se concentra en el problema real -qué presas están más en peligro y cuál es la probabilidad real de fallo, correlacionada con un caudal de fallo inminente, en lugar de superar un nivel de aguas altas reglamentario- es relativamente simple, fácil y eficaz.

(Inundación planificada). La estimación de un rango de probabilidad de fallo y la identificación de las presas con mayor riesgo puede hacerse comparando el caudal próximo al fallo con el caudal de 10.000 años.

En caso de inundación, los sistemas de preparación para emergencias y alerta temprana pueden ser de gran utilidad. Pueden ser especialmente útiles en situaciones de inundación. Las predicciones meteorológicas que avisan con antelación de la posibilidad de lluvias intensas aumentan su eficacia.

2. Terremotos

En los lugares sísmicamente activos, no debe despreciarse el peligro de terremotos. Lugares donde se producen terremotos. Sólo un pequeño número de presas de más de 15 m de altura se han visto dañadas por terremotos, pero cientos de presas más pequeñas se han derrumbado por completo en cuestión de minutos. incluso a pesar de la típica

probabilidad anual, la probabilidad anual de fallo de todas las presas suele ser inferior a 10^{-6} , podría producirse más pronto que tarde.

En otros casos, puede ser de entre 10^{-3} para algunas presas situadas en zonas sísmicas.

Los efectos de los terremotos pueden incluir:

- Fallos repentinos, por ejemplo, debidos a la licuefacción de materiales finos y no cohesivos, fallos estructurales de contrafuertes.
- Fallos de agrietamiento retardado, que pueden seguir extendiéndose horas o días después, sobre todo en el caso de presas o días después, sobre todo en el caso de depósitos de mampostería o de relleno sin filtros ni drenaje.

Análisis de riesgo en depósitos de relaves

Para evaluar el riesgo de las personas, los bienes o el medio ambiente se determina la peligrosidad y la vulnerabilidad. Para el análisis de riesgo se dividió en las cuatro categorías siguientes:

- a) Peligros ocasionados por condiciones naturales
- b) Peligros operativos
- c) Peligros internos (envejecimiento, reacción álcali-agregado, erosión interna, fatiga del metal, etc.)
- d) Riesgos sociales (guerra, sabotaje, etc.)

Mitigación de riesgos

Como se indica en el marco metodológico de evaluación de riesgos de la CFM, siempre que los riesgos que surjan del análisis tengan un grado sustancial de estabilidad, deberá realizarse un tratamiento de riesgos para garantizar la estabilidad física y química de la instalación. En tales circunstancias, las empresas mineras deben examinar y perfeccionar los métodos de cierre previstos, así como su eficacia en la gestión de riesgos, añadiendo tal vez nuevas medidas a medida que progrese la tecnología existente.

Como la probabilidad de ocurrencia también está determinada por factores operacionales, los ajustes operacionales necesarios pueden ser realizados en conjunto para llevar el riesgo a un nivel aceptable para el estado final (Sernageomin, 2014). El contenido del plan de cierre considera capítulos particulares de obras, medidas o actividades de cierre presentadas por el titular del proyecto. Aunque las medidas de cierre son únicas para cada operación minera, existe una serie de mejores prácticas reconocidas y aceptadas por la industria. (Sernageomin, 2014).

2.3.4 Estudios de ingeniería básica

2.3.4.1 Ubicación geográfica

El proyecto está ubicado políticamente en el distrito de Canaria, provincia de Víctor Fajardo, departamento Ayacucho (ver Figura 41). Partiendo del distrito de Canaria, se accede a la zona a través de la carretera asfaltada Ruta Ayacucho-Sucre hasta llegar al centro poblado de Taca, desde el cual se dirigen por la trocha con dirección al sur oeste, hasta llegar a la zona operativa, llegando al depósito de relaves Ramahuayco.

Figura 41

Ubicación general del área de estudio



Nota. SRK Consulting (2020)

2.3.4.2 Geología regional

El área en estudio se encuentra en la región sur del territorio peruano, desde el punto de vista regional, el proyecto se emplaza en el flanco oriental de la unidad morfo-estructural reconocida como Cordillera Occidental.

Según el mapa geológico de la carta de Chincheros (INGEMMET, BOLETIN N°70) como se muestra en la Figura 42. En la zona del proyecto se han identificado tres unidades litológicas principales, Gpo Mitu, Gpo Pucara, Gpo Yura, y rocas intrusivas que corresponden a stocks clasificadas como Pórfido Cuarzo Monzonítico y diorita, y depósitos cuaternarios recientes; cuyas características se describen a continuación:

El Gpo Mitu (Según Palacios O., Klink B.A., et al.) está compuesta por areniscas de color rojizo, de grano fino a medio, con conglomerados rojo amarillento además con clastos de granito rosado a veces gneisoidal, calizas y cuarcitas, englobados dentro de una matriz

areniscosa de color gris rojizo; con una edad que va desde 270 M.a. a cerca de 210 M.a., lo que lo ubica en el Permiano (SRK Consulting, 2020).

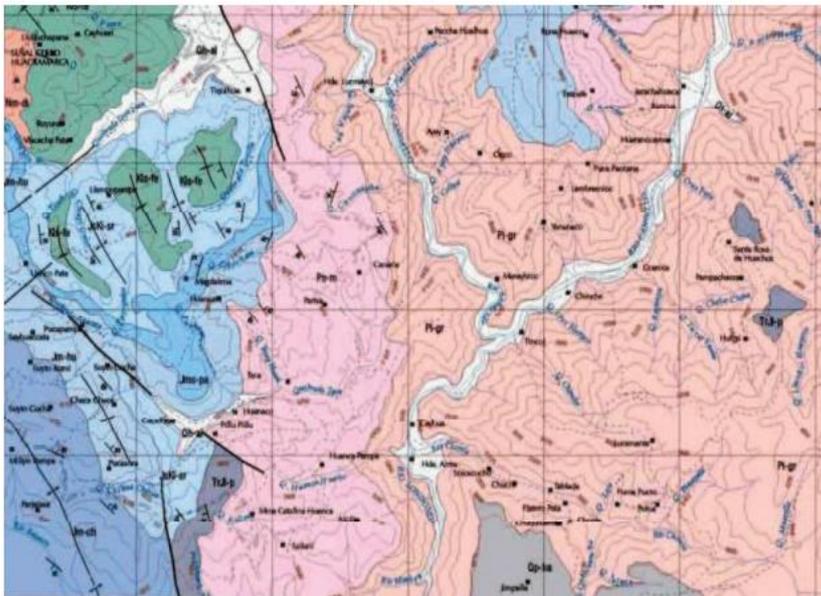
El Gpo Pucara (Según Me Laughlin, D. H. (1924)), está compuesta por una potente serie calcárea conformada por intercalaciones de calizas gris en bancos gruesos, proporciones subordinadas de areniscas, yeso y lutitas en capas delgadas; con una edad correspondiente a Triásico superior - Jurásico inferior, que subyace en discordancia al Gpo Mitu. (SRK Consulting, 2020).

Las rocas intrusivas que presenta, corresponden a stocks clasificadas como Pórfido Cuarzo Monzonítico, de color blanco amarillento a rosado pálido, según el nivel de meteorización, el cual en la zona de estudio esta instruyendo al conglomerado Mitu y Caliza Pucara; y diorita de color gris oscuro a verdoso con tonalidades amarillentas por meteorización, el cual se presenta como sill y diques dentro de la caliza Pucará.

En la zona de estudio todas las estructuras tienen una orientación norte-sur. Los estratos del grupo Pucara tienen un rumbo norte-sur y buzcan con 30 a 50° hacia el oeste. La Falla Amanda tiene una zona disturbada de más o menos 20 m de espesor, se caracteriza por la presencia de milonitas y rocas cizalladas y en parte de ella se ha emplazado parte de los cuerpos mineralizados.

Figura 42

Mapa geológico del cuadrángulo de Chincheros (INGEMMET, BOLETIN N°70).



Nota. SRK Consulting (2020)

2.3.4.3 Geología local

2.3.4.3.1 Geomorfología

La unidad Catalina Huanca se ubica en la unidad geomorfológica denominada "Valle Angosto", caracterizada por flancos de fuerte pendiente (35° a 60° en promedio) con perfil transversal en forma de V, labrados en rocas sedimentarias de las formaciones: Chunumayo (JM-ch), Huacaña (Jm-hu) y Paire (Jms-p) parcialmente cubiertas por depósitos cuaternarios de origen coluvial y fluvial/aluvial. (SRK Consulting, 2020).

La región de investigación se encuentra en la unidad geomorfológica Valle Angosto, la cual presenta laderas de pendientes pronunciadas que oscilan entre 35° y 60° en promedio, y hasta 85° en algunos puntos, con un perfil transversal en forma de "V" (ver Figura 43). (SRK Consulting, 2020).

Figura 43

Vista aguas arriba del Río Mishca, valle en forma de "V"



Nota. SRK Consulting (2020)

2.3.4.3.2 Litoestratigrafía

El proyecto está ubicado en un medio geológico conformado por los conglomerados del Gpo Mitu (PsT-m), calizas del Gpo Pucará (TrJi-pu), intrusivos de Pórfido monzodiorítico (Tms-qm) y Diorita Ccascabamba (Nm-ca/di), conglomerados Sacllani (Np-cgl), y depósitos cuaternarios (Qr). (SRK Consulting, 2020).

2.3.4.3.3 Geología estructural

El rasgo estructural más significativo en el área del proyecto es una estructura anticlinal con una orientación general NO-SE que afecta principalmente a rocas de la Formación Chunumayo (Jm-ch). (SRK Consulting, 2020).

El eje anticlinal se forma a lo largo de la margen izquierda de la quebrada de Rajaure y se extiende hacia el noroeste y sureste. (SRK Consulting, 2020).

2.3.4.3.4 Geodinámica externa

Cabe destacar que los principales procesos geodinámicos que se describen ocurren en el área de manera ocasional, según la estación climática, pudiendo verse inducidos por lluvias intensas y afectando principalmente las áreas debajo de la cota 2,700 msnm.

Las condiciones geológicas de la quebrada indican que tiene una susceptibilidad media a baja para la ocurrencia de fenómenos geodinámicos y que su nivel de peligrosidad puede considerarse como baja. (SRK Consulting, 2020).

2.3.4.4 Hidrología e Hidrogeología

“La zona de explotaciones mineras e industriales actuales y previstas se encuentra principalmente en los valles de los ríos Mishca y Qda. Sacllani, afluente del primero. Ambas cuencas forman parte del valle del río Sondando” (SRK Consulting, 2020).

“La Cuenca Rajaure abarca aproximadamente 25 km², extendiéndose desde su confluencia con la Cuenca Marcapata (3200 msnm) hasta el divortium acuarium, el cual está definido por las siguientes crestas: Toro Huisjana 4330 msnm, Utaraylla 4552 msnm, Talayera 4569 msnm, y Huacrachuco 4445 msnm” (SRK Consulting, 2020).

“El río Mishca nace en la confluencia de los ríos Rajaure y Marcapata (también conocido como Chuquiputa), es alimentado en su curso inferior por la quebrada Sacllani, afluente por su margen izquierda, y desemboca en el río Sondando, que se une al río Pampas unos 15 kilómetros aguas abajo en Tincoj” (SRK Consulting, 2020).

La cuenca del río Pampas se encuentra en plena sierra altoandina del departamento de Ayacucho, formando parte de la cuenca alta del río Apurímac en la vertiente atlántica.

La subcuenca de la quebrada Sacllani tiene una extensión de 7,83 ha desde su confluencia con el río Mishca hasta la divisoria de aguas formada por los cerros Accolla, S/N y Sayac, y es abastecida por la quebrada Caaypampa, que fluye hacia el sur desde una altura de 3.250 msnm. La quebrada Sacllani nace a unos 3.773 msnm y drena hacia el sureste. Tiene una longitud aproximada de 5,5 km y una pendiente promedio de 13° hasta su confluencia con el río Mishca. (SRK Consulting, 2020).

Las fuertes pendientes montañosas y los suelos de baja permeabilidad presentes en ambas márgenes del río Mishca, en general, favorecen la escorrentía más que la infiltración. Según GWI (2006), el régimen hidrológico en la zona de Catalina Huanca está dominado por la precipitación durante la estación húmeda, con poca escorrentía superficial o recarga de aguas subterráneas durante la estación seca, por lo que se estima que el caudal base

del río Mishca y de la quebrada Sacclani durante la estación seca proviene principalmente de filtraciones y manantiales. (SRK Consulting, 2020).

2.3.5 Acciones preventivas

Se refiere a las acciones que permiten disminuir la probabilidad de ocurrencia de eventos no deseados con el fin de minimizar los daños y las pérdidas que puedan materializarse. (ATG, 2021).

2.3.6 Plan de contingencia

El plan de contingencia es el conjunto de acciones que permiten brindar repuestas de manera inmediata y eficaz ante los posibles riesgos de diferente índole, con el objetivo de mitigar los impactos al medio ambiente, salud humana y/o materiales durante la operación del Depósito de Relaves. (Morrill y Chambers, 2022).

2.3.7 Planes de respuesta a emergencia

Los planes de respuesta ante emergencia deben ser elaborados en conjunto con las comunidades directamente afectadas, así como también los trabajadores de la empresa minera, productores agrícolas y empresas de servicios básicos en caso de una posible falla, en conjunto con las entidades gubernamentales, así como con los servicios de emergencia disponibles. En caso de una falla, la empresa tiene la responsabilidad de tomar acciones para salvaguardar la vida y brindar ayuda a los afectados. Así como también los recursos y el apoyo necesario a los gobiernos locales y nacionales y servicios de emergencia durante y después de una falla. (Morrill y Chambers, 2022).

2.4 Definición de términos básicos

- Balde

Corresponde al volumen físico disponible donde se depositan los lodos (finos) y una parte importante del agua de los relaves, lo que da lugar a la formación de la laguna de agua clara por sedimentación de finos. La cubeta es el componente más importante en relación con la vida útil del tanque.

- Muro o prisma perimetral o prisma resistente

Este muro delimita la cubeta y permite contener los residuos en su interior. Como resultado, el muro perimetral es generalmente el componente más importante en relación con la estabilidad o grado de seguridad de la presa.

- Altura del dique

Es distancia que existe del pie de talud del dique con la cresta de la misma esta tiene una relación de ancho y altura con el fin de mantener la estabilidad física (Gutiérrez Sepúlveda, 2017).

- Relave minero

Los relaves son los desechos resultantes de la extracción del metal seleccionado del mineral mediante trituración y molienda para obtener partículas del mineral y separar los minerales según sus características físicas o superficiales (Ramirez-Llodra et al., 2015).

- Presa o depósito de relaves

Este tipo de presa consiste en la construcción de un muro resistente hecho enteramente de material de préstamo, compactado e impermeabilizado el talud interior del muro y también parte o toda su corona; los relaves se depositan completos en la cubeta sin necesidad de clasificación, pero además debe haber un sistema para la evacuación del agua clara de la laguna que se forma. La diferencia fundamental entre un reservorio destinado a la acumulación de agua y uno destinado a los relaves es que mientras el reservorio de agua se construye de una vez con su capacidad final, el tranque de relaves se puede ejecutarse por etapas como la presa de relaves, para no anticipar las inversiones y minimizar su valor actual. (Cruz y Deudor, 2016).

