

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE
FACULTAD DE INGENIERÍA**



Optimización del control de estabilidad de la presa de depósitos de
relaves Mahr Túnel mediante instrumentación y monitoreo geotécnico
avanzado

**TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA
OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL**

AUTOR

Yasser Reymundo Fiestas Chuquispuma

ASESOR

Julio Christian Quesada Llanto

Lima, Perú
2023

METADATOS COMPLEMENTARIOS

Datos del autor

Nombres	YASSER REYMUNDO
Apellidos	FIESTAS CHUQUISPUMA
Tipo de documento de identidad	DNI
Número del documento de identidad	70378116
Número de Orcid (opcional)	

Datos del asesor

Nombres	JULIO CHRISTIAN
Apellidos	QUESADA LLANTO
Tipo de documento de identidad	DNI
Número del documento de identidad	42831273
Número de Orcid (obligatorio)	0000-0003-4366-4926

Datos del Jurado

Datos del presidente del jurado

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	DNI
Número del documento de identidad	

Datos del segundo miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	DNI
Número del documento de identidad	

Datos del tercer miembro

Nombres	
Apellidos	
Tipo de documento de identidad	DNI
Número del documento de identidad	

Datos de la obra

Materia*	Monitoreo geotécnico, instrumentación geotécnica, telemetría, tecnologías modernas, gestión de relaves.
Campo del conocimiento OCDE Consultar el listado: enlace	https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.01.01
Idioma (Normal ISO 639-3)	SPA - español
Tipo de trabajo de investigación	Trabajo de Suficiencia Profesional
País de publicación	PE - PERÚ
Recurso del cual forma parte (opcional)	
Nombre del grado	Ingeniero Civil
Grado académico o título profesional	Título Profesional
Nombre del programa	Ingeniería Civil
Código del programa Consultar el listado: enlace	732016

*Ingresar las palabras clave o términos del lenguaje natural (no controladas por un vocabulario o tesoro).

FACULTAD DE INGENIERÍA

ACTA N° 021-2024-UCSS-FI/TPICIV

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

Los Olivos, 29 de febrero de 2024

Siendo el día martes 29 de febrero de 2024, en la Universidad Católica Sedes Sapientiae, se realizó la evaluación y calificación del siguiente informe de Trabajo de Suficiencia Profesional.

Optimización del control de estabilidad de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel mediante instrumentación y monitoreo geotécnico avanzado

Presentado por el bachiller en Ciencias de la Ingeniería Civil de la Sede Lima:

FIESTAS CHUQUISPUMA, YASSER REYMUNDO

Ante la comisión evaluadora de especialistas conformado por:

BANCES MEZA, ALCIBIADES
CARMENATES HERNANDEZ, DAYMA SADAMI

Luego de haber realizado las evaluaciones y calificaciones correspondientes la comisión lo declara:

APROBADO


En mérito al resultado obtenido se expide la presente acta con la finalidad que el Consejo de Facultad considere se le otorgue al Bachiller FIESTAS CHUQUISPUMA, YASSER REYMUNDO el Título Profesional de:

INGENIERO CIVIL

En señal de conformidad firmamos,



Ing. BANCES MEZA, ALCIBIADES
Evaluador especialista 1



Dra. CARMENATES HERNANDEZ, DAYMA SADAMI
Evaluador especialista 2

Anexo 2

CARTA DE CONFORMIDAD DEL ASESOR(A) DE TESIS / INFORME ACADÉMICO/ TRABAJO DE INVESTIGACIÓN/ TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL CON INFORME DE EVALUACIÓN DEL SOFTWARE ANTIPLAGIO

Los Olivos, 28 de enero de 2024

Señor
Manuel Ismael Laurencio Luna
Coordinador del Programa de Estudios de Ingeniería Civil
Facultad de Ingeniería
Universidad Católica Sedes Sapientiae

Reciba un cordial saludo.

Sirva el presente para informar que el informe de trabajo de suficiencia profesional, bajo mi asesoría, con título: **“Optimización del control de estabilidad de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel mediante instrumentación y monitoreo geotécnico avanzado”**, presentado por FIESTAS CHUQUIPUMA, YASSER REYMUNDO con código 2012101153 y DNI: 70378116 para optar el título profesional de Ingeniero Civil, ha sido revisado en su totalidad por mi persona y **CONSIDERO** que el mismo se encuentra **APTO** para ser evaluado y calificado por la comisión evaluadora de especialistas.

Asimismo, para garantizar la originalidad del documento en mención, se le ha sometido a los mecanismos de control y procedimientos antiplagio previstos en la normativa interna de la Universidad, **cuyo resultado alcanzó un porcentaje de similitud de 6 %**.* Por tanto, en mi condición de asesor, firmo la presente carta en señal de conformidad y adjunto el informe de similitud del Sistema Antiplagio Turnitin, como evidencia de lo informado.

Sin otro particular, me despido de usted. Atentamente,



Julio Christian Quesada Llanto

DNI N°: 42831273

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4366-4926>

Facultad de Ingeniería - UCSS

* De conformidad con el artículo 8°, del Capítulo 3 del Reglamento de Control Antiplagio e Integridad Académica para trabajos para optar grados y títulos, aplicación del software antiplagio en la UCSS, se establece lo siguiente:

Artículo 8°. Criterios de evaluación de originalidad de los trabajos y aplicación de filtros

El porcentaje de similitud aceptado en el informe del software antiplagio para trabajos para optar grados académicos y títulos profesionales, será máximo de veinte por ciento (20%) de su contenido, siempre y cuando no implique copia o indicio de copia.

Resumen

Este trabajo de suficiencia profesional tiene como objetivo general optimizar el control de estabilidad de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel mediante la instrumentación y monitoreo geotécnico avanzado para superar las deficiencias de los sistemas de monitoreo tradicionales, caracterizados por su lentitud y falta de precisión en la detección temprana de riesgos. La metodología de solución propuesta incluye la evaluación y el diagnóstico de los instrumentos existentes, la aplicación de tecnologías modernas como las imágenes satelitales InSAR, radar, los piezómetros casagrande, los piezómetros eléctricos de cuerda vibrante, los inclinómetros y los acelerógrafos. También incluye la adaptación a la telemetría y el desarrollo de una plataforma de gestión centralizada, el análisis de sensibilidad de la estabilidad de los taludes para establecer TARP's efectivos, y un sistema de monitoreo continuo reforzado por inspecciones e informes mensuales. Los resultados indican una mejora sustancial de la capacidad de monitoreo, detectando a tiempo condiciones potencialmente peligrosas y mejorando la respuesta a emergencias. El estudio destaca la importancia de integrar tecnologías innovadoras en el monitoreo geotécnico, proponiendo que los avances logrados sirvan como modelo para otras operaciones mineras en el país, contribuyendo así a la seguridad y sostenibilidad en la gestión de relaves.

Palabras clave: Monitoreo geotécnico, instrumentación geotécnica, telemetría, tecnologías modernas, gestión de relaves.

Abstract

This professional proficiency work aims to optimize the stability control of the Mahr Túnel tailings dam through advanced geotechnical instrumentation and monitoring. This approach is designed to overcome the deficiencies of traditional monitoring systems, which are characterized by their slowness and lack of precision in the early detection of risks. The proposed solution methodology includes the evaluation and diagnosis of existing instruments, and the application of modern technologies such as InSAR satellite images, radar, Casagrande piezometers, electric vibrating wire piezometers, inclinometers, and accelerographs. The approach also involves adapting to telemetry and developing a centralized management platform, conducting slope stability sensitivity analysis to establish effective TARP's, and implementing a continuous monitoring system reinforced by inspections and monthly reports. The results indicate a substantial improvement in monitoring capacity, successfully detecting potentially dangerous conditions in a timely manner and enhancing emergency response. The study underscores the importance of integrating innovative technologies into geotechnical monitoring and proposes that the advancements achieved could serve as a model for other mining operations in the country, thus contributing to safety and sustainability in tailings management.

Keywords: Geotechnical Monitoring, Geotechnical Instrumentation, Telemetry, Modern Technologies, Tailings Management.