- Recrecimiento del depósito

Proceso o resultado de incrementar, aumentar, ampliar o acrecentar una presa.

- Estimación de riesgos

Es el proceso en el cual se determinan la frecuencia o probabilidad de que se un evento y la severidad potencial de las consecuencias o daños que puedan originarse de la concretización de un peligro.

- Evaluación de riesgos

Proceso abocado a la estimación de la magnitud de aquellos riesgos que no hayan podido evitarse, esto proveerá al dueño del proceso información necesaria para decisiones adecuadas sobre la implantación de medidas preventivas.

- Riesgo ambiental por la actividad minera

La probabilidad o posibilidad de que un contaminante cause daño a la salud humana, a los organismos que componen los ecosistemas o a la calidad del suelo y del agua.

Actualmente, las presas de relaves están abandonados o inactivos que constituye un riesgo ambiental potencial y a largo plazo (Rodríguez, Estupiñán, Iglesias, y Castillo, 2007).

- Medidas preventivas

Las medidas preventivas son acciones y procedimientos diseñados que tienen por objeto reducir los riesgos, evitar accidentes y lesiones en las operaciones mineras. Debido al uso

de equipos pesados, explosivos, espacios restringidos, condiciones ambientales adversas y otros riesgos, el sector minero es conocido por ser peligroso. Por lo tanto, es esencial establecer medidas preventivas para garantizar la seguridad de los trabajadores y la preservación del medio ambiente.

2.5 Hipótesis

General

Al evaluar el riesgo de deslizamiento del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco se puede proponer medidas preventivas.

Específicos

- a) Al analizar el nivel de peligrosidad del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco, se puede proponer acciones preventivas.
- b) Al analizar el nivel de vulnerabilidad del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco se puede evaluar el plan de contingencia.
- c) Al analizar el nivel de riesgo del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco se puede evaluar el plan de respuesta ante emergencias.

2.6 Variables

Tabla 5

Operacionalización de variables

Operacionalización de variables			
VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	herramientas
V.I. Riesgo de deslizamiento	Peligrosidad	Estudios de ingeniería básica	Manual del “CENEPRED”
	Vulnerabilidad		
	Riesgo	Parámetros geotécnicos	
V.D. Medidas Preventivas	Acciones Preventivas	Probabilidad de ocurrencia	Pautas de seguridad del CDA
	Plan de contingencia	Impacto	Revisiones de seguridad de presas
	Plan de respuesta ante emergencias	Incidencia	

Nota. Elaboración Propia

CAPITULO III: MARCO METODOLÓGICO

3.1 Tipo de investigación

La investigación es de tipo aplicada porque nos permite utilizar los resultados y buscar soluciones ante un problema específico.

Según Vargas, Z. (2009), “La investigación aplicada tiene como propósito resolver una situación específica o particular, para confirmar un método a través de la aplicación innovadora y creativa de una propuesta de intervención, en un grupo, persona, institución o empresa que lo requiera”.

La presente investigación es de tipo Aplicada no experimental ya que se realizará la evaluación de riesgo por deslizamiento y con los resultados obtenidos se desarrollará medidas preventivas para el depósito de relaves Ramahuayco de la unidad minera Catalina Huanca.

3.2 Población y muestra

Según Fernández, C. y Baptista, A. (2014), “La muestra es un subgrupo de la población de interés sobre el cual se recolectarán datos, que tiene que delimitarse con precisión, debe ser representativo de la población” (p. 173).

La población de estudio es el recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco en Ayacucho de la unidad minera Catalina Huanca, el cual se realizará la evaluación de riesgos para luego proponer medidas preventivas.

3.3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Dado el carácter exploratorio de la investigación, los datos empleados en la recopilación de datos se recogieron de forma teórica.

3.4 Descripción y procedimiento de análisis

En la parte cuantitativa, realizar una evaluación del riesgo por el método de parámetros geotécnicos bajo la metodología del Cenepred, ya que está relacionado con información realizada del propio diseño y posee estudios técnicos in situ que genera información actualizada que ayuda al conocimiento de los peligros, las vulnerabilidades y los riesgos el cual se considera más preciso.

Finalmente, en la parte cualitativa, analizar por la metodología de Satty ya que está basado en la experiencia y observaciones de campo debido a la inexistencia de información de origen natural sobre el área geográfica de estudio y recopilación de datos pertenecientes al proyecto, investigaciones referidas al proyecto, normas y estándares utilizados internacionalmente para posteriormente realizar medidas preventivas.

CAPITULO IV: RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis se desarrolla a lo largo de este capítulo con la información brindada por el Senace, lo cual se llegará a resultados y concluiremos con conclusiones y recomendaciones

Objetivo: Evaluar el riesgo de deslizamiento del recremento del depósito de relaves filtrados Ramauayco a fin de proponer medidas preventivas. Ver figura 44.

Autor: Srk Consulting y Catalina Huanca Sociedad Minera S.A.C. (2020)

Figura 44

Sobreelevación del depósito de relaves filtrados Ramahuayco

Sobreelevación del depósito de relaves filtrados Ramahuayco

6.1 Obras Civiles

Informe preparado para:

Catalina Huanca Sociedad Minera S.A.C.



6.1.3: Diseño geotécnico

Informe elaborado por:



20R30103
Abril, 2020

Nota. Adaptado del Senace

<https://eva.senace.gob.pe:8443/plan/senace/token?tk=061F01D9-E182-766E-E063-CE4B10AC3C59>

4.1 Determinación del nivel de peligrosidad

Los parámetros que se utilizaron para el escenario de peligrosidad fueron la pendiente, material del dique, capacidad de la estructura y erosión, los cuales fueron considerados y otros modificados según el manual del CENEPRED, ya que estos son los más comunes en las fallas de presas. Ver Tabla 6.

Tabla 6*Valoración de variables: Identificación de peligrosidad*

Parámetros para el Deslizamiento del talud	Pendiente	Material del dique	Capacidad de la estructura	Erosión
Pendiente	1.00	3.00	5.00	7.00
Material del dique	1/3	1.00	3.00	5.00
Capacidad de la estructura	1/5	1/3	1.00	3.00
Erosión	1/7	1/5	1/3	1.00
Suma	1.676	4.533	9.333	16.000
1/Suma	0.597	0.221	0.107	0.063

Nota. Elaboración Propia

4.1.1 Determinación de la susceptibilidad

4.1.1.1 Variables condicionantes

Las variables condicionantes consideradas para el recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco son el entorno en el que se encuentra, el tipo de suelo en el que está la cimentación y la cobertura vegetal ya que la pérdida de este favorece al desplazamiento mecánico del material por variables desencadenantes. Ver Tabla 7.

Tabla 7*Valoración de variables: Variables condicionantes*

Parámetros de evaluación	Uso actual de suelo	Tipo de suelo	Cobertura vegetal	Relieve
Uso Actual de Suelo	1.00	3.00	5.00	7.00
Tipo de Suelo	1/3	1.00	3.00	5.00
Cobertura Vegetal	1/5	1/3	1.00	3.00
Relieve	0.14	0.20	0.33	1.00
Suma	1.68	4.53	9.33	16.00
1/Suma	0.60	0.22	0.11	0.06

Nota. Elaboración Propia

4.1.1.2 Variables desencadenantes

Están activos por la aparición de acontecimientos y/o sucesos asociados en una determinada zona geográfica. Los parámetros que se consideraron dentro de este factor son los siguientes:

Vibración sísmica, inducido por la acción humanas y precipitación máxima anual. Se consideró “Inducido por la Acción Humana” que alteran la estabilidad del talud y genera la falla. En este análisis, el depósito de relaves en estudio va a recrecer en altura y

capacidad de volumen, conforme al informe del año 2020, elaborado por SRK Consulting. Por lo tanto, se pondera con un mayor valor

Por última instancia se encuentra el parámetro “Precipitación Promedio Anual” el cual nos permite determinar la precipitación estacional de máximas avenidas, tal como se muestra en la Tabla 8.

Tabla 8

Valoración de variables: Variables desencadenantes

Parámetros de evaluación	Vibración sísmica	Inducido por la acción humana	Precipitación promedio anual
Vibración Sísmica	1.00	3.00	5.00
Inducido por la Acción Humana	1/3	1.00	3.00
Precipitación Promedio Anual	1/5	1/3	1.00
Suma	1.53	4.33	9.00
1/Suma	0.65	0.23	0.11

Nota. Elaboración Propia

4.1.2 Determinación de la vulnerabilidad

4.1.2.1 Dimensión social

4.1.2.1.1 Exposición social

Se ha identificado que hay servicios educativos cercanos al área de emplazamiento del depósito de relaves. Adicionalmente, se ha estimado que el rango de edad de los trabajadores expuestos se encuentra en el rango de 18 a 50 años. Principalmente por aquellos que participan en cada proceso de la planta y los operarios de las maquinarias pesadas. Además, se encontró servicios de salud cerca de la zona, los cuales solo dan servicios básicos, como se indica en tabla 9.

Tabla 9*Valoración de variables: Parámetro exposición social*

Parámetros de evaluación	Servicios educativos expuestos	Grupo etáreo	Servicios de salud
Servicio Educativos Expuesto	1.00	3.00	5.00
Grupo Etáreo	1/3	1.00	3.00
Servicios de Salud Terciarios	1/5	1/3	1.00
Suma	1.53	4.33	9.00
1/Suma	0.65	0.23	0.11

Nota. Elaboración Propia**4.1.2.1.2 Fragilidad social**

El distrito de Canaria no es ajena al crecimiento poblacional, urbanístico y migratorio, lo que provoca que las personas construyan sus viviendas, que van de la mano de la autoconstrucción, y en regiones donde pueden verse afectadas por peligros inminentes. En esta situación, se consideran los siguientes parámetros de fragilidad social: "Cercanía al deslizamiento", "Material de construcción de la edificación", y "Estado de conservación de la edificación", como se indica en la Tabla 10.

Tabla 10*Valoración de variables: Parámetro fragilidad social*

Parámetros de evaluación	Cercanía al deslizamiento	Material de construcción de la edificación	Estado de conservación de la edificación
Cercanía al deslizamiento	1.00	3.00	5.00
Material de construcción de la edificación	1/3	1.00	3.00
Estado de conservación de la edificación	1/5	1/3	1.00
Suma	1.53	4.33	9.00
1/Suma	0.65	0.23	0.11

Nota. Elaboración Propia

4.1.2.1.3 Resiliencia social

Es la capacidad del componente social para recuperarse tras un deslizamiento. Es la inversa de la vulnerabilidad; cuanto mayor es la resiliencia, menor es la vulnerabilidad. En esta situación, la Tabla 11 muestra los cuatro aspectos importantes a considerar que hay que examinar para hacer frente al riesgo: "Actitud frente al riesgo", "Capacitación en temas de gestión del riesgo", "Conocimiento histórico de desastres" y "Normativa y programas de contingencia".

Tabla 11

Valoración de variables: Parámetro resiliencia social

Parámetros de evaluación	Actitud frente al riesgo	Capacitación en temas de gestión del riesgo	Conocimiento histórico de desastres	Normatividad y programas de contingencia
Actitud frente al riesgo	1.00	3.00	5.00	7.00
Capacitación en temas de gestión del riesgo	1/3	1.00	3.00	5.00
Conocimiento histórico de desastres	1/5	1/3	1.00	3.00
Normatividad y programas de contingencia	0.14	0.20	0.33	1.00
Suma	1.68	4.53	9.33	16.00
1/Suma	0.60	0.22	0.11	0.06

Nota. Elaboración Propia

4.1.2.2 Dimensión económica

4.1.2.2.1 Exposición económica

Se determinan las principales actividades económicas de la zona y se valora su nivel de riesgo. La actividad más importante es la minería, seguida del comercio, la agricultura y, en menor medida, la ganadería (Cenepred, 2014).

Como se observa en la Tabla 12.

Tabla 12*Valoración de variables: Parámetro exposición económica*

Parámetros de evaluación	Minería	Agricultura	Ganadería	Comercio
Minería	1.00	3.00	5.00	7.00
Agricultura	1/3	1.00	3.00	5.00
Ganadería	1/5	1/3	1.00	3.00
Comercio	0.14	0.20	0.33	1.00
Suma	1.68	4.53	9.33	16.00
1/Suma	0.60	0.22	0.11	0.06

Nota. Elaboración Propia**4.1.2.2.2 Fragilidad económica**

Se analiza el posible impacto de la ocurrencia de un deslizamiento en la zona de estudio y se valora en cada uno de los aspectos de la dimensión económica con el fin de prever el nivel de fragilidad de la dimensión económica ante este fenómeno, como se muestra en la Tabla 13.

Tabla 13*Valoración de variables: Parámetro fragilidad económica*

Parámetros de evaluación	Agricultura	Ganadería	Comercio	Minería
Agricultura	1.00	3.00	5.00	7.00
Ganadería	1/3	1.00	3.00	5.00
Comercio	1/5	1/3	1.00	3.00
Minería	0.14	0.20	0.33	1.00
Suma	1.68	4.53	9.33	16.00
1/Suma	0.60	0.22	0.11	0.06

Nota. Elaboración Propia**4.1.2.2.3 Resiliencia económica**

Es la fortaleza económica de los componentes expuestos en esta dimensión el que podrá hacer frente a las consecuencias del deslizamiento del talud. Los parámetros de resiliencia económica estudiados son los que figuran en la tabla 14 a continuación:

Tabla 14*Valoración de variables: Parámetro resiliencia económica*

Parámetros de evaluación	PEA	Ingreso familiar promedio mensual	Organización y capacitación institucional
PEA desocupada	1.00	3.00	5.00
Ingreso familiar promedio mensual	1/3	1.00	3.00
Organización y capacitación constitucional	1/5	1/3	1.00
Suma	1.53	4.33	9.00
1/Suma	0.65	0.23	0.11

Nota. Elaboración Propia**4.1.2.3 Dimensión ambiental****4.1.2.3.1 Exposición ambiental**

Se investigan los componentes medioambientales que son propensos al deslizamiento. Se han identificado como factores ambientales expuestos a la "Deforestación", "Flora y fauna" y "Pérdida de agua". Se considera la "Deforestación" porque en un deslizamiento es un elemento que va a ser dañado y toma años en recuperarse.

La "Flora y Fauna" se ven impactadas por la pérdida de especies, así como toda el área que será dañada. La "Pérdida de agua" igualmente serán alterados ya que se encuentra una quebrada cerca de la zona, como se muestra en la Tabla 15.

Tabla 15*Valoración de variables: Parámetro exposición ambiental*

Parámetros de evaluación	Pérdida de agua	Flora y fauna	Deforestación
Pérdida de agua	1.00	3.00	5.00
Flora y fauna	1/3	1.00	3.00
Deforestación	1/5	1/3	1.00
Suma	1.53	4.33	9.00
1/Suma	0.65	0.23	0.11

Nota. Elaboración Propia**4.1.2.3.2 Fragilidad ambiental**

Para prever el grado de fragilidad de la variable ambiental ante este fenómeno, se investiga el impacto del deslizamiento en la región investigada y se valoran sus dimensiones. En la Tabla 16 se observan los componentes expuestos.

Tabla 16*Valoración de variables: Parámetro fragilidad ambiental*

Parámetros de evaluación	Localización de los centros poblados	Ecosistemas	Explotación de los recursos
Localización de los centros poblados	1.00	3.00	5.00
Ecosistemas	1/3	1.00	3.00
Explotación de los recursos	1/5	1/3	1.00
Suma	1.53	4.33	9.00
1/Suma	0.65	0.23	0.11

Nota. Elaboración Propia**4.1.2.3.3 Resiliencia ambiental**

En la Tabla 17 se consideraron los siguientes parámetros: “Capacitación de la población”, “Gestión ambiental” y “Capacitación en seguridad ambiente y salud del personal minero”. Con este conocimiento y/o formación, la población será consciente del nivel de peligro al que está expuesta y podrá mitigar la ocurrencia de una catástrofe.

Tabla 17*Valoración de variables: Parámetro resiliencia ambiental*

Parámetros de evaluación	Capacitación de la población	Gestión ambiental	Capacitación en seguridad ambiente y salud del personal minero
Capacitación de la población	1.00	3.00	5.00
Gestión Ambiental	1/3	1.00	3.00
Capacitación en seguridad ambiente y salud del personal minero	1/5	1/3	1.00
Suma	1.53	4.33	9.00
1/Suma	0.65	0.23	0.11

Nota. Elaboración Propia**4.1.3. Análisis del nivel de peligrosidad****4.1.3.1 Reconocimiento del peligro**

Como primera instancia, los taludes que lo conforman son 1.75:1 (H: V), por lo tanto, la pendiente del dique se encuentra entre los 25° a 50°, conformado por una combinación

de mezcla de relave filtrado y material de préstamo (SRK Consulting, 2020). En la Tabla 18 se observa los rangos adaptados por el Cenepred.

Tabla 18

Reconocimiento del peligro: Parámetro pendiente

Parámetro	Pendiente	Peso Ponderado:	0.558	
	PN 1	>75°	PPN1	0.503
	PN 2	50° a 75°	PPN2	0.260
Descriptores	PN 3	25° a 50°	PPN3	0.134
	PN 4	5° a 25°	PPN4	0.068
	PN 5	Menor a 5°	PPN5	0.035

Nota. Elaboración Propia

La unidad 1, está conformado por basamento rocoso (SRK Consulting, 2020).

La unidad 2, está conformado por material de préstamo conformado en el dique D-1, este material de préstamo ha sido evaluado en los años 2013 y 2014 siendo clasificado como una grava arcillosa con limo y arena (GC- GM) con un rango de gravas que varía entre 21 y 47%, un rango de arenas que varía entre 26 y 34% y un rango de finos que varía entre 26 y 44% (SRK Consulting, 2020).

La unidad 03 y 04, está conformado por material de mezcla de relave (Vaso RF-1 y Dique D-2) (SRK Consulting, 2020).

La unidad 05, está conformado por Material de enrocado. (SRK Consulting, 2020) Ver tabla 19.

Tabla 19

Reconocimiento del peligro: Parámetro material del dique

Parámetro	Material del dique	Peso Ponderado	0.263	
	MD 1	Relaves finos que clasifican como limo arenoso (ML) y arcilla limosa (CL)	PMD1	0.503
Descriptores	MD 2	Relaves gruesos que son clasificados como arena limosa no plástica (SM)	PMD2	0.134
	MD 3	Material de préstamo (GC-GM)	PMD3	0.260
	MD 4	Material de enrocado (GP)	PMD4	0.068
	MD 5	Muro de concreto - Basamento rocoso	PMD5	0.035

Nota. Elaboración Propia

En la Tabla 20 se considera la capacidad de la estructura porque la cantidad de material de relave es la fuente inicial de peligro; cuanto más haya y cuantos menores sean los factores de seguridad frente a deslizamientos, más graves serán las consecuencias del fallo del talud.

El proyecto consiste en diseñar un recrecimiento en la zona A y elaborar geometrías intermedias en la zona B, para secuenciar el proceso constructivo del depósito de relaves filtrados Ramahuayco, este depósito será estable para condiciones estáticas y pseudo estáticas, este requerimiento se debe cumplir a corto y a largo plazo.

Los criterios de diseño empleados en la elaboración de la “Sobreelevación del depósito de relaves filtrados Ramahuayco”, como resultado se obtuvo lo siguiente:

- Relave en el vaso (Zona A - Recrecimiento): 492.427,65 ton
- Relave en el vaso (Zona B): 2'967.020,16 ton
- Vida útil de la zona 1 - A (Patio de Secado): 1440 días = 4 años
- Vida útil de la zona 1 - A (Disposición Final): 360 días = 1 año
- Vida útil de la zona 2 - A (Disposición Final): 285 días = 9,5 meses
- Vida útil de la Zona B (Aprobada): 1717 días = 4,77 meses

Tabla 20

Reconocimiento del peligro: Parámetro capacidad de la estructura

Parámetro	Capacidad de estructura (MM3)	Peso Ponderado	0.122
CE 1	3.5 - MAS	PCE1	0.503
CE 2	2.5 – 3.5	PCE2	0.260
Descriptores CE 3	1.5 – 2.5	PCE3	0.134
CE 4	0.5 – 1.5	PCE4	0.068
CE 5	0 – 0.5	PCE5	0.035

Nota. Elaboración Propia

En la Tabla 21, se considera los siguientes descriptores para el parámetro de Erosión.

Tabla 21*Reconocimiento del peligro: Parámetro erosión*

Parámetro	Erosión	Peso Ponderado	0.057	
Descriptores	MD 1	Sectores con mucha inestabilidad. Laderas que presentan sectores con falla, macizos rocosos fuertemente meteorizados y/o alterados, sedimentos superficiales no consolidados, y sectores con erosión intensa.	PTS1	0.503
	MD 2	Sectores inestables, alteración de macizos rocosos con meteorización y/o alteración fuerte a moderada, muy fracturados; sedimentos superficiales no consolidados, suelos no tan saturados, y áreas con erosión fuerte.	PTS2	0.260
	MD 3	Sectores con poca estabilidad, laderas con erosión fuerte o materiales no tan saturados y algo desgastados.	PTS3	0.134
	MD 4	Laderas no muy fracturadas, de media a baja meteorización, no tan erosionadas y saturadas.	PTS4	0.068
	MD 5	Laderas de basamento rocoso sin meteorización Puede haber laderas con inestabilidad cercanas a las quebradas y ríos por la erosión.	PTS5	0.035

Nota. Elaboración Propia

Una vez obtenidos todos los valores de los descriptores para el caso del reconocimiento de peligrosidad, en la Tabla 22 se muestra un resumen de valoración del peligro.

Tabla 22*Reconocimiento del peligro: Resumen de valoración del peligro*

Pendiente		Material del dique		Capacidad de la estructura		Erosión		Valor del Peligro
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	
0.134	0.558	0.26	0.263	0.26	0.122	0.068	0.057	0.179

Nota. Elaboración Propia

4.1.3.2 Análisis de Susceptibilidad

4.1.3.2.1 Factores condicionantes

En la tabla 23, se tomó en cuenta el uso actual de suelos ya que los materiales extraídos son altamente nocivos.

Tabla 23*Variables condicionantes: Parámetro uso actual de suelos*

Parámetro	Uso actual de suelos	Peso Ponderado	0.558
	Y1 Depósito de relaves mineros, depósito de desmontes	PY1	0.503
	Terrenos cultivados permanentemente para árboles frutales y otros cultivos, como productos alimenticios, industriales, de exportación, etc. Lugares cultivables que permanecen inactivos durante largos periodos de tiempo como el barbecho.	PY2	0.260
Descriptores	Y3 Arena Eólica y/o limo (sin agua)	PY3	0.134
	Y4 Los pastos naturales, grandes extensiones que se extienden por las laderas de las colinas, son lugares adecuados para determinados tipos de ganado; su vigorosidad depende de la época del año y está asociada a la presencia de precipitaciones	PY4	0.068
	Y5 Sin uso / improductivos, no pueden ser aprovechadas para ningún tipo de actividad	PY5	0.035

Nota. Elaboración Propia

El tipo de suelo también es importante como factor condicionante, porque el depósito se cimentará sobre caliza ligeramente fracturada correspondiente al Grupo Pucará.

La cimentación del dique de arranque se investigó con calicatas y sondeos para determinar el perfil del suelo formado por una capa superior de suelo coluvial y una unidad subyacente formada por el conglomerado rojizo que corresponde al basamento rocoso. Esta roca tiene la resistencia necesaria para soportar la carga que originará la acumulación de relaves en el dique (SRK Consulting, 2020), como se muestra en la tabla 24.

Tabla 24*Variables condicionantes: parámetro tipo de suelo*

Parámetro	Tipo de suelo	Peso Ponderado	0.263
	Y6 Rellenos Sanitarios	PY6	0.503
	Y7 Arena Eólica y/o limo (con agua)	PY7	0.260
	Y8 Arena Eólica y/o limo (sin agua)	PY8	0.134
Descriptores	Y9 Suelos con gránulos finos y suelos arcillosos sobre gravas aluviales o coluviales	PY9	0.068
	Y10 Suelo coluvial cuaternario reciente y rocas sedimentarias de la formación Bellavista	PY10	0.035

Nota. Elaboración Propia

La cobertura vegetal es una característica que ayuda a prevenir la erosión de la tierra, ya que contribuye a la erosión y desprendimiento del suelo en las zonas áridas, como se muestra en la tabla 25.

Tabla 25

Variables condicionantes: Parámetro cobertura vegetal

Parámetro	Cobertura vegetal	Peso Ponderado	0.122
Y11	De 70 a 100%	PY11	0.503
Y12	De 40 a 70%	PPN2	0.260
Descriptores	Y13 De 30 a 40%	PPN3	0.134
Y14	De 5% a 30%	PPN4	0.068
Y15	De 0 a 5%	PPN5	0.035

Nota. Elaboración Propia

La zona donde se cimentará el depósito de relaves es accidentada, con un sector encañonado, pendientes pronunciadas, un sector de sección transversal abierta aguas arriba de la garganta y un sector de sección en V aguas debajo de la garganta, como se muestra en la tabla 26.

Tabla 26

Variables condicionantes: Parámetro relieve

Parámetro	Relieve	Peso Ponderado	0.057
Y16	La nieve y los glaciares cubren enormes extensiones de este abrupto y escarpado terreno rocoso.	PY16	0.503
Y17	El terreno de esta región es variado, con mesetas y numerosas lagunas alimentadas por deshielos, cuya amplitud se localizan varios lagos y lagunas.	PY17	0.260
Descriptores	Y18 El relieve es rocoso, abrupto y escarpado. La zona geográfica está marcada en ambos flancos andinos	PY18	0.134
Y19	El relieve es muy accidentado, con estrechos valles y profundas quebradas, así como varias estribaciones andinas. Territorio de los Huaycos, montañoso y complejo en general.	PY19	0.068
Y20	El terreno es generalmente llano y ondulado, con zonas montañosas en el sur. Tiene pampas, dunas, tablazos, valles, zona árida y desértica.	PY20	0.035

Nota. Elaboración Propia

De acuerdo con los rangos de peligrosidad del CENEPRED, el valor de riesgo para los factores condicionantes se clasifica como Peligro Alto, como se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27*Variables condicionantes: Resumen de valor de variables condicionantes*

Uso actual de Suelos		Tipo de suelo		Cobertura vegetal		Relieve		Valor
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	0.314
0.503	0.558	0.035	0.263	0.134	0.122	0.134	0.057	

Nota. Elaboración Propia**4.1.3.2.2 Factores desencadenantes**

A continuación, se presenta los factores desencadenantes agregados y se calcula el ponderado.

La aceleración máxima de 0,33g se obtuvo para periodo de retorno de 500 años en la etapa anterior para evaluar la susceptibilidad del caso de estudio (SRK Consulting, 2020).

Tal como se muestra en la tabla 28.

Tabla 28*Variables desencadenantes: Parámetro vibración sísmica*

Parámetro	Vibración sísmica	Descriptor	Peso Ponderado	0.633
Y11	0.71-0.84	PX1	0.503	
Y12	0.51-0.71	PX2	0.260	
Descriptor Y13	0.31-0.51	PX3	0.134	
Y14	0.10-0.31	PX4	0.068	
Y15	0.02-0.10	PX5	0.035	

Nota. Elaboración Propia

En el caso de inducido por la acción humana como es el recrecimiento del depósito de relaves se consideró los siguientes descriptores, como se muestra en la tabla 29.

Tabla 29*Variables desencadenantes: Parámetro inducido por la acción humana*

Parámetro	Inducido por la acción humana	Descriptor	Peso Ponderado	0.260
Y11	Recrecimiento de las infraestructuras de relaves	PY11	0.503	
Y12	Sobre explotación de recursos naturales	PP12	0.260	
Descriptor Y13	Actividades económicas	PP13	0.134	
Y14	Sobre explotación de recursos naturales	PS14	0.068	
Y15	Crecimientos demográficos	PS15	0.035	

Nota. Elaboración Propia

Por otra parte, en la Tabla 30, la mayor precipitación anual registrada es de 700 mm, según el estudio hidrológico. Normalmente, sólo una pequeña parte de las precipitaciones anuales recarga el suelo. En general, la recarga oscila entre el 3 y el 40%, con los valores más bajos asociados a zonas secas cubiertas por rocas de baja permeabilidad y los mayores valores asociados a zonas de alta precipitación cubiertas por rocas de alta permeabilidad (SRK Consulting, 2020).

Tabla 30

Variables desencadenantes: Parámetro precipitación promedio anual

Parámetro	Precipitación promedio Anual (mm)	Peso Ponderado	0.106
SP1	200-280	PSP1	0.503
SP2	150-200	PSP2	0.260
Descriptor SP3	100-150	PSP3	0.134
SP4	50-100	PSP4	0.068
SP5	20-50	PSP5	0.035

Nota. Elaboración Propia

El valor del peligro de las variables desencadenantes se encuentra en el nivel de Peligro Alto, según los rangos de peligrosidad del CENEPRED, ver Tabla 31.

Tabla 31

Variables desencadenantes: Resumen de valor de variables desencadenantes

Vibración sísmica		Inducido por la acción humana		Precipitación		Valor
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	0.230
0.134	0.633	0.503	0.260	0.134	0.106	

Nota. Elaboración Propia

4.1.3.3 Valor de susceptibilidad

El valor de susceptibilidad al peligro se calcula utilizando los valores de las tablas 27 y 31 como factores condicionantes y desencadenantes, respectivamente, con el fin de establecer el valor de peligro para el recrecimiento del depósito de relaves.

Tabla 32

Valor asignado de susceptibilidad

Valor Factor Condicionante		Valor Factor Desencadenante		Valor de susceptibilidad
Parámetro	Peso Ponderado	Parámetro	Peso Ponderado	0.272
0.314	0.500	0.230	0.500	

Nota. Elaboración Propia

4.1.3.4 Valor de peligrosidad

El valor de peligrosidad se calcula utilizando los valores de las tablas 27 y 32 como valor del peligro y valor de susceptibilidad, con el fin de establecer el valor de peligrosidad para el recrecimiento del depósito de relaves.