Índice

Resumen.....	1
Abstract.....	2
Índice.....	3
Introducción	13
Trayectoria del autor	15
Descripción de la empresa	15
Organigrama de la Empresa.....	16
Área y funciones desempeñadas	16
Experiencia profesional realizada en la organización.....	17
Problemática	19
Planteamiento del problema.....	19
Definición del problema	20
Problema general	21
Problemas específicos.....	21
Objetivos de la investigación.....	21
Objetivo general.....	21
Objetivos específicos	21
Justificación	22
Alcances y limitaciones	23
Marco teórico.....	25
Antecedentes.....	25
Antecedentes internacionales.....	25
Antecedentes nacionales.....	32
Bases Teóricas	35
Antecedentes.....	35
Métodos de solución y formas de implementación	37
Tecnologías asociadas	40

Definición de términos básicos.....	44
Propuesta de Solución.....	48
Metodología de la solución.....	48
Desarrollo de la solución	50
Análisis situacional.....	50
Ubicación	50
Ruta y acceso	51
Características de la presa de relaves.....	51
Desarrollo de la metodología de solución	52
Análisis y evaluación de la información existente.....	52
Implementación de tecnologías modernas	56
Nueva campaña de perforación e instrumentación geotécnica	75
Automatización y adaptación a la telemetría	91
Definición de los niveles de alerta	109
Evaluación de riesgos y planificación de respuesta.....	125
Implementación del centro control	127
Evaluación geotécnica de la presa	130
Factibilidad técnica - operativa.....	138
Factibilidad técnica.....	138
Factibilidad operativa	140
Inversión	143
Análisis de Resultados	148
Análisis costos - beneficio	148
Beneficios de la implementación.....	151
Aportes más destacables a la institución.....	157
Conclusiones.....	159
Recomendaciones	164
Referencias.....	166

Índice de Tablas

Tabla 1 Proceso secuencial de la propuesta solución	49
Tabla 2 Datos generales del radar FastGBSAR, ubicación y modelo	65
Tabla 3 Especificaciones técnicas del radar FastGBSAR.....	65
Tabla 4 Datos generales de los acelerógrafos	72
Tabla 5 Ubicación de perforaciones diamantinas ejecutadas en la campaña 2021.....	76
Tabla 6 Detalle de instalación de los piezómetros tipo casagrande.....	82
Tabla 7 Detalle de instalación de los sensores de cuerda vibrante	86
Tabla 8 Detalle de instalación de los inclinómetros	90
Tabla 9 Resumen de los inclinómetros automatizados	93
Tabla 10 Resumen de los piezómetros eléctricos de cuerda vibrante automatizados.....	97
Tabla 11 Resumen de los piezómetros tipo casagrande automatizados	98
Tabla 12 Datos de acceso a la gateway.....	102
Tabla 13 Propiedad mecánicas de las unidades geotécnicas	116
Tabla 14 Valores de factores de seguridad mínimos para el análisis de sensibilidad.....	117
Tabla 15 Límites de alerta para los niveles piezométricos, relavera 3	120
Tabla 16 Límites de alerta para los niveles piezométricos, relavera 4 y 5	121
Tabla 17 Límites de alerta para los niveles piezométricos, relavera 6	122
Tabla 18 Límites de alerta para los hitos topográficos, estación robótica y radar.....	123
Tabla 19 Límites de alerta para los inclinómetros	124
Tabla 20 Nivel de daño versus asentamiento de cresta ante un terremoto	125
Tabla 21 Modos de falla en el depósito de relave 6, Mahr Túnel.....	127
Tabla 22 Equipos computacionales implementados para el centro de control	129

Tabla 23 Frecuencia de monitoreo geotécnico	130
Tabla 24 Tipo de inspección y frecuencia	134
Tabla 25 Resumen de inversión total.....	143
Tabla 26 Inversión de perforación e instrumentación geotécnica	144
Tabla 27 Inversión de alquiler de equipos y suministro de instrumentación geotécnica.....	144
Tabla 28 Inversión de licencia del software integrador de visualización	145
Tabla 29 Inversión de mano de obra.....	146
Tabla 30 Inversión de implementación de la sala de centro de control	146
Tabla 31 Costo y beneficio de la optimización de la instrumentación geotécnica	148
Tabla 32 Costo y beneficio de la perforación e instrumentación geotécnica	148
Tabla 33 Costo y beneficio del alquiler y suministro de instrumentos geotécnicos	149
Tabla 34 Costo y beneficio de la adquisición de software.....	150
Tabla 35 Costo y beneficio de la mano de obra.....	150
Tabla 36 Costo y beneficio de la implementación de la sala de centro de control	151
Tabla 37 Análisis comparativo de la frecuencia de monitoreo, antes vs después	151
Tabla 38 Análisis comparativo de la cantidad de instrumentación, antes vs después	152
Tabla 39 Deficiencias y áreas claves para ser optimizados antes de la optimización	153
Tabla 40 Mejoras en la precisión, eficacia y cobertura del monitoreo geotécnico.....	154
Tabla 41 Mejoras en la eficiencia operativa y detección temprana de riesgos.....	155
Tabla 42 Mejoras en el control de estabilidad de la presa	156

Índice de Figuras

Figura 1 Organigrama de la empresa Volcan Compañía Minera S.A.A.	16
Figura 2 Ubicación de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel.....	51
Figura 3 Componentes de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel	52
Figura 4 Ubicación de instrumentos geotécnicos existentes desde el 2016 hasta el 2021	53
Figura 5 Registro típico de los piezómetros tipo casagrande, desde el 2016 hasta el 2021	54
Figura 6 Registro de nivel piezométrico desde el 2016 hasta el 2021	55
Figura 7 Registro de desplazamiento vertical de la relavera 6 desde el 2019 hasta el 2021	55
Figura 8 Plataforma Tre Maps – Imágenes satelitales InSAR.....	56
Figura 9 Imágenes satelitales InSAR, puntos de monitoreo	57
Figura 10 Serie temporales del desplazamiento vertical, relavera 6.....	58
Figura 11 Vista panorámica de la presa de relaves 4, 5 y 6, inspección de la zona	59
Figura 12 Ubicación de los hitos topográficos y estación robótica (EST)	60
Figura 13 Proceso de fabricación de los hitos topográficos	60
Figura 14 Instalación de los prismas en los hitos topográficos	61
Figura 15 Sección de la estructura de soporte de la estación robótica.....	62
Figura 16 Proceso de instalación de la caseta de la estación robótica	62
Figura 17 Proceso de instalación del cerco perimétrico de la estación robótica	63
Figura 18 Construcción final de la caseta de la estación robótica	63
Figura 19 Plataforma de monitoreo del software Geomos Analyzer.....	64
Figura 20 Punto de vista de la relavera 6 del radar FastGBSAR, inspección de la zona	66
Figura 21 Instalación de la estructura de soporte de radar y gabinete de control.....	66
Figura 22 Instalación de paneles solares.....	67

Figura 23	Proceso de configuración del radar en campo.....	68
Figura 24	Instalación final del radar FastGBSAR.....	68
Figura 25	Posición y línea de vista aproximada (58° de apertura) de Radar Postura 2.....	69
Figura 26	Puntos de control y mapa 2d de los desplazamientos acumulado.....	70
Figura 27	Registro de deformación acumulada de los puntos de control.....	70
Figura 28	Inspección en campo para la ubicación del acelerógrafo AC-03.....	71
Figura 29	Ubicación de los acelerógrafos.....	72
Figura 30	Sección típico de diseño de los acelerógrafos.....	73
Figura 31	Llenado de la base del acelerógrafoAC-03.....	74
Figura 32	Montaje del acelerógrafo AC-03 en la base de concreto.....	74
Figura 33	Acelerógrafo AC-03 instalado.....	75
Figura 34	Ubicación de perforaciones diamantinas ejecutadas en la campaña 2021.....	76
Figura 35	Cronograma de perforaciones geotécnicas.....	78
Figura 36	Plataforma de perforación estandarizada del sondaje DH-05.....	79
Figura 37	Tubería ranurada de 1” forrada con geotextil.....	81
Figura 38	Instalación de piezómetro tipo casagrande.....	82
Figura 39	Instalación de sensor de cuerda vibrante en tubería piezométrica.....	85
Figura 40	Instalación de sensor de cuerda vibrante en tubería inclinométrica.....	85
Figura 41	Tapón de fondo del inclinómetro.....	89
Figura 42	Instalación de inclinómetro vertical en sondeo.....	89
Figura 43	Lectura base de los instrumentos geotécnicos instalados.....	91
Figura 44	Esquema de adaptación a la telemetría de los instrumentos geotécnicos.....	92
Figura 45	Esquema de los componentes del sistema inclinométrico fijo IPI.....	94

Figura 46 Preparación de los sensores IPI en campo, PZR6-09	94
Figura 47 Instalación de los sensores inclinómetros, PZR6-09	95
Figura 48 Instalación de los nodos geotécnicos, PZR6-09	95
Figura 49 Nodo geotécnico instalado	96
Figura 50 Conexión de cable UTP en terminal de la gateway.....	100
Figura 51 Esquema de Conexión de la Gateway a la red	101
Figura 52 Flujograma de acceso remoto a la gateway mediante conexión local directa	101
Figura 53 Flujograma de acceso remoto a la gateway mediante internet o una red local	102
Figura 54 Acceso a la página principal de la Gateway	103
Figura 55 Portal de ingreso de usuario	104
Figura 56 Dashboard estado de Instrumentos	105
Figura 57 Dashboard de instrumentos configurados en relavera Marh Túnel.....	106
Figura 58 Panel de Mapa de monitoreo de piezómetros VW en la relavera Marh Túnel.....	106
Figura 59 Panel de mapa de monitoreo de inclinómetro en la relavera Marh Túnel.....	107
Figura 60 Panel de mapa de monitoreo de acelerógrafos en la relavera Marh Túnel.....	107
Figura 61 Datos históricos de piezómetro (Presión, nivel de agua en cota)	108
Figura 62 Datos históricos de inclinómetro vertical, desplazamiento acumulativo (mm)	108
Figura 63 Datos históricos de la estación acelerográfica.....	109
Figura 64 Plano de distribución de las secciones geológicas de corte.....	110
Figura 65 Sección geológica 3 – Relavera 1 y 2.....	111
Figura 66 Sección geológica C – Relavera 3	112
Figura 67 Sección geológica D y E – Relavera 4 y 5	113
Figura 68 Sección geológica 15 – Relavera 6, zona sur	114