Tabla 33

Valor asignado de peligrosidad

Valor del Peligro		Valor de Susceptibilidad		Valor de Peligrosidad
Parámetro	Peso Ponderado	Parámetro	Peso Ponderado	
0.179	0.500	0.272	0.500	0.226

Nota. Elaboración Propia

De acuerdo con los rangos de peligro especificados por el CENEPRED, el valor de peligro 0,226 se sitúa en una categoría de peligro Alto, como se muestra en la Tabla 33.

4.2 Análisis de nivel de vulnerabilidad

De acuerdo al manual del CENEPRED define la vulnerabilidad como aquella que tiene componentes sociales, económicos y medioambientales.

4.2.1 Dimensión social

4.2.1.1 Exposición social

En cuanto a los servicios educativos, hay que señalar que no todos los núcleos de población encuestados ofrecen centros de enseñanza que abarquen desde la educación preescolar hasta la secundaria. El desarrollo de escuelas y colegios está ligado al auge de las diversas ciudades de la zona. En pueblos mineros como Uyuccasa y Raccaya existen jardines infantiles, escuelas primarias y colegios secundarios. Apongo, la capital del distrito, cuenta con escuelas para los tres grados: preescolar, primaria y secundaria (Almerco, 2014), como se muestra en la Tabla 34.

Tabla 34

Variable exposición social: Parámetro servicio educativo expuesto

Parámetro	Servicio educativo expuesto	Peso Ponderado	0.633
	EXS1 Más del 75% del servicio educativo está expuesto	PEXS1	0.503
	EXS2 Entre el 50% y 75% del servicio educativo está expuesto	PEXS2	0.260
Descriptores	EXS3 Entre el 25% y 50% del servicio educativo está expuesto	PEXS3	0.134
	EXS4 Entre el 10% y 25% del servicio educativo está expuesto	PEXS4	0.068
	EXS5 Menos del 10% del servicio educativo está expuesto	PEXS5	0.035

Nota. Elaboración Propia

Adicionalmente en la Tabla 35, se ha estimado que el rango de edad de los trabajadores expuestos se encuentra en el rango de 18 a 50 años. Principalmente por aquellos que participan en cada proceso de la planta y los operarios de las maquinarias pesadas.

Tabla 35

Variable exposición social: Parámetro grupo etéreo

Parámetro	Grupo etéreo	Peso Ponderado	0.106
	EXS6 De 0 a 05 años	PEXS6	0.503
	EXS7 De 05 a 12 años	PEXS7	0.260
Descriptores	EXS8 De 12 a 18 años	PEXS8	0.134
	EXS9 De 18 a 50 años	PEXS9	0.068
	EXS10 De 50 años a más	PEXS10	0.035

Nota. Elaboración Propia

Tabla 36

Variable exposición social: Parámetro servicios de salud

Parámetro	Servicios de salud	Peso Ponderado	0.106
	EXS11 Más del 60% del servicio de salud	PEXS11	0.503
	EXS12 Entre el 35% y 60% del servicio de salud	PEXS12	0.260
Descriptores	EXS13 Entre el 20% y 35% del servicio de salud	PEXS13	0.134
	EXS14 Entre el 10% y 20% del servicio de salud	PEXS14	0.068
	EXS15 Menos del 10% del servicio de salud	PEXS15	0.035

Nota. Elaboración Propia.

Una vez obtenidos todos los valores de los descriptores para el caso de la exposición social, en la Tabla 37 se muestra un resumen del valor de la exposición social.

Tabla 37*Variable exposición social: Resumen de valor de la variable exposición social*

Servicio educativo expuesto		Grupo etéreo		Servicios de salud		Valor
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	
	0.134		0.260		0.106	0.156

Nota. Elaboración Propia**4.2.1.2 Fragilidad social**

La fragilidad social incluye descriptores que varían según la región estudiada. En caso de deslizamiento, la cercanía al mismo es crítica debido a que existen varios asentamientos urbanos y rurales cercanos, entre ellos el distrito de Taca, comunidad rural con 120 pobladores y 37,859 hectáreas. Es relativamente grande debido a las incorporaciones de Huancapampa, Chumbilla y Santa Rosa de Sacclani. Es puerto terrestre porque aquí se cruzan las carreteras que conducen a la provincia de Sucre y Canaria, Huamanga y las ciudades aledañas. Es dormitorio de los trabajadores de la mina Catalina Huanca que vienen de todo el Perú. Muchas viviendas se alquilan a contratistas y mineros, y se construyen "habitaciones" especialmente con este fin. Los pobladores calculan que hay unas 450 familias en la zona (Almerco, 2014), como se muestra en la Tabla 38.

Tabla 38*Variable fragilidad social: Parámetro cercanía al deslizamiento*

Parámetro	Cercanía al deslizamiento	Peso Ponderado	0.633
EXS16	Menor a 2 Km cerca del deslizamiento	PEXS16	0.503
EXS17	Entre 2 Km a 5 Km cerca del deslizamiento	PEXS17	0.260
Descriptores EXS18	Entre 5 Km a 8 Km del deslizamiento	PEXS18	0.134
EXS19	Entre 8 Km a 11 Km del deslizamiento	PEXS19	0.068
EXS20	Mas de 11 Km del deslizamiento	PEXS20	0.035

Nota. Elaboración Propia

Del mismo modo, la calamina es utilizada por el 83,1% de las familias entrevistadas, mientras que la teja es utilizada por la mayoría de los habitantes de Apongo (52,2%). Las paredes en el 92% de las viviendas de las familias entrevistadas en la zona son de tapia o adobe, mientras que los suelos son de tierra en el 87% de los hogares (Almerco, 2014). Tal como se muestra en la Tabla 39.

Tabla 39*Variable fragilidad social: Parámetro material de construcción de la edificación*

Parámetro	Material de construcción de la edificación	Peso Ponderado	0.260
	EXS21 Estera/Cartón	PEXS21	0.503
	EXS22 Madera	PEXS22	0.260
Descriptores	EXS23 Quincha (caña con barro)	PEXS23	0.134
	EXS24 Adobe o tapia	PEXS24	0.068
	EXS25 Ladrillos o bloque de cemento	PEXS25	0.035

Nota. Elaboración Propia

Las viviendas, por su parte, están hechas de materiales rústicos como adobe, suelos de tierra, techos de calamina o teja, y se encuentran muy deterioradas. Su fiesta patronal es el 30 de noviembre (Almerco, 2014). Tal como se muestra en la Tabla 40.

Tabla 40*Variable fragilidad social: Parámetro estado de conservación de la edificación*

Parámetro	Estado de conservación de la edificación	Peso Ponderado	0.106
	EXS26 MUY MALO: Su colapso es evidenciado.	PEXS26	0.503
	EXS27 MALO: Sin mantenimiento y las instalaciones son defectuosas.	PEXS27	0.260
Descriptores	EXS28 REGULAR: Poseen mantenimiento temporal y los daños son reparables	PEXS28	0.134
	EXS29 BUENO: Poseen mantenimiento y los daños son menores	PEXS29	0.068
	EXS30 MUY BUENO: Poseen mantenimiento constante y no presentan daños.	PEXS30	0.035

Nota. Elaboración Propia

Una vez obtenidos todos los valores de los descriptores para el caso de la fragilidad social, en la Tabla 41 se muestra un resumen del valor de la fragilidad social.

Tabla 41*Variable fragilidad social: Resumen de valor de la variable fragilidad social*

Cercanía al deslizamiento		Material de construcción de la edificación		Estado de conservación de la edificación		Valor
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	0.130
0.134	0.633	0.068	0.260	0.260	0.106	

Nota. Elaboración Propia

4.2.1.3 Resiliencia social

Catalina Huanca Sociedad Minera realizará exámenes médicos a todos los trabajadores con el fin de definir y vigilar su estado de salud, tal como lo exigen las normas aplicables. Además, según lo exija la legislación aplicable, adicionalmente a todos los trabajadores se le realizarán exámenes médicos, expuestos a peligros según su ocupación. El comité de seguridad determinará si el proyecto emplea o produce productos químicos cancerígenos a los que puedan estar expuestos los trabajadores (Almerco, 2014). Tal como se muestra en la Tabla 42.

Tabla 42

Variable resiliencia social: Parámetro actitud frente al riesgo

Parámetro	Actitud frente al riesgo	Peso Ponderado	0.558
Descriptores	EXS31 La población posee una mentalidad conformista y fatalista.	PEXS31	0.503
	EXS32 La población no tiene una actitud que previene riesgos.	PEXS32	0.260
	EXS33 La población tiene una actitud parcial que previene riesgos, asumiendo el peligro, pero sin tomar medidas de prevención de riesgos.	PEXS33	0.134
	EXS34 La población tiene una actitud parcial que previene riesgos, asumiendo el riesgo y aplicando pocas medidas de prevención del riesgo.	PEXS34	0.068
	EXS35 Toda la población tiene una actitud previsor, aplicando numerosas medidas de prevención del riesgo.	PEXS35	0.035

Nota. Elaboración Propia

En la Tabla 43, se considera los siguientes descriptores para el parámetro de capacitación en temas de gestión del riesgo.

Tabla 43

Variable resiliencia social: Parámetro capacitación en temas de gestión del riesgo

Parámetro	Capacitación en temas de gestión del riesgo	Peso Ponderado	0.263
Descriptores	EXS36 Ninguna/Nula	PEXS36	0.503
	EXS37 Poca/Escasa	PEXS37	0.260
	EXS38 Capacitación Básica	PEXS38	0.134
	EXS39 Capacitación Frecuente	PEXS39	0.068
	EXS40 Capacitación activa y actualizada en temas de riesgo	PEXS40	0.035

Nota. Elaboración Propia

Por otra parte, el 73% de todos los entrevistados sabe que la minería lleva desarrollándose en la zona entre cinco y siete décadas, y son conscientes en todas las áreas de influencia directa como indirecta. La mayoría de los encuestados sabe que las minas de la zona fueron administradas por una empresa (36%), o por una persona (20%) (Almerco, 2014). Tal como se muestra en la Tabla 44.

Tabla 44

Variable resiliencia social: Parámetro conocimiento histórico de desastres

Parámetro	Conocimiento histórico de desastres	Peso Ponderado	0.122
EXS41	Los pobladores no conocen los motivos de las catástrofes naturales.	PEXS41	0.503
EXS42	La población tiene un escaso conocimiento de las causas y consecuencia de las catástrofes naturales.	PEXS42	0.260
Descriptores EXS43	La población se informa regularmente sobre las causas y repercusiones de las catástrofes.	PEXS43	0.134
EXS44	La mayoría de la población conoce las causas y consecuencias de las catástrofes naturales.	PEXS44	0.068
EXS45	La población en general es consciente de las causas y consecuencias de las catástrofes naturales.	PEXS45	0.035

Nota. Elaboración Propia

En la Tabla 45, se considera los siguientes descriptores para el parámetro de resiliencia social.

Tabla 45

Variable resiliencia social: Parámetro normatividad y programas de contingencia

Parámetro	Normatividad y programas de contingencia	Peso Ponderado	0.057
EXS46	No existen mecanismos legislativos locales que ayuden a mitigar los riesgos.	PEXS46	0.503
Descriptores EXS47	Existen normas legales, pero no hay formación, ni simulacros, ni colaboración con otras instituciones.	PEXS47	0.260
EXS48	Existe un comité local, pero no aplica ni organiza medidas de prevención y/o mitigación de catástrofes.	PEXS48	0.134
EXS49	Hay organización y preparación, así como asistencia jurídica, pero hay pocos esfuerzos de prevención o mitigación de catástrofes.	PEXS49	0.068

	La asistencia jurídica del territorio, que ayuda a mitigar el peligro del territorio (local, regional o nacional), en el que se encuentra la zona de estudio, se aplica estrictamente.	PEXS50	0.035
EXS50	Un eje estratégico del desarrollo es el desarrollo planificado del territorio.		

Nota. Elaboración Propia

Una vez obtenidos todos los valores de los descriptores para el caso de Resiliencia social, en la Tabla 46 se muestra un resumen del valor de la resiliencia social.

Tabla 46

Variable resiliencia social: Resumen de valor de variable resiliencia social

Actitud frente al riesgo		Capacitación en temas de gestión del riesgo		Conocimiento histórico de desastres		Normatividad y programas de contingencia		Valor
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	
	0.035	0.260	0.263	0.134	0.122	0.260	0.057	0.119

Nota. Elaboración Propia

Una vez obtenidos todos los valores de la variable Resiliencia social, en la Tabla 47 se muestra un resumen del valor de la dimensión social.

Tabla 47

Valor de vulnerabilidad: Dimensión social

Valor exposición social		Valor fragilidad social		Valor resiliencia social		Dimensión social
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	
	0.156	0.130	0.106	0.119	0.260	0.144

Nota. Elaboración Propia

4.2.2 Dimensión económica

4.2.2.1 Exposición económica

Las tasas de actividad económica en los dos distritos oscilan entre el 41% y el 46% de la población mayor de 15 años, y la agricultura representa la mayor parte de la PEA. Los asalariados representan alrededor de un tercio de la PEA en Canaria y el 43,2% en Apongo (Almerco, 2014). Tal como se muestra en la Tabla 48.

Tabla 48*Variable exposición económica: Parámetro minería*

Parámetro	Minería	Peso Ponderado	0.558
EXS51	Mas del 75% de elementos mineros expuestos	PEXS51	0.503
EXS52	Entre el 50% y 75% de elementos mineros expuestos	PEXS52	0.260
Descriptores EXS53	Entre el 25% y 50% de elementos mineros expuestos	PEXS53	0.134
EXS54	Entre el 10% y 25% de elementos mineros expuestos	PEXS54	0.068
EXS55	Menos del 10% de elementos mineros expuestos	PEXS55	0.035

Nota. Elaboración Propia

Según los datos obtenidos en el estudio, elaborado por del Social Capital Group, el 72% de los habitantes de Uyuccasa están en edad de trabajar, el 47% se dedica a la minería y sólo el 22,7% a la agricultura (Almerco, 2014). Tal como se muestra en la Tabla 49.

Tabla 49*Variable exposición económica: Parámetro agricultura*

Parámetro	Agricultura	Peso Ponderado	0.263
EXS56	Mas del 75% de agricultura expuesta	PEXS56	0.503
EXS57	Entre el 50% y 75% de agricultura expuesta	PEXS57	0.260
Descriptores EXS58	Entre el 25% y 50% de agricultura expuesta	PEXS58	0.134
EXS59	Entre el 10% y 25% de agricultura expuesta	PEXS59	0.068
EXS60	Menos del 10% de agricultura expuesta	PEXS60	0.035

Nota. Elaboración Propia

En Chumbilla que forma parte de la comunidad rural de Taca, la agricultura y la ganadería se llevan a cabo a escala muy pequeña, debido a la escasez de tierra y agua (Almerco, 2014). Tal como se muestra en la Tabla 50.

Tabla 50*Variable exposición económica: Parámetro ganadería*

Parámetro	Ganadería	Peso Ponderado	0.122
	EXS61 Mas del 75% de ganadería expuesta	PEXS61	0.503
	EXS62 Entre el 50% y 75% de ganadería expuesta	PEXS62	0.260
Descriptores	EXS63 Entre el 25% y 50% de ganadería expuesta	PEXS63	0.134
	EXS64 Entre el 10% y 25% de ganadería expuesta	PEXS64	0.068
	EXS65 Menos del 10% de ganadería expuesta	PEXS65	0.035

Nota. Elaboración Propia

Según las autoridades entrevistadas, la actividad minera en la zona ha tenido históricamente un impacto significativo en la economía local, a pesar de las dificultades económicas sufridas por los diversos operadores que explotaron la mina Catalina Huanca. El establecimiento de un campamento minero dio lugar a una gran presencia de personas con poder adquisitivo (Almerco, 2014). Tal como se muestra en la Tabla 51.

Tabla 51*Variable exposición económica: Parámetro comercio*

Parámetro	Comercio	Peso Ponderado	0.057
	EXE16 Mas del 75% de comercio expuesto	PEXE16	0.503
	EXE17 Entre el 50% y 75% de comercio expuesto	PEXE17	0.260
Descriptores	EXE18 Entre el 25% y 50% de comercio expuesto	PEXE18	0.134
	EXE19 Entre el 10% y 25% de comercio expuesto	PEXE19	0.068
	EXE20 Menos del 10% de comercio expuesto	PEXE20	0.035

Nota. Elaboración Propia

Una vez obtenidos todos los valores de los descriptores para el caso de Exposición social, en la Tabla 52 se muestra un resumen del valor de la exposición social.

Tabla 52*Variable exposición económica: Resumen de valor de exposición económica*

Minería		Agricultura		Ganadería		Comercio		Valor
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	
	0.134		0.263		0.122		0.057	0.112
	0.558		0.068		0.035		0.260	

Nota. Elaboración Propia**4.2.2.2 Fragilidad económica**

Según datos del INEI, la localidad de Uyuccasa se ubica en el distrito de Canaria. Sin embargo, el Gobierno Regional la ubica en el distrito de Apongo. De hecho, muchos habitantes de Apongo poseen pastos y tierras de cultivos (Almerco, 2014). Tal como se muestra en la Tabla 53.

Tabla 53*Variable fragilidad económica: Parámetro agricultura*

Parámetro	Agricultura	Peso Ponderado	0.558	
EXE21	Pérdida total de las tierras de cultivo	PEXE21	0.503	
EXE22	Pérdida parcial de las tierras de cultivo	PEXE22	0.260	
Descriptores	EXE23	Pérdida total de la producción agrícola	PEXE23	0.134
	EXE24	Pérdida parcial de la producción agrícola	PEXE24	0.068
	EXE25	Sin pérdida de producción agrícola	PEXE25	0.035

Nota. Elaboración Propia

La producción ganadera se limita al ganado vacuno (20%), ovino (10%) y animales domésticos como aves, cuyes y cerdos (24%). Los animales domésticos se consumen principalmente para el consumo familiar, mientras que el ganado vacuno y ovino se consume y se vende (Almerco, 2014). Tal como se muestra en la Tabla 54.

Tabla 54*Variable fragilidad económica: Parámetro ganadería*

Parámetro	Ganadería	Peso Ponderado	0.263
EXE26	100% Pérdida de los animales	PEXE26	0.503
EXE27	80% Pérdida de los animales	PEXE27	0.260
Descriptores EXE28	60% Pérdida de los animales	PEXE28	0.134
EXE29	40% Pérdida de los animales	PEXE29	0.068
EXE30	Sin pérdida de los animales	PEXE30	0.035

Nota. Elaboración Propia

El establecimiento de un campamento minero dio lugar a la presencia masiva de un gran número de personas con una importante capacidad adquisitiva. Esto tuvo un impacto significativo en los negocios y servicios del pueblo (Almerco, 2014). Ver Tabla 55.

Tabla 55*Variable fragilidad económica: Parámetro comercio*

Parámetro	Comercio	Peso Ponderado	0.122
EXE31	Pérdida total de los establecimientos con pérdidas humanas	PEXE31	0.503
EXE32	Pérdida total de los establecimientos	PEXE32	0.260
Descriptores EXE33	Pérdida parcial de los establecimientos	PEXE33	0.134
EXE34	Actividades interrumpidas de los establecimientos	PEXE34	0.068
EXE35	Actividades no interrumpidas	PEXE35	0.035

Nota. Elaboración Propia

En la Tabla 56, se considera los siguientes descriptores para el parámetro Minería.

Tabla 56*Variable fragilidad económica: Parámetro minera*

Parámetro	Minería	Peso Ponderado	0.057
EXE35	El derrumbe total del depósito de residuos provocó la pérdida de vidas humanas.	PEXE35	0.503
EXE36	Colapso parcial del depósito de residuos, con pérdida de vidas humanas.	PEXE36	0.260
Descriptores EXE37	Colapso parcial del depósito de estériles con pérdidas materiales	PEXE37	0.134
EXE38	Las actividades se interrumpieron debido al fallo de la infraestructura.	PEXE38	0.068
EXE39	Las actividades no se interrumpieron.	PEXE39	0.035

Nota. Elaboración Propia

De este modo se obtiene así la Tabla 57, que resume los valores de fragilidad económica el cual permitirá calcular el valor de la exposición económica.

Tabla 57

Variable fragilidad económica: Resumen de valor de fragilidad económica

Agricultura		Ganadería		Comercio		Minería		Valor
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	0.053
0.068	0.558	0.035	0.263	0.035	0.122	0.035	0.057	

Nota. Elaboración Propia

4.2.2.3 Resiliencia económica

Dado que la mina beneficia a la economía local, el 42,9% de los encuestados en el IDA cree que habría menos empleos, menos empresas y más pobreza. El 16,9% volvería a trabajar en la agricultura; el 6,5% buscaría trabajo en otras minas; el 15,6% afirmó que no se vería afectado y que su situación seguiría siendo la misma; y el 10,4% indicó que, si la mina se fuera, el medio ambiente mejoraría y sería positivo para ellos que se cerraran las actividades mineras. Según el IIA, el 43,5% de los encuestados indicó que no se vería afectado si la mina cerrara; el 26,1% afirmó que el medio ambiente se beneficiaría; y el 17,4% dijo que la economía local se vería perjudicada (Almerco, 2014). Ver Tabla 58.

Tabla 58

Variable resiliencia económica: Parámetro PEA desocupada

Parámetro	PEA Desocupada	Peso Ponderado	0.633
	EXE40	Escases de puestos de trabajo formal	PEXE40 0.503
	EXE41	Empleos inestables	PEXE41 0.260
Descriptores	EXE42	Empleos informales	PEXE42 0.134
	EXE43	Acceso a trabajos permanentes	PEXE43 0.068
	EXE44	Alto nivel de empleo	PEXE44 0.035

Nota. Elaboración Propia

En la Tabla 59, se considera los siguientes descriptores para el parámetro Ingreso Familiar Promedio Mensual.

Tabla 59*Variable resiliencia económica: Parámetro ingreso familiar promedio mensual*

Parámetro	Ingreso familiar promedio mensual	Peso Ponderado	0.260
EXE45	< 250	PEXE45	0.503
EXE46	270 < 750	PEXE46	0.260
Descriptores EXE47	800 < 1200	PEXE47	0.134
EXE48	1300 < 2500	PEXE48	0.068
EXE49	> 3000	PEXE49	0.035

Nota. Elaboración Propia

El comité del plan de emergencia o contingencia se formó con el objetivo de cooperar con las autoridades y brigadas de respuesta que deben atender los incidentes durante y después de la emergencia. También coordina la logística a movilizar en caso de emergencia o contingencia. Cabe destacar que la mayoría de los eventos contingentes son bastante controlables siempre y cuando se tomen las precauciones necesarias y se mantenga la coordinación entre el personal y las comunidades cercanas para una rápida reacción ante crisis o contingencias (Almerco, 2014). Ver Tabla 60.

Tabla 60*Variable resiliencia económica: Parámetro ingreso familiar promedio mensual*

Parámetro	Organización y capacitación institucional	Peso Ponderado	0.106
EXE50	No hay colaboración ni identificación institucional ni interinstitucional.	PEXE50	0.503
EXE51	Falta apoyo e identificación institucional e interinstitucional.	PEXE51	0.260
Descriptores EXE52	Las organizaciones institucionales gubernamentales locales y regionales demuestran un nivel definido de eficacia en la gestión.	PEXE52	0.134
EXE53	La coordinación intersectorial está mejorando.	PEXE53	0.068
EXE54	Las instituciones gubernamentales a nivel sectorial muestran fuertes índices de eficacia en la gestión.	PEXE54	0.035

Nota. Elaboración Propia

Como resultado, obtenemos una tabla resumen con los valores de la resiliencia económica, que nos permitirá calcular el valor de la resiliencia económica.

Tabla 61*Variable resiliencia económica: Resumen de valor de resiliencia económica*

PEA desocupada		Ingreso familiar promedio mensual		Organización y capacitación institucional		Valor
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	0.214
0.260	0.633	0.134	0.260	0.134	0.106	

Nota. Elaboración Propia

Una vez obtenidos todos los valores de la variable resiliencia económica, en la Tabla 62 se muestra un resumen del valor de la dimensión económica.

Tabla 62*Valor de vulnerabilidad: Dimensión económica*

Exposición Económica		Fragilidad Económica		Resiliencia Económica		Dimensión Económica
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	0.132
0.112	0.633	0.053	0.106	0.214	0.260	

Nota. Elaboración Propia

4.2.3 Dimensión ambiental

4.2.3.1 Exposición ambiental

El cambio de la red de drenaje en caso se requiera por el recrecimiento del depósito de relaves, se considera un impacto sustancial debido a la duración del impacto. Ver Tabla 63.

Tabla 63*Variable exposición ambiental: Parámetro pérdida de agua*

Parámetro	Pérdida de agua	Peso Ponderado	0.633
EXS55	Contaminación de los ríos que suministran agua potable a la población.	PEXS55	0.503
EXS56	Contaminación de las aguas subterráneas	PEXS56	0.260
EXS57	Contaminación de fuentes de agua artificiales	PEXS57	0.134
EXS58	Pérdida total de la red de distribución	PEXS58	0.068
EXS59	Daños menores de la red de distribución	PEXS59	0.035

Nota. Elaboración Propia

En base a la información proporcionada por los residentes se descubrieron dos especies de fauna silvestre en peligro. El Vultur griphus (Condor Andino) y los pumas está en peligro de extinción y una especie de flora amenazada, Salvia opposita flora (NT), se encuentra como casi amenazada en la zona del proyecto, según el DS 043-2006-AG. Ver Tabla 64.

Tabla 64

Variable exposición ambiental: Parámetro flora y fauna

Parámetro	Flora y fauna	Peso Ponderado	0.106
EXS60	Entre el 80% al 100% de pérdida	PEXS60	0.503
EXS61	Entre el 50% al 75% de pérdida	PEXS61	0.260
Descriptores EXS62	Entre el 25% al 50% de pérdida	PEXS62	0.134
EXS63	Entre el 5% al 20% de pérdida	PEXS63	0.068
EXS64	Menor a 5% de pérdida	PEXS64	0.035

Nota. Elaboración Propia

El uso del suelo se ha reducido significativamente y se limita a pequeñas terrazas ubicadas en medio de la quebrada de Sacllani, donde existen sembríos de frutales. Ver Tabla 65.

Tabla 65

Variable exposición ambiental: Parámetro deforestación

Parámetro	Deforestación	Peso Ponderado	0.106
EXS65	100% Pérdida de bosques	PEXS65	0.503
EXS66	Mayor del 70% Pérdida de bosques	PEXS66	0.260
Descriptores EXS67	Mayor del 50% Pérdida de bosques	PEXS67	0.134
EXS68	Mayor del 10% Pérdida de bosques	PEXS68	0.068
EXS69	Sin pérdida de bosques	PEXS69	0.035

Nota. Elaboración Propia

Una vez obtenidos todos los valores de la variable exposición ambiental, en la Tabla 66 se muestra un resumen del valor de la exposición ambiental.

Tabla 66

Variable exposición ambiental: Resumen de valor de exposición ambiental

Pérdida de agua		Flora y fauna		Deforestación		Valor
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	
0.035	0.633	0.260	0.260	0.035	0.106	0.094

Nota. Elaboración Propia

4.2.3.2 Fragilidad ambiental

La ubicación de los centros poblados cercanos al área de estudio es crítica, ya que, a mayor cercanía, mayor es el daño. Ver Figura 45.

Figura 45

Distancias entre los principales centros poblados y las operaciones de Catalina Huanca Sociedad Minera (CHSM). Distancias expresadas en km.

Tabla N°2. Distancias entre los principales centros poblados y las operaciones de Catalina Huanca Sociedad Minera (CHSM). Distancias expresadas en Km

Localidad	Zona de Operación	
	Sacllani	Mishca
Huanca Pampa	2.4	7.3
Chumbilla	0.59	7.2
Santa Rosa de Sacllani (Desmontera Sánchez)	2.73	5.7
Raccaya	5.5	2.62
Apongo	3.4	3.8

Fuente: Unidad Minera Catalina Huanca

Nota. SRK Consulting (2020)

En la Tabla 67, se considera los siguientes descriptores para el parámetro localización de los centros poblados.

Tabla 67

Variable fragilidad ambiental: Parámetro localización de los centros poblados

Parámetro	Localización de los centros poblados	Peso Ponderado	0.633
EXS70	Menos del 1.5 Km cerca del deslizamiento	PEXS70	0.503
EXS71	Entre 2 Km a 4.5Km cerca del deslizamiento	PEXS71	0.260
EXS72	Entre 5 Km a 7.5Km del deslizamiento	PEXS72	0.134
EXS73	Entre 8 Km a 10.5Km del deslizamiento	PEXS73	0.068
EXS74	≥ 11 Km del deslizamiento	PEXS74	0.035

Nota. Elaboración Propia

En la Tabla 68, se considera los siguientes descriptores para el parámetro ecosistemas.

Tabla 68

Variable fragilidad ambiental: Parámetro ecosistemas

Parámetro	Ecosistemas	Peso Ponderado	0.260
EXS75	Destrucción del hábitat natural	PEXS75	0.503
EXS76	Contaminación de los ecosistemas	PEXS76	0.260
EXS77	Sobreexplotación de los recursos	PEXS77	0.134
EXS78	Especies Amenazadas	PEXS78	0.068
EXS79	Cambio climático	PEXS79	0.035

Nota. Elaboración Propia

Los pobladores desconocen en su mayoría los objetivos del proyecto, lo que da lugar a interpretaciones inexactas del mismo, que hacen que la comunidad difunda falsedades que no corresponden con la realidad y perjudican los buenos vínculos con la empresa. Tampoco son conscientes de los beneficios que, por ejemplo, el establecimiento de acuerdos de uso del suelo podría reportar a la zona y a sus residentes. Los residentes piensan que las consecuencias de la contaminación por polvo y ruido, que ahora sufren, empeorarán con la ampliación de la presa de relaves (Almerco, 2014). Ver Tabla 69.

Tabla 69

Variable fragilidad ambiental: Parámetro explotación de los recursos

Parámetro	Explotación de los recursos	Peso Ponderado	0.106
EXS80	Uso indiscriminado de los recursos	PEXS80	0.503
EXS81	Desperdicios, químicos altamente contaminantes	PEXS81	0.260
Descriptores	EXS82 Desconocimiento por parte de los pobladores	PEXS82	0.134
EXS83	Escasez de los recursos	PEXS83	0.068
EXS84	Extracción de los recursos de manera responsable	PEXS84	0.035

Nota. Elaboración Propia

Una vez obtenidos todos los valores de la variable fragilidad ambiental, en la Tabla 70 se muestra un resumen del valor de la fragilidad ambiental.