Figura 69 Sección geológica 18 – Relavera 6, zona este.....	115
Figura 70 Plano de distribución de las secciones de análisis.....	118
Figura 71 Análisis de sensibilidad de la sección 1-1	118
Figura 72 Análisis de sensibilidad de la sección 2-2	119
Figura 73 Análisis de sensibilidad de la sección 4-4	119
Figura 74 Bow Tie del depósito de relaves 1 al 6 de Mahr Túnel	126
Figura 75 Ubicación de la sala de centro de control.....	128
Figura 76 Equipamiento tecnológico de la sala de centro de control	129
Figura 77 Perfil de la línea piezométrica de la relavera 6.....	131
Figura 78 Monitoreo geotécnico de los inclinómetros	131
Figura 79 Monitoreo geotécnico de los piezómetros	132
Figura 80 Integración de datos del radar vs InSAR.....	133
Figura 81 Integración de datos del radar vs InSAR vs estación robótica	133
Figura 82 Integración de datos del piezómetro vs InSAR	134
Figura 83 Formato de check list de inspección de relaveras	136
Figura 84 Equipo multidisciplinario para la inspección de relaveras, TSF 6	136
Figura 85 Vista panorámica de la relavera 3, vuelo con dron	137
Figura 86 Vista panorámica de la relavera 6, vuelo con dron	138
Figura 87 Equipo de trabajo, proyectos de San Cristóbal - Carahuacra	139
Figura 88 Equipo de lectura de instrumentación geotécnica	139
Figura 89 Esquema de monitoreo geotécnico de presa de relaves Mahr Túnel.....	141
Figura 90 Flujo de comunicación del monitoreo de la presa de relaves ante un evento.....	141

Apéndice

Apéndice A. Esquema de instalación de piezómetro tipo casagrande y cuerda vibrante

Apéndice B. Esquema de instalación de inclinómetro

Apéndice C. Hoja de calibración de los sensores de cuerda vibrante ventilado

Apéndice D. Hoja de calibración de los sensores IPIs

Apéndice E. Hoja de calibración del acelerógrafo

Apéndice F. Protocolo de instalación de PZ VW Venteado

Apéndice G. Protocolo de instalación IPI

Apéndice H. Acta de asistencia de la capacitación del T4G

Apéndice I. TARP's

Apéndice J. Plano de instrumentación, relavera 1 y 2 - Planta

Apéndice K. Plano de instrumentación, relavera 3 - Planta

Apéndice L. Plano de instrumentación, relavera 3 - Secciones

Apéndice M. Plano de instrumentación, relavera 4 y 5 - Planta

Apéndice N. Plano de instrumentación, relavera 4 y 5 - Secciones

Apéndice O. Plano de instrumentación, relavera 6 - Planta

Apéndice P. Plano de instrumentación, relavera 6 - Secciones

Apéndice Q. Plano de distribución de secciones geotécnicas

Apéndice R. Plano de secciones geotécnicas 1 y 2

Apéndice S. Plano de secciones geotécnicas 3 y 4

Apéndice T. Plano de secciones geotécnicas 12 y 13

Apéndice U. Plano de secciones geotécnicas 15 y 16

Apéndice V. Plano de secciones geotécnicas 8, 9 y 11

Apéndice W. Plano de secciones geotécnicas 17, 18 y 19

Apéndice X. Plano de secciones geotécnicas 20, A y B

Apéndice Y. Plano de secciones geotécnicas C, D y E

Apéndice Z. Plano de secciones geotécnicas 5, 6, 7, 10 y 14

Introducción

La seguridad de estabilidad física en las presas de depósitos de relaves representa un desafío global en la ingeniería geotécnica, un área donde el monitoreo adecuado es crucial para asegurar la integridad de infraestructuras críticas y proteger el entorno natural junto con las comunidades humanas. Para ello, se necesita una vigilancia constante y avanzada para detectar cualquier signo de inestabilidad. Sin embargo, muchos sistemas actuales tienen limitaciones importantes, como la falta de alertas tempranas precisas, lo que ha resultado en desenlaces fatales en desastres que han tenido repercusiones a nivel mundial.

A nivel internacional, los desastres geotécnicos han tenido un impacto devastador, destacando casos emblemáticos como el colapso de la presa de relaves en Brumadinho, Brasil, en 2019, que resultó en la trágica pérdida de vidas humanas y graves daños ambientales. Similarmente, el desastre de la presa de Samarco en 2015 y el colapso de la presa de relaves de Mount Polley en Canadá en 2014. En todos estos incidentes, la ineficiencia del monitoreo geotécnico y la incapacidad para proporcionar alertas en tiempo real jugaron un papel crucial. No solo dejando cicatrices profundas en sus regiones respectivas, sino también subrayando la necesidad imperante de mejorar las prácticas de monitoreo geotécnico. La carencia de un sistema eficaz de monitoreo ha provocado consecuencias devastadoras, llevando a cuestionar cuántas de estas podrían haberse evitado con la disponibilidad de alertas tempranas.

Este trabajo de suficiencia profesional busca abordar la problemática global y local relacionada con las fallas en las presas de relaves, enfatizando la importancia de una vigilancia geotécnica efectiva. Se propone el desarrollo de un sistema de monitoreo avanzado para la presa de relaves Mahr Túnel, que incorporará técnicas y tecnologías innovadoras con el fin de mejorar la seguridad y gestión de estas infraestructuras críticas. Es la evaluación de información existente,

junto con la instalación de nuevos instrumentos y su automatización, así como la adaptación a la telemetría de los instrumentos geotécnicos. Estas medidas no solo facilitarán la adquisición de datos en tiempo real, sino que, también potenciarán la capacidad de emitir alertas tempranas ante condiciones que representen un riesgo potencial.

La metodología de este trabajo incluye inicialmente una evaluación detallada de las prácticas de monitoreo actuales, seguida por el diseño y aplicación de un sistema de telemetría especialmente adaptado a las necesidades de la presa Mahr Túnel. En este contexto, se investigará cómo la incorporación de esta innovación puede realzar significativamente la capacidad de monitoreo, ofreciendo ventajas en términos de eficiencia, tiempo y costo, en contraste con los métodos tradicionales.

Este estudio surge de un deseo personal de contribuir a la prevención de desastres geotécnicos y a la mejora en la seguridad de la gestión de relaves, inspirado por la necesidad de proteger a las comunidades y ecosistemas, nutriéndose de una comprensión profunda de los riesgos asociados a estos desastres y del anhelo de avanzar en la seguridad de infraestructuras geotécnicas, aplicando las lecciones aprendidas de eventos anteriores, especialmente en el contexto específico de Perú.

Con un enfoque práctico y una visión hacia el futuro, este trabajo busca no solo mejorar la seguridad en la presa Mahr Túnel, así como un modelo replicable y escalable para otras operaciones mineras. Al establecer nuevos estándares y prácticas, se plantea el objetivo de garantizar una mayor seguridad para las presas de relaves en todo Perú y potencialmente a nivel mundial, contribuyendo así, a forjar un futuro más seguro y sostenible para la industria minera y las comunidades que de ella dependen.

Trayectoria del autor

Descripción de la empresa

Volcan Compañía Minera S.A.A. es una empresa minera posicionada a nivel global como uno de los principales productores de zinc, plomo y plata. La Compañía es considerada uno de los productores de más bajo costo en la industria debido a la calidad de sus depósitos de mineral. Volcán inició sus operaciones en 1943 en las alturas del Abra de Ticlio. Todas sus operaciones están ubicadas en la Sierra Central de Perú.

Misión:

Enfocarse en la maximización de valor a sus accionistas a través de la excelencia operativa y de los más altos estándares de seguridad y manejo ambiental, contribuyendo al desarrollo de su personal y de su entorno.

Valores:

Seguridad: Nunca cede en cuanto a la Seguridad. El personal trabajador se cuidan unos a otros entre sí.

Integridad: Tenemos la valentía de hacer lo correcto, aunque sea difícil. Se cumple la palabra y se trata de manera justa y respetuosa.

Responsabilidad: Es responsable de las acciones. Dialoga con los demás para entender lo que esperan de la empresa. Trabaja para mejorar el desempeño comercial, social y medioambiental.

Transparencia: Es una empresa honesta y directa cuando se comunica con la misma. Se esfuerza para mejorar, compartir información, fomentar el diálogo y la retroalimentación constructiva.