Tabla 70

Variable fragilidad ambiental: Resumen de valor de fragilidad ambiental

Localización de los centros poblados		Ecosistemas		Explotación de los recursos		Valor
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	0.464
0.503	0.633	0.503	0.260	0.134	0.106	

Nota. Elaboración Propia

4.2.3.3 Resiliencia ambiental

La mina es responsable de vigilar la estabilidad del depósito de relaves; en sus instalaciones hay empleados técnicos calificados y formados; sin embargo, un porcentaje de la población está formado, pero no empleado; esto se puede identificar una vez que se produce el fenómeno.

En la Tabla 71, se considera los siguientes descriptores para el parámetro capacitación de la población.

Tabla 71*Variable resiliencia ambiental: Parámetro capacitación de la población*

Parámetro	Capacitación de la población	Peso Ponderado	0.633	
Descriptores	EXS85	Desconocimiento total en temas medio ambientales	PEXS85	0.503
	EX86	Desconocimiento parcial en temas medio ambientales	PEXS86	0.260
	EXS87	Escasa capacitación	PEXS87	0.134
	EXS88	Capacitación sin aplicación	PEXS88	0.068
	EXS89	Capacitación y aplicación	PEXS89	0.035

Nota. Elaboración Propia

En la Tabla 72, se considera los siguientes descriptores para el parámetro gestión ambiental.

Tabla 72*Variable resiliencia ambiental: Parámetro gestión ambiental*

Parámetro	Gestión ambiental	Peso Ponderado	0.503	
Descriptores	EXS90	No existe gestión ambiental	PEXS90	0.503
	EXS91	No existen investigaciones ambientales	PEXS91	0.260
	EXS92	No existe lineamiento de formalización y gestión	PEXS92	0.134
	EXS93	Desconocimiento del manejo de residuos	PEXS93	0.068
	EXS94	Cumple con los estándares de gestión ambiental	PEXS94	0.035

Nota. Elaboración Propia

Según los entrevistados, los pobladores del área de influencia directa podrían desarrollarse los siguientes programas sociales: obras de infraestructura física como carreteras, canales de riego, aulas escolares, centros médicos, capacitación agrícola, minera y ambiental, saneamiento y abastecimiento de agua potable. Debido a que las reacciones en el área de influencia indirecta son limitadas, no son muy significativas (Almerco, 2014). Ver Tabla 73.

Tabla 73

Variable resiliencia ambiental: Parámetro capacitación en seguridad ambiental y salud del personal minero

Parámetro	Capacitación en seguridad ambiental y salud del personal minero	Peso Ponderado	0.106
EXS95	Desconocimiento total en temas medio	PEXS95	0.503
EXS96	Desconocimiento parcial en temas medio	PEXS96	0.260
EXS97	Escasa Capacitación	PEXS97	0.134
EXS98	Capacitación sin control ni aplicación	PEXS98	0.068
EXS99	Capacitación y aplicación	PEXS99	0.035

Nota. Elaboración Propia

Como resultado, se obtiene la Tabla 74 como resumen de los valores de resiliencia medioambiental, lo que nos permite calcular el valor del componente ambiental.

Tabla 74

Variable resiliencia ambiental: Resumen de valor de resiliencia ambiental

Capacitación de la población		Gestión ambiental		Capacitación en seguridad ambiente y salud del personal minero		Valor
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	0.110
0.134	0.633	0.035	0.503	0.068	0.106	

Nota. Elaboración Propia

Una vez obtenidos todos los valores de la variable resiliencia ambiental, en la Tabla 75 se muestra un resumen del valor de la dimensión ambiental.

Tabla 75

Valor de vulnerabilidad: Dimensión ambiental

Exposición Ambiental		Fragilidad Ambiental		Resiliencia Ambiental		Dimensión Ambiental
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	0.137
0.094	0.633	0.464	0.106	0.110	0.260	

Nota. Elaboración Propia

Finalmente, el valor de vulnerabilidad puede calcularse utilizando el valor final de la dimensión ambiental.

4.2.4 Valor total de vulnerabilidad

Una vez obtenidos los valores de los componentes social, económico y medioambiental, se obtiene el valor final de vulnerabilidad, como se ilustra en la tabla 76.

Tabla 76

Valor total de vulnerabilidad

Dimensión Social		Dimensión Económica		Dimensión Ambiental		Valor de la Vulnerabilidad
Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	Descriptor	Peso Ponderado	0.141
0.144	0.633	0.132	0.106	0.137	0.260	

Nota. Elaboración Propia

Como se puede observar, el valor de vulnerabilidad es de 0.141, el cual se encuentra dentro del rango de valores de vulnerabilidad designados como Alta Vulnerabilidad por el CENEPRED.

4.2.5 Análisis de valor de riesgo

Por último, el valor del riesgo se obtiene multiplicando las cifras de peligro y vulnerabilidad mencionadas anteriormente. Ver Tabla 77.

Tabla 77

Valor del riesgo

Valor Peligro	Valor Vulnerabilidad	Valor de Riesgo
0.226	0.141	0.032

Nota. Elaboración Propia

4.3 Matrices con componentes geotécnicos

Para ofrecer un estudio más objetivo, este subcapítulo incluirá nuevos parámetros cuantitativos. Éstos se han recopilado a través del análisis de estabilidad del caso práctico. Las nuevas características que se incluirán son el "Factor de Seguridad Estático" y el "Factor de Seguridad Pseudoestático", que tendrán un impacto directo en la identificación del peligro y la susceptibilidad, respectivamente, para calcular el nivel de peligro. (De La Cruz y Valderrama, 2021)

4.3.1 Identificación del peligro

En cuanto al nuevo parámetro, el factor de seguridad estático, se incluirá en la identificación de peligros a que se refiere la Tabla 6, que anteriormente daba los siguientes parámetros: pendiente, material del dique, capacidad de la estructura y erosión. Dado que se requiere la sección más representativa del dique para completar un análisis de estabilidad y determinar el Factor de Seguridad Estático, el Factor de Seguridad Estático sustituiría a los parámetros de pendiente y material del dique. Esta sección cubre la

pendiente y los estratos, que se correlacionan con el material del dique en este ejemplo (De La Cruz y Valderrama, 2021). Como se ilustra en la Tabla 78.

Tabla 78

Parámetros con componentes geotécnicos - Identificación del peligro

Deslizamiento del Depósito de Relaves	Factor de Seguridad Estático	Capacidad de la Estructura	Erosión
Factor de Seguridad Estático	1.00	3.00	5.00
Capacidad de la Estructura	1/3	1.00	3.00
Erosión	1/5	1/3	1.00
Suma	1.53	4.33	9.00
1/Suma	0.65	0.23	0.11

Nota. Elaboración Propia

El factor de seguridad estático para condiciones normales debe tener un valor mínimo de 1,5.

4.3.2 Susceptibilidad

Los coeficientes sísmicos dan lugar a un nuevo parámetro, el Factor de Seguridad Pseudoestático.

En consecuencia, al insertar el parámetro Factor de Seguridad Pseudoestático en la Tabla 28 de factores desencadenantes, se reemplazaría el parámetro desencadenante Vibración Sísmica. Como resultado, tal y como se indica en la Tabla 79, se crea un nuevo componente:

Tabla 79

Variables con componentes geotécnicos – Factores desencadenantes

Parámetros de evaluación	Factor de Seguridad Pseudoestático	Inducido por la Acción Humana	Precipitación Promedio Anual
Factor de Seguridad Pseudoestático	1.00	3.00	5.00
Inducido por la Acción Humana	1/3	1.00	3.00
Precipitación Promedio Anual	1/5	1/3	1.00
Suma	1.53	4.33	9.00
1/Suma	0.65	0.23	0.11

Nota. Elaboración Propia

Se observa que el parámetro con el ponderado mayor es el Factor Pseudoestático, que tiene en cuenta las características geológicas y sismogénicas del sector. En segundo lugar,

se tiene en cuenta el parámetro Inducido por la Acción Humana, debido a que se ampliará el depósito de relaves, pudiendo provocar inestabilidad en los taludes. Por último, las precipitaciones, que, según los informes hidrológicos, en la zona de estudio, la mayor precipitación se registra en los meses de diciembre a abril y la mínima en los meses de mayo a noviembre, los meses más cálidos son de junio a septiembre y los más fríos de octubre a mayo.

4.3.3 Análisis de peligrosidad con matrices con componentes geotécnicos

Considerando los nuevos parámetros factor de seguridad estático y pseudoestático los cuales fueron 1.51 y 1.06 respectivamente, según el análisis de estabilidad realizado en la sección más representativa del depósito de relaves. Estos valores se asignarán a los descriptores respectivos, como se indica en las Tablas 80 y 81 (SRK Consulting, 2022).

Figura 46

Tablas resumen de los factores de seguridad obtenidos en los análisis de estabilidad física.

En la Tabla 5 y Tabla 6 se presenta un resumen de los factores de seguridad obtenidos en los análisis de estabilidad física. Los detalles de los análisis se presentan en el anexo 6.1.3.1.

Tabla 5: Factores de seguridad de los depósitos de relaves filtrados (fallas globales)

Componente	Sección analizada	Estático (k=0.00)	Pseudoestático (k=0.16)
DRF Ramahuayco	Sección A	1.51	1.06
	Sección B	1.54	1.08

Fuente: SRK

Tabla 6: Factores de seguridad de los depósitos de relaves filtrados (fallas por zonas)

Componente	Zona/ Etapa	Sección analizada	Estático (k=0.00)	Pseudoestático (k=0.16)
DRF Ramahuayco	A	Sección B	2.53	1.49
	B – Etapa 1	Sección B	1.66	1.19
	B – Etapa 2	Sección B	2.05	1.41
	B – Etapa 3	Sección B	1.89	1.32
	B – Etapa 4	Sección B	1.77	1.25

Fuente: SRK

A partir de los resultados obtenidos en la Tabla 5 y Tabla 6, se puede concluir que el depósito de relaves filtrados Ramahuayco, presenta condiciones aceptables de estabilidad en función a los requerimientos mínimos de seguridad establecidos por el MEM

Nota. SRK Consulting, (2022)

En la Tabla 80, se muestra los factores de seguridad estático obtenidos del programa Slide para la sección más representativa.

Tabla 80*Identificación de peligrosidad: Factor de seguridad estático*

Parámetro	Factor de Seguridad Estático	Peso Ponderado	0.633
FSE1	< a 1.5	PFSE1	0.503
FSE2	1.50 a 1.75	PFSE2	0.260
Descriptor FSE3	1.70 a 1.90	PFSE3	0.134
FSE4	1.90 - 2.10	PFSE4	0.068
FSE5	> a 2.10	PFSE5	0.035

Nota. Elaboración Propia

En la Tabla 81, se muestra los factores de seguridad pseudoestático obtenidos del programa Slide para la sección más representativa.

Tabla 81*Factores desencadenantes: Factor de seguridad pseudoestático*

Parámetro	Factor de Seguridad Pseudoestático	Peso Ponderado	0.633
FPSE1	0.75 - 0.80	FPFSE1	0.503
FPSE2	0.80 - 0.99	FPFSE2	0.260
Descriptor FPSE3	1.00 - 1.19	FPFSE3	0.134
FPSE4	1.20 - 1.39	FPFSE4	0.068
FPSE5	1.40 - 2.50	FPFSE5	0.035

Nota. Elaboración Propia

A continuación, en la Tabla 82, se determina la peligrosidad con parámetros geotécnicos

Tabla 82*Valor de peligrosidad: Parámetros geotécnicos*

Valor del Peligro		Valor de Susceptibilidad		Valor de Peligrosidad
Parámetro	Peso Ponderado	Parámetro	Peso Ponderado	
				0.256
0.240	0.500	0.272	0.500	

Nota. Elaboración Propia

Una vez obtenido el valor del peligro, se multiplica por la vulnerabilidad, que conserva su valor inicial porque sus parámetros no se han modificado. Ver Tabla 83.

Tabla 83*Valor de riesgo: Componentes geotécnicos*

Valor de Peligrosidad	Valor de Vulnerabilidad	Valor de Riesgo
Parámetro	Parámetro	
0.256	0.141	0.036

Nota. Elaboración Propia

Como resultado, como se muestra en la Tabla 82, el valor final de riesgo es de 0.036, el cual se encuentra dentro del rango de peligro especificado por el CENEPRED como Nivel de Riesgo Alto.

4.4 Medidas preventivas

4.4.1 Acciones preventivas

- 1) El correcto manejo del agua dentro del depósito de relaves es muy importante para la seguridad con que se opera, por ello lo más recomendable es realizar la permeabilidad de los residuos mineros iniciando del centro del depósito hacia los bordes.
- 2) Al verter los residuos mineros es recomendable realizarlo en diferentes puntos del perímetro del depósito de relaves para así formar una playa de baja pendiente para que los residuos sean dirigidos al centro donde se encuentra ubicado la laguna de decantación.
- 3) Al momento de realizar el vertido de los residuos mineros se debe hacer en distintos puntos del perímetro del depósito y así formar una playa de baja pendiente para que los residuos recién vertidos fluyan hacia el centro, donde se ubica la laguna de decantación.
- 4) Un ingeniero geotécnico con competencias específicas en presas de estériles debería realizar una evaluación completa de los parámetros de diseño y de todos los informes anteriores al menos una vez cada varios años. De este modo, se puede descubrir cualquier dificultad presente o potencial y ajustar en consecuencia el diseño o la construcción de la presa. Los informes de diseño y construcción son necesarios por este motivo; sin ellos, la información pertinente sólo puede obtenerse mediante perforaciones y muestreos, lo que resulta caro para la explotación.
- 5) En caso de inestabilidad del dique producido por evento no esperado, el personal y/o maquinaria debe alejarse fuera del curso hacia aguas abajo del área de deslizamiento y alejarse al menos 20 m del coronamiento del talud. Estabilización mediante berma a ubicarse al pie del dique o terraplén.