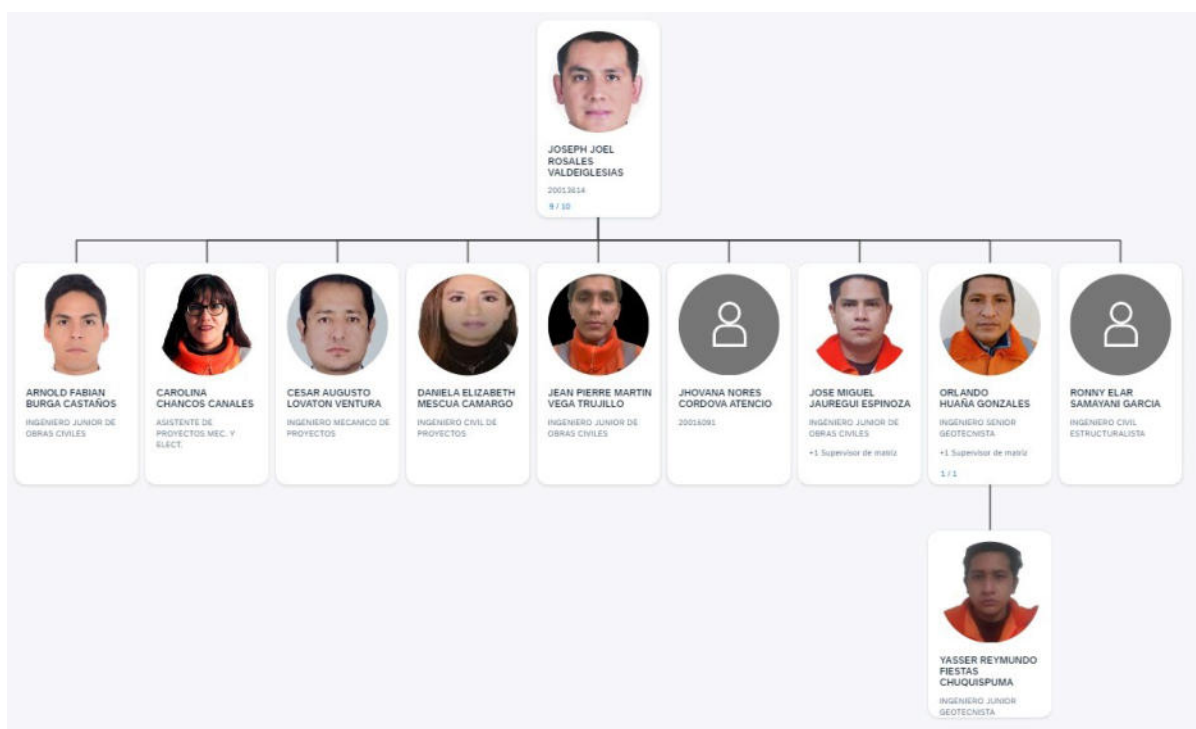
Simplicidad: Trabaja de manera eficiente y se enfoca en lo más importante. Evita la complejidad y busca soluciones sencillas y pragmáticas.

Espíritu empresarial: Fomenta las ideas nuevas y se adapta rápidamente al cambio. Siempre busca nuevas oportunidades para crear valor, al igual que formas para trabajar mejor y de manera más segura.

Organigrama de la Empresa

Figura 1

Organigrama de la empresa Volcan Compañía Minera S.A.A.



Nota. Elaboración propia

Área y funciones desempeñadas

En la actualidad, el autor desempeña el cargo de ingeniero junior geotécnica en el área de proyectos de la superintendencia de la unidad de San Cristóbal - Carahuacra en Volcan Compañía Minera S.A.A. Las funciones y responsabilidades del autor son:

- Caracterización geotécnica en los depósitos de relaves.
- Supervisión en la ejecución de programas de investigación geotécnico y perforaciones con fines geotécnicos.
- Preparación y supervisión de planes de ensayos geotécnicos de suelo-roca, tanto en laboratorio como en terreno.
- Calcular, diseñar, evaluar y recomendar sistemas de fortificación según lo establecido en GCMP, CDA, Estándar de relaveras de GLENCORE. Seguimiento de la calidad de los materiales utilizados, instalación, funcionamiento y prácticas operacionales utilizadas para la correcta instalación de los sistemas de fortificación recomendados.
- Ejecutar análisis de estabilidad o interpretación de resultados utilizando métodos empíricos o numéricos bidimensionales o eventualmente 3D.
- Preparación y supervisión de programas y planes de instrumentación geotécnica dentro de las labores mineras.
- Gestionar la actualización de planos as-built con información geotécnica, estructural y del comportamiento geotécnico histórico de los depósitos de relaves conforme se realiza el recrecimiento de los depósitos de relaves.

Experiencia profesional realizada en la organización

En su trayectoria en Volcan Compañía Minera S.A.A., el autor ha desempeñado dos roles distintos, a lo largo de los cuales ha acumulado las siguientes experiencias profesionales:

- Ingeniero junior geotecnista (junio 2022 – actualidad):
 - Elaboración de informe mensual, trimestral y anual de evaluación de seguridad del TSF Mahr Túnel.

- Monitoreo, interpretación y evaluación de la instrumentación geotécnica de diversas presas de relaves: Piezómetros de Casagrande y cuerda vibrante, inclinómetros, acelerógrafos, hitos topográficos, radar, etc.
- Soporte de mantenimiento de equipos de instrumentación geotécnica del TSF Mahr Túnel.
- Análisis de estabilidad física de presa de relaves, caso: estático drenado y no drenado, Pseudoestático.
- Elaboración de manual de operaciones y respuesta de emergencia del TSF Mahr Túnel.
- Participación en la planificación y construcción de obras geotécnicas.
- Metrados y presupuestos de obras de movimiento de tierras: TSF Mahr Túnel.
- Practicante profesional de relaveras – Corporativo Lima (julio 2021 – junio 2022)
 - Elaboración de informe mensual, trimestral y anual de evaluación de seguridad de presas de relaves: Ocroyoc, Animón y Alpamarca.
 - Monitoreo, interpretación y evaluación de la instrumentación geotécnica de diversas presas de relaves: Piezómetros de Casagrande y cuerda vibrante, inclinómetros, acelerógrafos, hitos topográficos, etc.
 - Análisis de estabilidad física: estático drenado y no drenado, Pseudoestático.
 - Elaboración de manual de operaciones y respuesta de emergencia.
 - Interpretación de ensayos geotécnicos: SCPTU, SPT, Perforaciones.
 - Metrados y presupuestos de obras de movimiento de tierras: presa de relaves.
 - Evaluación técnica y económica de propuestas de ingeniería relacionadas a las presas de relaves: Ocroyoc, Animón y Alpamarca.

Problemática

Planteamiento del problema

En el contexto de la gestión de residuos mineros, las presas de depósitos de relaves desempeñan un papel crítico. Un ejemplo notable es la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel, ubicada en una región sísmica del Perú. La seguridad y estabilidad de estas estructuras es primordial, considerando el riesgo constante de fallas que podría llevar a situaciones catastróficas, tal como se evidenció en el desastre de Brumadinho.

El control de estabilidad de la presa y su monitoreo geotécnico son procesos esenciales. Históricamente, este monitoreo se basaba en la instrumentación geotécnica tradicional. Sin embargo, esta metodología presenta desafíos evidentes, como la obtención manual de datos, limitaciones en la cobertura espacial, perturbaciones en el entorno y posibles problemas de instalación. Además, no permite el monitoreo en tiempo real ni la identificación temprana de posibles fallas.

En contraste, avances tecnológicos recientes han introducido instrumentos geotécnicos modernos y técnicas de telemetría, desarrollados originalmente con otros propósitos, como aplicaciones militares. Estos instrumentos ofrecen un camino hacia un monitoreo más rápido y preciso, especialmente en áreas críticas de la presa. La adaptación a la telemetría, junto con la identificación de zonas críticas en la presa, son esenciales para superar los actuales desafíos.

Por lo tanto, se plantea la necesidad de abordar la optimización y uso de instrumentos geotécnicos tradicionales y modernos para fortalecer el control de estabilidad de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel. Este enfoque implica el desarrollo de controles críticos de falla, la implementación de niveles de alerta y el uso de plataformas de monitoreo avanzadas. Estos

elementos son fundamentales para prevenir situaciones de riesgo, mejorar la seguridad de la presa y proteger tanto al medio ambiente como a las comunidades circundantes.

Definición del problema

El problema que se aborda en este trabajo de suficiencia profesional se centra en la necesidad apremiante de mejorar el control de estabilidad y seguridad de la presa de depósito de relaves Mahr Túnel. Puesto que la utilización de la instrumentación geotécnica tradicional se ha vuelto insuficiente para garantizar la detección temprana de condiciones de riesgo y para prevenir fallas catastróficas en la presa. Esta situación genera un hecho observable y alarmante: la seguridad de la presa está comprometida y los efectos y consecuencias potenciales de una falla podrían ser devastadores para el medio ambiente, las comunidades circundantes y los trabajadores involucrados.

La problemática radica en la falta de adaptación a tecnologías más avanzadas, como la telemetría, que permitiría el monitoreo en tiempo real y una cobertura espacial integral y la falta de implementación de instrumentos geotécnicos modernos y no invasivos, diseñados para aplicaciones más amplias, contribuye a la problemática. La falta de niveles de alerta y controles críticos de falla efectivos agrava la situación, ya que no se pueden tomar medidas oportunas para prevenir riesgos.

En consecuencia, es esencial abordar este problema mediante la optimización y el uso de instrumentos geotécnicos tradicionales y modernos para mejorar el control de estabilidad de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel. Esto implica la adaptación de instrumentos a la telemetría, la identificación de zonas críticas de la presa y el establecimiento de niveles de alerta y controles críticos de falla que permitan una respuesta efectiva a situaciones de riesgo. Resolver este problema es crucial para garantizar la seguridad y la estabilidad de la presa, así como para

prevenir potenciales desastres medioambientales y proteger la vida de los trabajadores y las comunidades circundantes.

En resumen, el problema se resume en las siguientes preguntas:

Problema general

¿De qué manera la instrumentación y monitoreo geotécnico avanzado puede optimizar el control de estabilidad de la presa de depósito de relaves Mahr Túnel?

Problemas específicos

¿En qué medida la evaluación del sistema actual de monitoreo geotécnico en la presa Mahr Túnel revela oportunidades para optimizar su control de estabilidad?

¿De qué manera la integración de tecnologías avanzadas, instalación de instrumentos geotécnicos y telemetría, puede aumentar la efectividad del monitoreo geotécnico?

¿Cómo los niveles de alerta y un sistema de monitoreo geotécnico centralizado, puede influir en la eficiencia operativa y la gestión de riesgos de la presa?

¿De que forma las estrategias de respuesta a emergencias, basadas en la evaluación geotécnica y análisis de datos puede reforzar el control de estabilidad de la presa?

Objetivos de la investigación

Objetivo general

Optimizar el control de estabilidad de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel mediante la instrumentación y monitoreo geotécnico avanzado.

Objetivos específicos

Analizar el sistema de monitoreo geotécnico existente para identificar deficiencias y áreas clave para optimizar su control de estabilidad.

Integrar tecnologías avanzadas, nuevos instrumentos geotécnicos y la telemetría, para incrementar la precisión, eficacia y cobertura del monitoreo geotécnico.

Establecer niveles de alerta y un sistema de monitoreo geotécnico centralizado, para mejorar la eficiencia operativa y la detección temprana de riesgos.

Determinar estrategias de respuesta a emergencia basadas en la evaluación geotécnica y análisis de datos para fortalecer el control de estabilidad de la presa.

Justificación

La optimización del control de estabilidad de la presa Mahr Túnel, un proyecto liderado por Volcan Compañía Minera S.A.A., representa un avance esencial en la seguridad y gestión de presas de relaves especialmente en la sierra central del Perú, una región de alta sismicidad. Este trabajo de suficiencia profesional se distingue por su integración completa de tecnologías avanzadas y estrategias de monitoreo geotécnico, con el fin de reforzar la seguridad y estabilidad de la presa, llenando así un importante vacío en la literatura actual.

El enfoque del estudio abarca una revisión de las prácticas de monitoreo y el estado de la instrumentación geotécnica en la presa Mahr Túnel hasta el 2020. Se evalúa sus fortalezas y debilidades y proponiendo soluciones innovadoras para optimizar el monitoreo geotécnico. Este análisis considera aspectos clave como la precisión del monitoreo, la capacidad de respuesta ante emergencias y la confiabilidad de los datos recopilados.

Este estudio adopta un enfoque metodológico novedoso, combinando técnicas de monitoreo tradicionales con la implementación de tecnologías avanzadas como radar, imágenes satelitales InSAR, estaciones robóticas, exploraciones geológicas, automatización de la instrumentación geotécnica, adaptación a la telemetría y la implementación de acelerógrafos. Además, se han definido niveles de alerta y se ha establecido un plan de respuesta ante

emergencias, asegurando así la aplicabilidad y fiabilidad de los hallazgos, y proporcionando un modelo que puede ser replicado en otras presas.

La relevancia social de este trabajo beneficia tanto a investigadores y profesionales en ingeniería geotécnica como a las comunidades locales, puesto que proyecta un enfoque preventivo en evitar la contaminación y pérdida de vidas en caso de una ruptura de la presa. Este proyecto refleja el compromiso de Volcan Compañía Minera S.A.A. con la innovación y mejora continua, contribuyendo a una gestión más segura y sostenible de las presas de relaves.

Alcances y limitaciones

Los alcances de este trabajo incluyen:

- Evaluación de la eficacia de la instrumentación geotécnica moderna en términos de precisión y velocidad de monitoreo en comparación con la instrumentación tradicional en la presa de depósito de relaves Mahr Túnel.
- Identificación y mapeo de zonas críticas de la presa de depósito de relaves Mahr Túnel utilizando instrumentos geotécnicos modernos y su adaptación a la telemetría.
- Análisis del impacto en la operatividad y seguridad de la presa en función del tiempo adicional requerido para la instalación y adaptación de instrumentos geotécnicos modernos en comparación con los tradicionales.
- Desarrollo de controles críticos de falla basados en los datos proporcionados por la instrumentación geotécnica moderna y definición de niveles de alerta.
- Propuesta de mejoras y recomendaciones para la implementación de tecnologías geotécnicas modernas en la presa de depósito de relaves Mahr Túnel.

Las limitaciones incluyen:

- Los resultados y conclusiones de esta investigación estarán específicamente relacionados con la presa de depósito de relaves Mahr Túnel y podrían no ser directamente aplicables a otras ubicaciones geográficas.
- La implementación de instrumentación geotécnica moderna puede requerir inversiones significativas y recursos técnicos, lo que podría limitar su aplicabilidad en ciertas circunstancias.
- Las condiciones y características geotécnicas específicas de la presa Mahr Túnel influyen en los resultados y conclusiones de la investigación, y estos pueden no ser generalizables a otras presas sin considerar sus particularidades.

Marco teórico

Antecedentes

Antecedentes internacionales

Cerda (2022) propuso una metodología avanzada para el monitoreo geotécnico de depósitos de relaves, fusionando enfoques invasivos, semi invasivos y no invasivos, con el objetivo de mejorar la eficiencia y confiabilidad en el monitoreo de estas estructuras. Esta metodología se basó en una revisión bibliográfica y un análisis del estado actual de la práctica en Chile. Ha utilizado datos de 22 depósitos de relaves que representan el 83% del volumen total autorizado en el país. Los resultados evidenciaron que los métodos de monitoreo convencionales son insuficientes para abordar variables geotécnicas críticas como nivel freático, presiones de poros, filtraciones, deformaciones, aceleraciones sísmicas y esfuerzos totales, subrayando la necesidad de incorporar tecnologías más avanzadas para lograr un monitoreo más preciso y completo. Con este fin, se propuso la implementación de sensores de alta precisión, sistemas de teledetección, piezómetros avanzados para monitorear las presiones de poros y los niveles freáticos con mayor exactitud. Asimismo, el uso de extensómetros para evaluar las deformaciones del terreno con una mejor precisión, el uso de tecnologías de radar de penetración terrestre (GPR) y sensores LIDAR para un seguimiento detallado de los cambios superficiales y subterráneos. Además, la integración de estos sistemas con tecnologías de IoT permitiría una monitorización en tiempo real, facilitando la detección temprana y precisa de cambios peligrosos en los depósitos. En las conclusiones, se resalta que esta metodología redujo significativamente los márgenes de error en comparación con los métodos tradicionales, aumentando la precisión en la medición del nivel freático hasta un 90-95%, en contraste con el 70-80% de los métodos convencionales.

Choquet et al. (2022) analizaron tecnologías avanzadas en el monitoreo de presas de relaves, enfocándose en herramientas como imágenes satelitales InSAR, Shape Arrays, dataloggers inalámbricos, fibra óptica, acelerógrafos, GPS y piezómetros eléctricos de cuerda vibrante. La metodología incluyó la implementación de estas tecnologías en campo para compararlas con métodos tradicionales como inclinómetros mecánicos y sistemas manuales de medición de nivel freático. Los resultados destacaron la superioridad de las tecnologías avanzadas: las imágenes InSAR identificaron desplazamientos de 10 mm en la presa de Río Azul que los inclinómetros no detectaron. Los Shape Arrays en la presa Montaña Alta registraron deformaciones de 5 mm frente a los 15 mm de los inclinómetros mecánicos. Los piezómetros de cuerda vibrante y dataloggers inalámbricos en Valle Dorado mostraron cambios en la presión de poros con un 95% de precisión comparados con el 80% de los métodos manuales. En Lago Serena la combinación de fibra óptica y sistemas GPS permitió un monitoreo continuo con precisión de hasta 2 mm, superando la medición topográfica manual. En Cumbre Roja, los acelerógrafos proporcionaron datos sísmicos con un margen de error de solo 5%, frente al 15-20% de los métodos convencionales. En conclusión, se demostró una mejora en la precisión del monitoreo de presas de relaves de 15-25% al emplear tecnologías avanzadas. Lo que impacta notablemente en la seguridad y gestión eficiente de estas estructuras, alineándose con estándares del ICOLD y estableciendo nuevas directrices para el monitoreo geotécnico que mejoran el monitoreo en tiempo real y proporcionan datos clave para análisis predictivos y decisiones estratégicas a largo plazo.

Sancho et al. (2021) llevaron a cabo un estudio para evaluar la precisión y efectividad de la fotogrametría con drones en el control de deformaciones en estructuras complejas y terrenos. Utilizando una metodología que incluyó vuelos fotogramétricos a alturas de 20 a 80 metros a una velocidad constante de 4m/s y con un solape de imágenes del 90% longitudinal y del 70%

transversal. Lograron capturar imágenes de alta calidad. De estas, 788 fueron seleccionadas para el procesamiento del modelo, basándose en calidad y relevancia, resultando en más de 100 millones de puntos en cada modelo procesado. Los modelos mostraron una precisión media de $\pm 2-3$ mm en la representación de las deformaciones y un Ground Sampling Distance (GSD) de 12 mm. Se resalta la habilidad de la fotogrametría con drones para identificar variaciones milimétricas en características estructurales como juntas y fisuras. Comparado con mediciones topográficas tradicionales, la precisión fotogramétrica fue de 2 cm en las coordenadas, validando la técnica y destacando su capacidad para capturar detalles finos, vitales para la evaluación de la salud estructural y la gestión de infraestructuras. La investigación concluye que la fotogrametría con drones no solo mejora la cantidad, sino también, la calidad y precisión de los datos, facilitando una inspección más detallada y control efectivo de deformaciones. Esta capacidad para detectar variaciones milimétricas en juntas y fisuras indica un avance significativo en la resolución y detección de detalles, elementos cruciales para la evaluación de la salud estructural y la gestión de infraestructuras, marcando un avance importante en la ingeniería civil.