- 6) En caso de erosión de los taludes del depósito de relaves evitar acumulación de agua de lluvia a nivel de plataformas de desecación de relaves y evacuar las aguas mediante tuberías hacia aguas abajo alejado de los taludes del depósito de relaves.
- 7) En caso de un evento sísmico se realizará la evacuación de personal y maquinaria fuera del área del depósito de relaves y del área de la presa por un periodo de tiempo determinado considerando la intensidad del sismo.
- 8) Es importante realizar capacitaciones constantes al personal que se encuentra en operación durante un evento de riesgo. Asimismo, implementar sistemas de alerta anticipada y rutinas de evacuación para personas bajo riesgo ubicadas aguas debajo del depósito de relaves. También considerar la menor cantidad posible de personas que realizan trabajos de riesgo.
- 9) Verificación de instrumentación geotécnica para tener un correcto seguimiento y control del nivel freático.
- 10) Es importante continuar con el monitoreo topográfico, piezométrico e inclinómetro en el área del deslizamiento. Este debe ser permanente en el tiempo.
- 11) El personal debe tener la responsabilidad y autoridad para coordinar el desarrollo, implementación, evaluaciones periódicas y mejora continua. Solicitar informes periódicos de los responsables de actividades en procesos específicos relacionados con la seguridad del depósito sobre el estado de desempeño, informar sobre el desempeño a la alta dirección, también informar cualquier necesidad identificada para las mejoras de la seguridad del depósito, resolver conflictos potenciales entre requisitos mal diseñados y actividad y/o procesos relacionados con la seguridad del depósito.
- 12) Los estudios de rotura de presas e inundaciones son necesarios para respaldar la evaluación de las consecuencias de una posible falla de las presas mineras, al igual que las presas convencionales. Sin embargo, existen una serie de desafíos asociados con las roturas de presas de relaves porque la ciencia de predecir las roturas y los flujos de las presas de relaves es relativamente nueva. Las técnicas actuales para predecir las inundaciones por deslizamiento de flujo de relaves son limitadas y la letalidad de las fallas de las presas de relaves puede ser bastante diferente a la de las inundaciones por rotura de presas convencionales. Es necesario considerar las limitaciones para modelar con precisión los efectos de un deslizamiento de flujo de relaves al evaluar las consecuencias de la falla.
- 13) Dado que las condiciones ambientales y culturales asociadas con cada depósito de relaves pueden variar, se deben aplicar conocimientos especializados en los campos de

los ecosistemas, la tierra, la calidad del agua, la pesca y los valores culturales. Los criterios de clasificación y la terminología como “pérdida significativa” y “hábitat crítico” deben definirse y acordarse durante el proceso de revisión del diseño o seguridad, con aportes de especialistas y autoridades reguladoras. Debido a la dificultad de predecir los efectos ambientales y ecosistémicos de las liberaciones accidentales.

14) Se sugiere que las inspecciones visuales incluyan inspecciones realizadas por el propietario, inspecciones realizadas por un ingeniero calificado e inspecciones después de algún evento inusual. Para las presas de categoría de consecuencia baja, la frecuencia de inspección se puede realizar una vez cada dos años, dependiendo del riesgo del depósito. Para los depósitos de clasificación importante la frecuencia de la inspección podría ser anualmente a cada dos años, dependiendo del riesgo. Para depósitos en la categoría de consecuencias altas a extremas, las inspecciones deben realizarse semestralmente o anualmente según el riesgo.

15) La frecuencia sugerida para revisiones oscila entre cinco a 10 años dependiendo de la consecuencia de la falla y cambios en el depósito; deberá cumplirse cualquier requisito regulatorio como mínimo, pero es posible que se justifiquen revisiones más frecuentes dependiendo de sus riesgos. Es posible que los depósitos de consecuencias bajas no necesiten revisión de seguridad de presas, pero las condiciones de sub fallan deben realizarse cierto tiempo para su revisión.

16) El diseño de un depósito de relaves debe cumplir con los requisitos del proyecto tal como se definen en el momento del diseño. A menudo, una mina se expandirá y dará como resultado un aumento en el tamaño del depósito de relaves. El diseño debe tener en cuenta la posibilidad en el aumento del tamaño. Además, el diseño debe considerar la posibilidad de que pueda haber una suspensión temporal, de las actividades mineras, debido a razones económicas o ambientales.

17) Por lo tanto, el diseñador necesita considerar las condiciones de carga y establecer factores de seguridad (ver Figura 47) que sean apropiados para la presa minera en cuestión. Un factor de seguridad de 1,3 puede ser aceptable durante la construcción de una presa donde las consecuencias podrían ser menores y Se toman medidas durante la construcción para gestionar el riesgo, como inspección detallada, instrumentación, etc. Pero el factor de seguridad de 1,3 no debe adoptarse simplemente porque es el "fin de la construcción". Generalmente se ha adoptado un factor de seguridad de 1,5 para las presas de relaves debido a las posibles consecuencias de una falla.

Figura 47

Factores de seguridad objetivo para la estabilidad de taludes en las fases de construcción, operación y transición - evaluación estática

Table 3-4. Target Factors of Safety for Slope Stability in Construction, Operation, and Transition Phases - Static Assessment

Loading Condition	Minimum Factor of Safety	Slope
During or at end of construction	> 1.3 depending on risk assessment during construction	Typically downstream
Long term (steady state seepage, normal reservoir level)	1.5	Downstream
Full or partial rapid drawdown	1.2 to 1.3	Upstream slope where applicable

Table 3-5. Target Factors of Safety for Slope Stability in Construction, Operation, and Transition Phases - Seismic Assessment

Loading Condition	Minimum Factor of Safety
Pseudo-static	1.0
Post-earthquake	1.2

Nota. CDA (2019)

4.4.2 Plan de contingencia

A continuación, se presenta el plan de contingencia perteneciente a Catalina Huanca para el manejo de depósitos de relaves filtrados Ramahuayco, el cual tiene como objetivo establecer mecanismos de comunicación y coordinación de procedimientos a desarrollar; así como también cumplir con las normas y acciones de seguridad a fin de mitigar accidentes, efectos para la salud y el medio ambiente.

4.4.2.1 Comité central de emergencias

El comité central de emergencias se encuentra conformado por funcionarios de alta dirección, profesionales del staff, supervisores pertenecientes a la empresa. Previamente fueron escogidos y capacitados para accionar ante cualquier tipo de riesgo y respuesta del plan de contingencia, ver Figura 48.

Figura 48

Comité central de emergencias

Nombre	Cargo	Responsabilidades
Coordinador General	Superintendente General	Responsable de llevar a cabo el Plan de contingencias
Coordinador de Operaciones	Jefe del Programa de Seguridad y Medio Ambiente	Es el Encargado de supervisar la labor de las brigadas
Coordinador de Comunicaciones	Secretario	Responsable de dar aviso al personal y a las instituciones de apoyo externo.
Coordinador de Equipos	Jefe de Almacén	Responsable de la administración de los equipos de protección.
Coordinador de Ingreso y Salida	Jefe de mantenimiento mecánico	Responsable del traslado de personal durante una evacuación. Asimismo, supervisa la llegada de las instituciones de apoyo externo.

Nota. Catalina Huanca S.A.C (2020)

4.4.3 Plan de respuesta ante emergencias

A continuación, se presentan la Figura 49, Figura 50, Figura 51, Figura 52, Figura 53 y Figura 54, pertenecientes a los planes de respuesta ante emergencia.

Figura 49

Cartilla de respuesta ante emergencias

CARTILLA DE RESPUESTA ANTE EMERGENCIAS

a. Trabajador involucrado en la emergencia debe:

- Mantener la calma
- Si está preparado para controlar el tipo de emergencia, ¡HÁGALO!, de lo contrario aléjese a un lugar seguro
- Comunicar inmediatamente al Teléfono de emergencias:
 - Anexo: 330
 - RPC: 989581994
 - Radio: Frecuencia 1 – Brigada de Emergencia
- Proporcionar la información apropiada y necesaria
- Indicar el lugar exacto de ocurrencia de la emergencia

b. Quien recibe el aviso, deberá solicitar la siguiente información:

- Hora (aproximada de ser el caso) de ocurrida la emergencia
- Nombre y área del trabajador que reporta
- Descripción breve de la emergencia y gravedad
- Número de personas accidentadas y su condición
- Elemento del medio ambiente dañado o con potencial de daño.
- Posible derrame de material peligroso, identificarlo

c. Zonas Seguras

- Todo el personal deberá dirigirse a las zonas seguras (Plano de Identificación de zonas seguras indicadas en los Mapas de Riesgo)

d. *Sistemas de Alarma y Comunicación*

- En Superficie: se tienen sirenas en Campamento y Planta Concentradora.
- En superficie: por radio, teléfono y celulares
- En Interior Mina: Gas etanethiol (gas fétido) para evacuación
- De Interior Mina a superficie: por teléfono
- En caso de reporte de emergencia mantener silencio radial

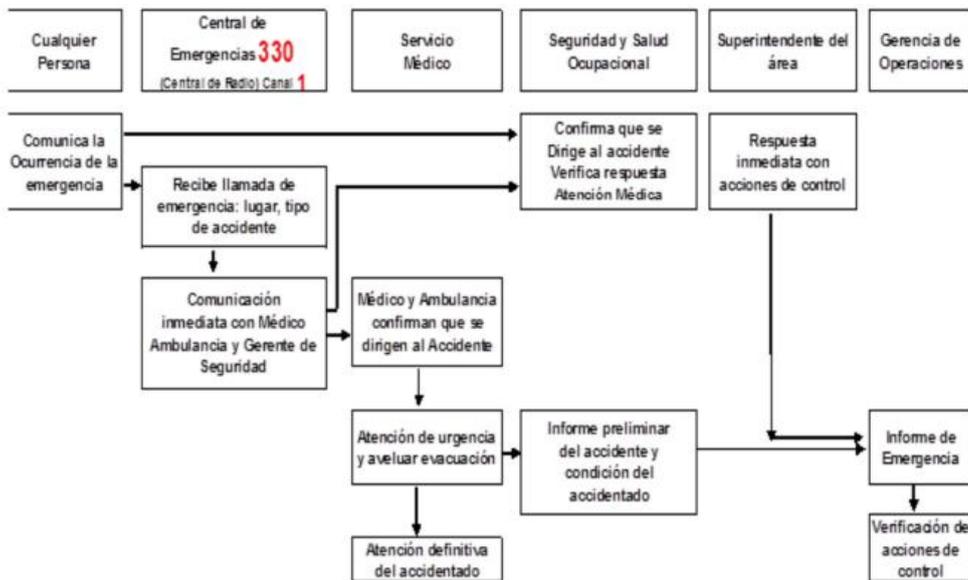
e. *Central de Emergencia:*

- Brigada de Emergencia: Anexo 330, RPC 989581994
- Gerencia de Seguridad: Anexo 328
- Superintendencia de Medio Ambiente: Anexo 361
- Policlínico: Anexo 310

Nota. Catalina Huanca S.A.C (2020)

Figura 50

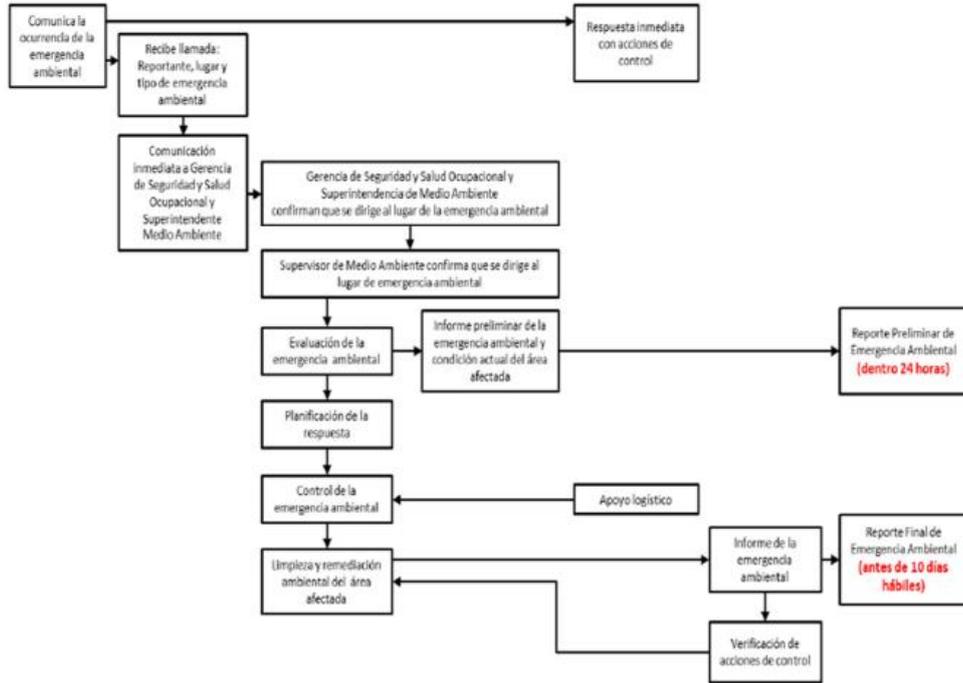
Comunicaciones



Nota. Catalina Huanca S.A.C (2020)

Figura 51

Caso de emergencias ambientales



Nota. Catalina Huanca S.A.C (2020)

Figura 52

Reporte de emergencia

INFORME DE: > SITUACIÓN DE EMERGENCIA > ACCIDENTE		N° INFORME: FECHA: <input type="checkbox"/> REAL <input type="checkbox"/> SIMULACRO
INFORMACIÓN GENERAL Y DESCRIPCIÓN		
Fecha y hora de ocurrencia:	Fecha de notificación:	
Lugar de ocurrencia:		
Descripción:		
Medidas inmediatas adoptadas:		
ANÁLISIS		
¿Es la primera vez que ocurre? <input type="checkbox"/> SI <input type="checkbox"/> No (especificar):		
Estudio de las causas:		
¿Es necesario revisar algún procedimiento de respuesta (Plan de Emergencia, etc)?: <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> SI Código doc.:		
¿Procede la apertura de Acción Correctiva / Preventiva? <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> SI n° de Informe:		
CIERRE		
Comprobaciones realizadas:		Fecha y firma

Nota. Catalina Huanca S.A.C (2020)

Figura 53

Medidas de contingencia

Evento	Descripción	Tipo de evento	Medida de contingencia	Actividad post evento
Eventos Hidrológicos				
H 1	Lluvias normales - Eventos de precipitación con periodo de retorno menor a 10 años - 24 hr - equivalentes a 35mm	Eventual - ocurre en época de lluvias: diciembre - abril	Área de desecación de relaves con pendiente de 1%, hacia el estribo izquierdo. Las aguas colectadas serán descargadas mediante 1 tubería de HDPE tipo ADS de 4"	Reconocimiento de la plataforma de desecado de relaves y zona de descarga del agua de lluvia
H2	Lluvias moderadas a fuertes - Eventos de precipitación con periodo de retorno menor a 100 años - 24 horas - equivalente a 35 a 52 mm	Eventual - puede ocurrir en época de lluvias: diciembre - abril	Área de desecación de relaves con pendiente de 1%, hacia el estribo izquierdo. Las aguas colectadas serán descargadas por tuberías de HDPE tipo ADS de 4"	Reconocimiento de la plataforma de desecado de relaves y zona de descarga del agua de lluvia y verificación de erosión en relaves depositados y estribos del depósito de relaves
H 3	Lluvias extraordinarias - eventos de precipitación con periodo de retorno mayor a 100 años - 24 hr equivalente a 52mm hasta 67 mm	Eventual - puede ocurrir en época de lluvias: diciembre - abril	Área de desecación de relaves con pendiente de 1%, hacia el estribo izquierdo. Las aguas colectadas serán descargadas por 2 tuberías de HDPE tipo ADS de 4 y 6"	Reconocimiento de la plataforma de desecado de relaves, zona de descarga del agua de lluvia y verificación de erosión en relaves depositados y estribos del depósito de relaves.
Eventos Sociales				
S 1	Sismos moderados a leves- Sismos de intensidad IV o inferior en la escala de Mercalli Modificado	Eventual - ocurre en cualquier momento	Evacuación de personal y maquinaria fuera del área del depósito de relaves por un periodo de tiempo de 1 hora luego de ocurrido el sismo	Reconocimiento de la plataforma de desecado de relaves en las zonas del coronamiento del talud, reconocimiento del área de la presa y toma de datos de la instrumentación geotécnica de la presa y depósito de relaves.
S 2	Sismos fuertes a terremotos- Sismos de intensidad IV o mayor en la escala de Mercalli Modificado	Eventual - ocurre en cualquier momento	Evacuación de personal y maquinaria fuera del área del depósito de relaves y del área de la presa por un periodo de tiempo de 12 hora luego de ocurrido el sismo	Reconocimiento del depósito de relaves, presa Pahuaypille, taludes de los caminos de acceso y operación. Toma de datos de la instrumentación geotécnica de la presa y del depósito de relaves, y visita técnica de inspección de personal especializado antes de las 24 hr de ocurrido el sismo
ocurrido el evento sísmico				
MR 1	Humedad de desecación de relaves antes de la compactación mayor a 14% del depósito de relaves	Operacional- puede ocurrir en cualquier momento durante la operación	Proceder a extender los relaves a crear surcos mediante discos de arado de 35 cm de profundidad y dejar desecar por 8 horas. Luego de lo cual repetir el proceso cambiando la orientación del arado en forma perpendicular al arado anterior de manera de facilitar el desecado.	Verificación in situ del contenido de la densidad mediante densímetro nuclear (norma ASMT D-2422) o cono de arena y toma de muestra para verificación en laboratorio del contenido de humedad (norma ASTM D-422)
MR 2	Densidad seca de compactación menor a 1.86 t/m ³	Operacional- puede ocurrir en cualquier momento durante la operación del depósito de relaves	Verificar el contenido de humedad y compactar mediante la pasada de rodillo liso de 10 ton las veces que sea necesario para alcanzar la densidad seca de 1.86 t/m ³	Verificación in situ del contenido de la densidad mediante densímetro nuclear (norma ASMT D-2422) o como de arena