Adamo et al. (2020) realizaron un estudio que profundiza en la seguridad de las presas utilizando instrumentación de monitoreo sísmico, con el objetivo de conocer mejor los riesgos sísmicos asociados a las presas existentes y futuras, y mejorar los sistemas de monitoreo de seguridad mediante la tecnología avanzada. Los resultados incluyeron casos como el de la presa Matahina, en Nueva Zelanda, donde durante el terremoto de Edgecumbe de 1987 registró aceleraciones máximas del suelo de 0.33g en la base de la presa y 0.42g en la cresta, provocando un aumento del 27% en la aceleración máxima entre la base y la cresta, causando un asentamiento de 100 mm en la cresta y un desplazamiento aguas abajo de 250 mm, generando deformaciones en los hombros de la presa. En el caso de la presa La Villita, en México, afectada por el terremoto de

1985, se observó un rango de asentamientos entre 20 y 32 cm en su parte central y desplazamientos horizontales de hasta 16.5 cm, lo que representa un aumento notable en comparación con eventos sísmicos menos intensos. En el caso de la presa Cogoti en Chile, el terremoto de Illapel de 1943 provocó un asentamiento considerable, con una aceleración máxima del suelo estimada en 0.19g, un valor relativamente bajo en comparación con otros casos estudiados. Las conclusiones del estudio destacan una mejora significativa de la precisión de los acelerógrafos modernos, que registran un aumento del 30% en precisión y sensibilidad en comparación con los modelos anteriores, lo que permite una evaluación más detallada y una respuesta más efectiva a los riesgos sísmicos.

Wang et al. (2020) desarrollaron un sistema de monitoreo inteligente enfocado en aumentar la precisión y fiabilidad de los datos de monitoreo en tiempo real. Este sistema integró instrumentación avanzada como el sistema de posicionamiento de estación total. El Sistema de Navegación Satelital Global, y tecnologías de calibración de línea de base, corrección de fusión y adaptación meteorológica. Los resultados mostraron que el APMSE del punto de monitoreo de la presa de Pugou se mantuvo entre 0.41 mm y 1.65 mm, cumpliendo con los requisitos de precisión del control de deformaciones de segundo nivel (3 mm). Sin embargo, aunque el AHMSE de algunos puntos no alcanzó los requisitos del segundo nivel de monitoreo de deformación, sí cumplió con los del tercer nivel (1,0 mm), especialmente en puntos entre las elevaciones de 856 m y 806 m. También se observó diferencias en el coeficiente de medición (RM) de la precisión en distintas elevaciones durante el periodo de monitoreo; por ejemplo, el RM máximo fue del 55.31% en el punto TP 10Z a una elevación de 856.00 m (cresta de la presa), con un rango de fluctuación del RM entre 34.37% y 55.31%. Para la elevación de 731m, el rango de fluctuación de la MR osciló entre el 2,02% y el 7,52%, y para una elevación de 756m, entre el 7.86% y el 34.04%. Se

encontró que el RM en elevaciones más altas es mayor que en las más bajas, lo que podría deberse a que la precisión de la deformación de los puntos en elevaciones más altas se ve afectada por la ubicación y elevación de la estación de monitoreo inteligente. Las conclusiones del estudio resaltan la eficacia del sistema propuesto en mejorar la capacidad de respuesta ante emergencias en presas durante su operación, a pesar de que en ciertos puntos el AHMSE no cumplió con los requisitos del segundo nivel de control.

Adamo et al. (2020) evaluaron el impacto de la instrumentación y la implementación de tecnologías avanzadas de monitoreo geotécnico en la mejora de seguridad de la presa, mediante la medición de infiltración, presión del agua, movimiento, estrés y tensión. En los resultados, se incluyeron casos como el de la presa La Villita, en México, donde experimentó desplazamientos significativos durante el terremoto de 1985, registrándose que la mitad aguas abajo se desplazó hasta 10 cm en dirección aguas abajo, y la mitad aguas arriba hasta 16.5 cm en dirección aguas arriba. Por otro lado, la presa Cogoti en Chile, mostró un asentamiento instantáneo de hasta 41 cm a lo largo de la longitud de la cresta durante un terremoto. Además, en la presa Matahina, después del terremoto, el flujo desde el drenaje de la manta aumentó de 70 l/min a 630 l/min. Por otra parte, en el terremoto del 19 de septiembre de 1985, que afectó a la presa La Villita, se registraron dos explosiones distintas de energía que duraron aproximadamente 16 segundos cada una y estuvieron separadas por unos 25 segundos. Este mecanismo de ruptura dual se observó más claramente en los registros de otras estaciones de movimiento fuerte más cercanas al epicentro que en los instrumentos de La Villita, causando daños en la presa donde incluyeron fisuras, asentamientos y desplazamientos evidentes. En las conclusiones, se resalta que el incremento de 800% en la infiltración en la presa Matahina y los desplazamientos de hasta 16.5 cm en la presa La Villita son indicadores claros de las reacciones de las presas a los terremotos.

Hendry et al. (2019) investigaron las tendencias de desplazamiento a largo plazo en la presa del río Oldman en Alberta, Canadá, para comprender los movimientos en la fundación del vertedero y el área del estribo derecho. Durante la construcción y después del primer llenado de la presa, se observaron tasas de desplazamiento en la Zona Mayor (R1), alcanzando hasta 3.7 mm/año en los taludes adyacentes al embalse y aliviadero, y 1.7 mm/año en el aliviadero y la cabecera; los desplazamientos en estas áreas fueron de hasta 1.1 mm/año y 1.6 mm/año, respectivamente. Mediante extensómetros inclinados que cruzan R1, se detectaron desplazamientos mayores de hasta 80 mm, con una proyección adicional de 53 mm para 2050 y una tasa creciente máxima de desplazamiento de 1.6 mm/año. En la zona de la Península y el aliviadero, las tasas de desplazamiento registradas por los SIs variaron de 1.1 a 1.3 mm/año. Los extensómetros verticales e inclinados instalados en la zona del vertedero ORD, medidos 4-6 veces al año con un micrómetro de profundidad de ± 0.001 mm de precisión ayudaron a determinar los componentes de desplazamiento horizontal y vertical. En el canal de aproximación al aliviadero, se identificaron dos zonas de cizalladura activas a elevaciones de 1104 y 1093 msnm, denominadas R16 y R13. Las tendencias de desplazamiento en estas zonas mostraron una aceleración durante el llenado del embalse, disminuyendo gradualmente hasta una tasa constante mantenida durante los últimos 15 años, con tasas máximas actuales de desplazamiento de 2.1 mm/año en R16 y 0.4 mm/año en R13. Las conclusiones del estudio indican que la desaceleración en las tasas de desplazamiento en zonas críticas sugiere estabilidad y reduce la probabilidad de necesitar grandes proyectos de reparación en el futuro.

Vargas (2019) examinó el progreso de la instrumentación geotécnica y los métodos de observación en las grandes presas hidroeléctricas de México, destacando avances significativos en la precisión de las mediciones. En El Infiernillo, los deformímetros Cross-arm lograron una

precisión de ± 3 mm y mantuvieron su funcionalidad tras 40 años. Los inclinómetros con tubos telescópicos y los NHA se convirtieron en herramientas esenciales para medir asentamientos y desplazamientos horizontales con una exactitud de ± 3 mm. En El Cajón y La Yesca, los piezómetros de cuerda vibrante demostraron ser eficientes y resistentes, mientras que los extensómetros adaptados en El Infiernillo midieron deformaciones internas con una precisión de 0.01%. Por el contrario, en la presa La Villita, la falla de todos los extensómetros fue notable debido al uso de potenciómetros circulares. Desde el año 2000, la implementación de instrumentos de cuerda vibrante en las presas más recientes de México ha mejorado la recopilación de datos y la eficiencia en la construcción. También se destacó, el uso de un sistema de medición de asentamientos con un torpedo tipo CFE con aletas retráctiles para mediciones más precisas y confiables. Las conclusiones del estudio resaltan que la evolución de la instrumentación geotécnica ha incrementado la precisión y fiabilidad de las mediciones, contribuyendo a una reducción estimada del 30% en los costos de mantenimiento a largo plazo, asegurando así la integridad estructural y eficiencia operativa de estas infraestructuras vitales.

Lienhart (2017) evaluó la eficacia y precisión de las estaciones totales robóticas (RTS) y los escáneres láser en el monitoreo geotécnico de presas. Los resultados del estudio mostraron que los cambios de temperatura pueden causar errores de inclinación en sensores RTS de más de 80 cc. Lo que puede resultar en errores de altura de hasta 8 mm para un objetivo a 60 m, destacando la sensibilidad de estos instrumentos a los cambios ambientales. Además, se ha observado que la presencia de una ventana de vidrio en la trayectoria del haz de medición puede provocar un error de medición de distancia que puede alcanzar la mitad del espesor de la ventana. Lo que es especialmente cierto para las mediciones realizadas a través de ventanas o barreras transparentes. Respecto a los prismas utilizados en las mediciones de RTS, se encontró que los prismas de 360°

pueden presentar patrones de error sistemático que afectan la precisión. Mientras que, los prismas redondos bien alineados pueden permitir mediciones con una precisión de unos pocos décimos de milímetro. Aunque esta precisión puede disminuir con un prisma diferente o en orientaciones desfavorables, donde los errores pueden aumentar a varios milímetros. Además, se destacó la influencia de factores como la refracción atmosférica y las obstrucciones en la línea de visión en la precisión de las mediciones. El estudio concluye que una gestión detallada de las condiciones ambientales y de configuración es crucial para lograr mediciones precisas en el monitoreo geotécnico, revelando un aumento significativo en los errores de medición bajo ciertas condiciones. Como los errores de altura que pueden incrementarse debido a variaciones de temperatura y la elección inadecuada de prismas puede provocar un aumento de varios milímetros en los errores de medición.