Nota. Catalina Huanca S.A.C (2020)

Figura 54

Medidas de contingencia

ocurrido el evento sísmico				
MR 3	Nivel freático o presencia de suelos saturados a una profundidad menor a 20 m debajo del nivel superficial que tengan los relaves.	Operacional- puede ocurrir durante la operación del depósito de relaves	Priorizar la descarga de relaves filtrados en áreas alejadas del área donde se detectó la saturación e informar al jefe de operación del depósito de relaves.	Verificar el área de extensión de saturación mediante inspección de todos los piezómetros Casagrande instalados y de ser necesario programar la instalación de algún piezómetro Casagrande adicional que corrobore la extensión del área saturada. El diseñador deberá ser informado para que emita.
Monitoreo Geotécnico - Área presa de relaves				
MP 1	Monitoreo de alineación del eje de la presa presentan movimientos mayores a 10 cm	Eventual - evento no esperado que ocurra	Verificación inmediata (no mayor a 1 día de detectado el evento) del alineamiento de la presa mediante un nuevo control topográfico. Verificar la presencia de agrietamientos. De existir agrietamientos se deberá restringir el acceso al pie de la presa hasta que emita diagnóstico de la estabilidad de la presa por parte del consultor de CHSM. De no haber agrietamientos, podrá haber accesos al área de la presa y se deberá solicitar se emita diagnóstico de la estabilidad de la presa por parte del consultor de CHSM	Verificación del área del coronamiento de la presa y alrededores para identificar la presencia de agrietamientos y asentamientos. Emitir información de controles topográficos, inspecciones visuales y control del nivel de agua en el área de la presa al consultor geotécnico especializado para emitir opinión.
MP 2	Monolitos topográficos instalados a nivel de coronamiento del talud de aguas debajo de la presa experimentan movimientos mayores a 10 cm	Eventual - evento no esperado que ocurra	Verificación inmediata (no mayor a 1 día de detectado el evento) del alineamiento de la presa mediante un nuevo control topográfico. Verificar la presencia de agrietamientos. De existir agrietamientos se deberá restringir el acceso al pie de la presa hasta que emita diagnóstico de la estabilidad de la presa por parte del consultor de CHSM. De no haber agrietamientos, podrá haber accesos al área de la presa y se deberá solicitar se emita diagnóstico de la estabilidad de la presa por parte del consultor de CHSM	Verificación del área del coronamiento de la presa y alrededores para identificar la presencia de agrietamientos y asentamientos. Emitir información de controles topográficos, inspecciones visuales y control del nivel de agua en el área de la presa al consultor geotécnico especializado para emitir opinión.
MP 3	Nivel de embalse sobre la cota 3519 msnm	Eventual - evento esperado en época de lluvias entre los meses de Diciembre a Abril	Si el nivel de filtraciones colectadas son menores a 3 l/s y si el nivel de agua sobre el terreno de fundación de la presa es menor a 10 m, no hay medida de contingencia	No se requiere ninguna. De requerirse utilizar el agua embalsada, se deberá bombear lentamente a razón de 4 l/s como máximo.
MP 4	Variaciones bruscas del nivel freático (mayores a 1 m en un periodo de tiempo de 15 días o menor) medido en la caseta de instrumentación	Eventual - evento no esperado	Verificación de la instrumentación geotécnica y verificar si es una medición errática que sube y baja en valores, con diferencias mayores a 10 cms. La verificación deberá ser interdiaria y por 15 días calendario. Se deberá verificar al mismo tiempo las variaciones del nivel de embalse.	Verificación mediante la lectura del instrumento que reporta estas filtraciones durante 15 días e interdiario y envío de esta información al proveedor para que emita opinión.

Nota. Catalina Huanca S.A.C (2020)

4.7 Análisis o discusión de resultados

En base al análisis desarrollado por valores numéricos o pesos obtenidos mediante el proceso de análisis Jerárquico del Cenepred, se analizó por el método de Satty que se considera un método Cualitativo ya que está basado en la experiencia y observaciones de campo debido a la inexistencia de información del fenómeno de origen natural sobre el área geográfica de estudio, y por el método de parámetros geotécnicos ya que este último está relacionado con información realizada del propio diseño y posee estudios técnicos in situ que genera información actualizada que ayuda al conocimiento de los peligros, las vulnerabilidades y los riesgos el cual se considera un método cuantitativo siendo más preciso.

Como resultado se obtuvo que el riesgo y la vulnerabilidad está en un rango Alto, según los parámetros establecidos por el Cenepred. por ende, se propone medidas preventivas, para mitigar el riesgo por deslizamiento.

CONCLUSIONES

1. Luego de realizar la evaluación de riesgo se obtuvo el nivel de peligrosidad el cual fue de 0.226 ubicándose en la tabla de nivel de peligrosidad como peligro alto para lo cual intervino los factores condicionantes y desencadenantes para lo cual se propone capacitar al personal de operación durante un evento de riesgo, así como continuar con un constante monitoreo topográfico y la utilización de piezómetros e inclinómetros en el área determinada.
2. Se encontró el nivel de vulnerabilidad en el cual intervino las dimensiones social, económica y ambiental obteniendo un resultado de 0.141 encontrándose en el rango de vulnerabilidad alta.
3. Habiendo evaluado el riesgo por deslizamiento del recremento del depósito de relaves Ramahuayco aplicando el manual del Cenepred, se encontró que el valor del riesgo se ubica dentro del Nivel de Riesgo Alto.
4. Para la evaluación de riesgos según el manual de Cenepred se analizaron los parámetros de Peligro y vulnerabilidad con sus respectivos descriptores en base a un análisis jerárquico según la metodología Saaty, se obtuvo el nivel de riesgo alto, del resultado de la evaluación se propuso medidas preventivas que permita mitigar y mejorar las condiciones del riesgo.

RECOMENDACIONES

1. Se recomienda realizar más investigaciones utilizando el manual Cenepred para los diferentes riesgos asociados al depósito de relaves a fin de definir medidas generales para la gestión de riesgos.
2. Para realizar una adecuada evaluación de riesgos es importante conocer la zona de estudio, sus características geográficas y propiedades geotécnicas para establecer correctos criterios de medición.
3. Se recomienda utilizar herramientas tecnológicas que permitan detectar a tiempo cualquier anomalía que perjudique o impacte el depósito de relaves para disminuir el riesgo.
4. Se recomienda realizar capacitaciones y programas sociales a la población porque la actividad minera en la zona ha tenido históricamente un impacto significativo en la economía local, así como la agricultura y ganadería que son los sectores más vulnerables en caso de deslizamiento.

REFERENCIAS

- Arias, C. (2021) *Mejoramiento de la gestión de una presa de relaves para disminuir los riesgos ambientales y de seguridad*. Recuperado de: <https://repositorio.unsa.edu.pe/items/999df843-24f4-4a05-9255-111132a76ff0/full>
- Cenepred (2014) *Manual para la Evaluación de Riesgos Originados por Fenómenos Naturales – 2da Versión*. Recuperado de: https://www.cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/Guia_Manuales/Manual-Evaluacion-de-Riesgos_v2.pdf
- Canadian Dam Association (2019), *Application of Dam Safety Guidelines to Mining Dams*.
- De la Cruz, S. (2017). *Evaluación del fallo de presas de relaves con el método del árbol de fallos*. Recuperado de: https://oa.upm.es/46944/1/TFM_Sonny_Cruz_Fernandez.pdf
- De la Cruz, Y y Valderrama, E. (2021). *Evaluación del riesgo de deslizamiento de un depósito de relave inoperativo en la Cabecera de cuenca del Río Rímac, Chicla – Huarochirí – Lima considerando variables geotécnicas en el proceso de análisis jerárquico*. Recuperado de: https://repositorioacademico.upc.edu.pe/bitstream/handle/10757/658816/De%20La%20Cruz_GY.pdf?sequence=3&isAllowed=y
- Herrera, J. (2008) *Seguridad, salud y prevención de riesgos en minería*. Recuperado de: https://oa.upm.es/10673/8/SEGURIDAD_Y_SALUD_EN_MINERIA_080509_2.pdf
- Huallpa, M. y Medina, S. (2020) *Análisis comparativo entre los métodos de recrecimiento en un depósito de relaves Tipo Pulpa en Cajamarca* Recuperado de: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/3556>
- Montaño, B. (2021). *Diseño de un plan de manejo ambiental para mitigar impactos generados por la explotación minera artesanal en Camilo Ponce Enríquez*. Recuperado de: <https://cia.uagraria.edu.ec/Archivos/MONTA%C3%91O%20BELTRAN%20ERICKA%20TATIANA.pdf>
- Morales, L. (2019) *Control de calidad CQC para el recrecimiento de la presa de relaves de la U.E.A. Animón – Pasco – 2018*. Recuperado de: http://repositorio.undac.edu.pe/bitstream/undac/1425/1/T026_70495262_T.pdf

- Morrill, J., Chambers, D., Emerman, S., Harkinson, R., Kneen, J., Lapointe, U., Maest, A., Milanez, B., Personius, P., Sampat, P., y Turgeon, R. (2022) *La seguridad ante todo: Lineamientos para el manejo responsable de relaves*. Recuperado de: <https://earthworks.org/wp-content/uploads/2022/09/La-seguridad-ante-todo-2da-vers..pdf>
- Olaya, E. y Sevillano, B.(2019) Análisis comparativo entre método aguas abajo y suelo reforzado para el recrecimiento de la presa de relaves Viluyo. Recuperado de: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/2720>
- Paullo, V. y Segovia, M. (2020) *Evaluación de riesgo geotécnico de la presa de relave N°03 en la Unidad Minera Pallancata* Recuperado de: <https://repositorio.urp.edu.pe/handle/20.500.14138/3724>
- PMBok. (2017). *Guía Fundamentos para la Dirección de Proyectos*
- Rodriguez, R. y Odelcop, L. (2011). *Funcionamiento hidráulico, estabilidad y mecanismos de rotura de presas de relaves mineros*. Recuperado de: https://www.academia.edu/49238164/Funcionamiento_Hidr%C3%A1ulico_Estabilidad_y_Mecanismos_De_Rotura_De_Presas_De_Relaves_Mineros
- Sernageomin (2014). *Guía metodológica de evaluación de riesgos para el cierre de faenas mineras*. Recuperado de: <https://www.sernageomin.cl/wp-content/uploads/2017/11/14.03.24-GuiadeEvaluaciondeRiesgosparaelCierreFaenasMineras.pdf>
- Shui-Quan Lin y Guang-Jjin Wnag, 2022. *Regional Distribution and Causes of Global Mine Tailings Dam Failures*. Recuperado de: <https://www.mdpi.com/2075-4701/12/6/905>.
- Solier, R. y Vento, L. (2021) *Propuesta de plan de gestión de riesgos para la ejecución del sistema de estabilización de soil nailing y muro de contención en el acantilado de la costa verde – miraflores*. Recuperado de: <https://repositorio.usil.edu.pe/bitstreams/2e9ef3da-97d5-48d1-9537-cd1ac3100d65/download>
- Valenzuela, L. (2016). *Design, construction, operation and the effect of fines content and permeability on the seismic performance of tailings sand dams in Chile*. Recuperado de: <https://www.scielo.cl/pdf/oy/n19/art01.pdf>
- Van K. (2019) *Los depósitos de relaves en Ecuador y sus riesgos socio-ambientales*. Recuperado de: <https://geografiacriticaecuador.org/wp->

<content/uploads/2020/08/Van-Teijlingen-2019-Informe-sobre-los-riesgos-de-las-relaveras.pdf>

Zandarín, M. (2021). *Normativa, gestión de riesgos y experiencia sobre depósitos de relaves en Chile*. Recuperado de:

https://www.igme.es/boletin/2021/132_4/BGM_132-4_Art-12.pdf

ANEXOS

Anexo A: Matriz de consistencia

Problema	Objetivo	Hipótesis	Variable	Indicadores
Problema general	Objetivo general	Hipótesis principal	Variable independiente	
¿Cómo evaluar el riesgo de deslizamiento del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco a fin de proponer medidas preventivas?	Evaluar el riesgo de deslizamiento del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco a fin de proponer medidas preventivas.	Al evaluar el riesgo de deslizamiento del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco se puede proponer medidas preventivas.	Riesgo de deslizamiento	Estudios de Ingeniería básica Parámetros geotécnicos
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis secundarias	Variable dependiente	
¿En qué medida el nivel de peligrosidad del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco influye en las acciones preventivas?	Determinar el nivel de peligrosidad del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco a fin de proponer acciones preventivas.	Al analizar el nivel de peligrosidad del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco, se puede proponer acciones preventivas.		Probabilidad de ocurrencia
¿En qué medida el nivel de vulnerabilidad del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco influye en el plan de contingencia?	Determinar el nivel de vulnerabilidad del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco a fin de evaluar el plan de contingencia.	Al analizar el nivel de vulnerabilidad del recrecimiento del depósito de Relaves Ramahuayco, se puede evaluar el plan de contingencia.	Medidas Preventivas	Impacto
¿En qué medida el nivel de riesgo del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco influye en el plan de respuesta ante emergencias?	Determinar el nivel de riesgo del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco a fin de evaluar el plan de respuesta ante emergencias.	Al analizar el nivel de riesgo del recrecimiento del depósito de relaves Ramahuayco, se puede evaluar el plan de respuesta ante emergencias.		Incidencia

Nota. Elaboración Propia