Antecedentes nacionales

Uriarte et al. (2021) realizaron una investigación sobre la automatización del procesamiento de registros sísmicos utilizando la plataforma AUDAS, enfocándose en mejorar la eficacia en la detección y reporte de datos sísmicos. Los resultados destacaron la alta fiabilidad de AUDAS, con una efectividad entre el 96% y el 99% tanto en las versiones manuales como en las automatizadas del sistema. Aunque la comparación de velocidades mostró una mayor desviación en la línea de tendencia, la comparación de aceleraciones evidenció una correlación más estrecha entre los métodos manuales y automáticos, lo que resalta la precisión del sistema en diferentes parámetros sísmicos. La investigación también incluyó el registro de eventos sísmicos con magnitudes de 4.0 a 5.5 a distancias de 40 a 880 km de la estación UM, proporcionando una amplia gama de datos para análisis. Los coeficientes de correlación en los canales de aceleración EW, NS y UD, con valores entre 0.8808 y 0.9915, demostraron la alta capacidad de AUDAS para procesar

información sísmica de manera precisa. La integración del sistema SeisComP3 para la adquisición y procesamiento inicial de los datos destacó la eficacia de combinar diferentes tecnologías en el monitoreo geotécnico. En sus conclusiones, se resaltó un incremento significativo en la eficiencia y precisión para la evaluación de estructuras geotécnicas tras eventos sísmicos gracias a AUDAS. Sin embargo, los autores recomendaron complementar AUDAS con análisis manuales para una comprensión más detallada en situaciones críticas.

Torres et al. (2021) llevaron a cabo un estudio en la Unidad Minera Utunsa, empleando imágenes satelitales InSAR y el sistema de monitoreo automatizado Geomos para optimizar el monitoreo geotécnico, especialmente en el Pad de lixiviación y las pozas PLS-ILS y GE. Los extensómetros mecánicos en el Pad mostraron un aumento de desplazamiento de 4 cm en 40 días, con una tendencia lineal de 2.2 cm/día, influenciada por la estabilización de las pozas y cambios climáticos. Desde abril de 2019, el monitoreo robótico con Geomos proporcionó mediciones horarias, ajustando la frecuencia según las tendencias observadas. Las imágenes InSAR identificaron agrietamientos y fallas críticas en el Pad, incluyendo una deformación acelerada de -1 cm, lo que llevó a realizar un estudio de velocidad inversa para prevenir posibles colapsos en las zonas de las pozas. Entre febrero y marzo, se observaron deformaciones de hasta -2.5 cm en 36 días y -1 cm en 12 días, incrementando la frecuencia de evaluación y monitoreo. En conclusión, la integración de tecnologías avanzadas como el sistema Geomos y las imágenes satelitales InSAR condujo a una mejora significativa en el monitoreo geotécnico en la UM Utunsa, permitiendo detectar cambios geotécnicos críticos con mayor rapidez y precisión, lo que facilitó la aplicación de acciones preventivas efectivas.

Alva y Escalaya (2011) realizaron un estudio sobre la presa Pillones con el objetivo de evaluar su comportamiento geotécnico utilizando un sistema de instrumentación avanzado para

identificar posibles anomalías durante su construcción y operación. Este sistema incluyó 17 piezómetros eléctricos de cuerda vibrante, 5 piezómetros hidráulicos, 10 celdas de asentamiento, 5 inclinómetros y 2 acelerógrafos digitales distribuidos en tres secciones clave de la presa. Los resultados del estudio revelaron aspectos cruciales sobre la dinámica de la presa: las mediciones, realizadas en los ejes A0-A180 y B0-B180, incluyeron desviaciones y desplazamientos acumulados, midiendo cada medio metro a lo largo del tubo inclinométrico, proporcionando una visión detallada de los movimientos estructurales, y los desplazamientos medidos en milímetros y comparados con una medición inicial, permitieron la elaboración de gráficos detallados, mostrando los cambios a lo largo del tiempo de manera clara y precisa. Las conclusiones del estudio enfatizaron la importancia vital del sistema de instrumentación geotécnica en la presa Pillones, resaltando que este sistema no solo facilitó la detección oportuna de anomalías durante la construcción y la vida útil de la presa, sino que también proveyó una herramienta eficiente para que los ingenieros supervisan de manera continua el comportamiento de la obra y evaluaran su seguridad.

Bases Teóricas

Antecedentes

La ICOLD (2019) establece que el control de estabilidad de presas de depósitos relaves es fundamental para la seguridad y requiere un conocimiento exhaustivo de la hidrología, geología y mecánica de suelos del sitio, enfatizando la necesidad de realizar revisiones periódicas de seguridad y de adaptar el diseño de la presa a lo largo de su vida útil, asegurando así su integridad estructural en el tiempo.

Por su parte, ANCOLD (2012) proporciona directrices complementarias, centradas en la seguridad y la gestión efectiva de las presas de depósitos de relaves, donde señala que un control adecuado de la estabilidad abarca una evaluación detallada de los factores geotécnicos y estructurales, subrayando la importancia del análisis de riesgos y la preparación ante emergencias para una gestión proactiva.

Fourie y Papageorgiou (2001) abordan la estabilidad de las presas de depósitos de relaves como un concepto multifacético que incluye tanto la estabilidad física del depósito como su comportamiento frente a cargas operativas y ambientales. Destacan que, una profunda comprensión de las características de los relaves y del contexto ambiental es crucial para garantizar la estabilidad a largo plazo.

En un análisis más dinámico Kang et al. (2023) discuten la estabilidad de las presas de relaves como un concepto que requiere una evaluación continua tanto de las condiciones físicas como químicas de los materiales de desecho. Este enfoque integral implica entender los riesgos geotécnicos y ambientales asociados con las presas para garantizar su funcionamiento seguro durante y después de su vida operativa.

Por otro lado, Vick (1990) describe la estabilidad de las presas de relaves, como la capacidad de la estructura para contener los materiales de manera segura, teniendo en cuenta la resistencia de los materiales y los factores externos como las condiciones climáticas y sísmicas, recalcando la importancia de una evaluación para prevenir fallos catastróficos.

Dunnicliff (1988) presenta una metodología clave en la ingeniería moderna, enfocada en el uso meticuloso de dispositivos de medición para obtener datos precisos sobre el comportamiento del terreno y las estructuras geotécnicas. Estos datos son indispensables para una evaluación rigurosa de la seguridad estructural y para la anticipación de posibles fallas, sentando las bases para decisiones informadas y proactivas.

ASCE (2018) enfatiza que la instrumentación geotécnica avanzada no solo incluye la acumulación de datos, sino un análisis más profundo, involucrando la interpretación de la información recopilada, uso de software especializado y modelos predictivo para evaluar la integridad de las presas de relaves y otras infraestructuras críticas.

Lynch y Loh (2006) analizan cómo los sistemas de monitoreo geotécnico avanzados se benefician del uso de redes de sensores inalámbricos, los cuales mejoran la capacidad para monitorear estructuras complejas como las presas de relaves en una escala mucho más amplia y con mayor resolución.

Mikkelsen (2003) describe cómo los sistemas avanzados de monitoreo geotécnico utilizan tecnologías como los sensores de fibra óptica para proporcionar medidas en tiempo real de las condiciones del suelo, incluyendo la presión del agua y las deformaciones del terreno, elementos fundamentales para prevenir fallos en presas de relaves.

Engel y Schweimler (2016) examinan el impacto transformador de la telemetría y la automatización en el monitoreo geotécnico. La integración de tecnologías de sensores y el análisis

profundo de datos han habilitado un monitoreo continuo y minucioso de las condiciones estructurales y del suelo, con ello, posibilitando una vigilancia y un análisis remotos de parámetros críticos para la seguridad de las estructuras geotécnicas, asegurando una respuesta rápida y eficaz ante cualquier señal de potencial inestabilidad.

Métodos de solución y formas de implementación

Cerda (2022) presenta una metodología avanzada para la instrumentación y el monitoreo geotécnico de depósitos de relaves, combinando tecnologías tradicionales con métodos modernos e integrando sistemas complejos de instrumentación con plataformas de monitoreo para lograr una comprensión profunda del estado del depósito y facilitar la toma de decisiones. La propuesta se centra en los siguientes aspectos de monitoreo:

- Monitoreo del nivel freático y presiones de poros: Se emplean sensores de cuerda vibrante y piezómetros automáticos para el seguimiento en tiempo real, complementados con piezómetros de Casagrande y piezómetros dinámicos, útiles especialmente en situaciones sísmicas.
- Monitoreo de filtraciones: Se sugiere el uso de piezómetros automáticos y medidores de flujo, como caudalímetros y vertederos de aforo, y se recomienda la tomografía de resistividad eléctrica (ERT) para observaciones a largo plazo.
- Monitoreo de deformaciones: Incluye clinoextensómetros para asentamientos y deformaciones horizontales, GPS/GNSS para deformaciones superficiales y estaciones robóticas para mediciones precisas, además de escáneres láser, radares de estabilidad de taludes y tecnologías como LiDAR, InSAR o fotogrametría.
- Monitoreo de aceleraciones sísmicas: Clave en el registro de la respuesta sísmica del suelo, muro y roca en tiempo real mediante acelerómetros.

- Monitoreo de condiciones climáticas: Implementación de estaciones meteorológicas automáticas para variables como velocidad y dirección del viento, temperatura, humedad y lluvia.
- Monitoreo de revancha: Uso de fotogrametría con drones o imágenes satelitales, y limnímetros para evaluar el talud de aguas arriba del muro.
- Monitoreo de caudal: Utilización de caudalímetros o vertederos de aforo para analizar la eficiencia del drenaje.
- Monitoreo de la distancia a la laguna de aguas claras y su volumen: Aplicación de tecnología LiDAR o InSAR, por satélite o dron, y levantamientos batimétricos.
- Plataforma de monitoreo: Integración y visualización en tiempo real de la información recolectada, con funciones de seguridad, establecimiento de umbrales, generación de alarmas y visualización intuitiva.

Para implementar esta metodología, Cerda (2022) sugiere seguir las siguientes fases:

- Fase 1 - Evaluación y diagnóstico preliminar: Incluye la recopilación y análisis de datos históricos, evaluación de la infraestructura existente y determinación de áreas críticas para el monitoreo.
- Fase 2 - Diseño y selección de Instrumentación: Selección de instrumentos adecuados para cada aspecto del monitoreo.
- Fase 3 - Instalación y calibración: Colocación y ajuste de los instrumentos, asegurando su funcionamiento óptimo.
- Fase 4 - Integración de datos y desarrollo de la plataforma: Desarrollo de una plataforma de monitoreo que integre y procese los datos de todos los instrumentos.

- Fase 5 - Monitoreo y análisis continuo: Monitoreo constante y análisis de datos para detectar anomalías o potenciales fallas.
- Fase 6 - Mantenimiento y actualización del sistema: Mantenimiento regular y actualización del sistema para adaptarse a nuevas tecnologías y requerimientos operativos.

Esta metodología busca proporcionar un monitoreo integral y eficaz de los depósitos de relaves, integrando diversas tecnologías y enfoques para garantizar su seguridad y estabilidad.

Vargas (2019) propuso un enfoque integrado para la instrumentación de presas de relaves, aplicable desde la fase de construcción hasta la operación y abandono final, enfocándose en la instalación de extensómetros lineales y medidores de grietas o juntas en todo el perímetro de la presa, para garantizar una vigilancia exhaustiva, permitiendo la detección temprana de cualquier agrietamiento o deslizamiento potencial. Además, se destacó la importancia de complementar estos equipos con otros instrumentos como inclinómetros, deformímetros, niveles hidráulicos de asentamientos (NHA) y piezómetros para permitir una evaluación profunda y detallada del estado de la presa.

Para una implementación efectiva de esta metodología, Vargas (2019) sugiere seguir un enfoque estructurado en varias fases:

- Fase 1 - Evaluación y planificación inicial: Esta fase implica una evaluación minuciosa de la presa y del terreno circundante. Se utilizan referencias superficiales para medir con precisión tanto los asentamientos como los desplazamientos horizontales.
- Fase 2 - Diseño y selección de instrumentación: Durante esta etapa, se procede a la instalación de instrumentos desde el comienzo de la construcción de la presa. Esto

incluye deformómetros tipo Cross Arms, que son fundamentales para el monitoreo de asentamientos profundos y ofrecen datos complementarios a otros instrumentos.

- Fase 3 - Instalación de inclinómetros y niveles hidráulicos de Asentamientos (NHA): Se instalan inclinómetros para detectar movimientos y asentamientos subterráneos, mientras que los NHA se colocan en líneas longitudinales y transversales para una medición más abarcadora.
- Fase 4 - Implementación de extensómetros lineales y piezómetros: Los extensómetros lineales se utilizan para la detección precoz de grietas o fallas potenciales en los taludes, y los piezómetros para monitorear los niveles de agua y la presión de poros.
- Fase 5 - Monitoreo y análisis continuo: Esta fase se centra en la evaluación constante de los datos recolectados por los instrumentos, buscando señales de anomalías o fallas potenciales.
- Fase 6 - Mantenimiento y actualización del sistema: Incluye el mantenimiento regular de los instrumentos y la actualización de la tecnología usada, adaptándose a las necesidades cambiantes de la presa y a los avances en el monitoreo geotécnico.

Esta metodología avanzada, propuesta por Vargas, busca proporcionar un monitoreo integral y efectivo de las presas de relaves, integrando diversas tecnologías y enfoques para garantizar la seguridad y la estabilidad de estas estructuras a lo largo del tiempo.

Tecnologías asociadas

Las tecnologías asociadas que se han utilizado en estudios similares al presente trabajo son las siguientes:

Telemetría

Clarkson y Williams (2021) examinaron cómo los sistemas de telemetría han revolucionado el monitoreo de las presas de relaves, mejorando significativamente la eficiencia y precisión en la gestión de estas estructuras. Al incorporar elementos como dataloggers y sensores, permite un seguimiento más frecuente y detallado, lo que, a su vez, mejora la comprensión más profunda de los comportamientos y riesgos geotécnicos asociados a las presas de relaves. Aunque en la comunidad científica se debate sobre la capacidad de estos sistemas para prevenir fallos, la telemetría se considera en general una herramienta esencial para anticipar y gestionar los riesgos. Destacando que este sistema es eficiente energéticamente, siendo capaces de operar en modos de bajo consumo, lo que los hace sostenibles y prácticos para uso a largo plazo.

Imágenes InSAR (Interferometría de Apertura Sintética)

Torres et al. (2021) destacaron el uso de imágenes satelitales InSAR (Interferometría de Apertura Sintética) en la mina de Utunsa, Perú. Donde se empleó para medir las deformaciones de la superficie de la mina, incluidos hundimientos, levantamientos, movimientos de taludes y deslizamientos. Su aplicación fue particularmente efectiva durante el periodo de junio de 2018 a junio de 2019, enfocándose en un evento crítico detectado entre febrero y marzo de 2019. La cual proporcionó una serie de ventajas significativas, puesto que permitió realizar mediciones de alta densidad en extensas áreas. Es fundamental para la detección temprana de anomalías en la deformación y la identificación de desplazamientos potencialmente peligrosos. Demostró ser una herramienta valiosa para la mina, ya que facilitó la prevención y alerta a tiempo de posibles escenarios de deslizamiento o eventos indeseables en su infraestructura minera.

Estación robótica

Torres et al. (2021) destacaron la implementación del sistema GEOMOS, una estación robotizada, en la mina de Utunsa (Perú), que se caracterizó por su capacidad de funcionamiento

automatizado y control remoto. Representó un avance considerable respecto a los métodos tradicionales de monitoreo geotécnico, ofreciendo un monitoreo en tiempo real que permitió una detección casi instantánea de cambios en las condiciones geotécnicas de la mina. Una de las características más notables de GEOMOS fue su capacidad para integrar datos procedentes de diversas fuentes de instrumentación, mejorando la precisión y eficacia en la evaluación de la estabilidad geotécnica, facilitando la gestión y el análisis de grandes volúmenes de datos. Se convirtió en una herramienta indispensable para la toma de decisiones informadas y oportunas. Además, su combinación con InSAR proporcionó una visión holística y detallada de la dinámica geotécnica en la Mina de Utunsa. Se tradujo en una mejora significativa de la seguridad y la estabilidad operativa, mostrando un enfoque innovador que resultó exitoso en la Mina de Utunsa. Estableciendo un valioso precedente y un modelo a seguir en la implementación de tecnologías avanzadas para la monitorización geotécnica en operaciones mineras.

Instrumentación geotécnica moderna

Alva y Escalaya (2011) analizaron la implementación de tecnología geotécnica avanzada en la presa Pillones, ubicada en Arequipa, Perú. Se instalaron 17 piezómetros eléctricos de cuerda vibrante y 5 piezómetros hidráulicos, esenciales para monitorear los niveles de agua y prever la estabilidad de los taludes, así como 10 celdas de asentamiento y 5 inclinómetros distribuidos en tres secciones diferentes de la presa. El fin fue medir asentamientos y movimientos transversales en el terreno. La instrumentación también contó con acelerógrafos, en particular el modelo Altus K2 equipado con acelerómetros triaxiales episensor, que permitieron registrar la aceleración del suelo durante eventos sísmicos. Como resultados proporcionó datos valiosos para comprender y mitigar potenciales riesgos sísmicos. Este conjunto de herramientas y técnicas, al ser analizado e interpretado adecuadamente, ha permitido no solo detectar oportunamente cualquier anomalía

durante la construcción y operación de la presa, sino también evaluar de manera continua su comportamiento y seguridad estructural. La efectividad de esta instrumentación en la presa Pillones se ha demostrado al proporcionar mediciones precisas y confiables. Lo que ha resultado en una administración más eficiente y segura de la presa, destacando la importancia de la tecnología geotécnica moderna en la gestión de infraestructuras hidráulicas críticas.

Estas tecnologías y enfoques presentados representan un avance significativo en el campo del monitoreo geotécnico, proporcionando herramientas más eficientes y precisas para la evaluación y gestión de depósitos de relaves.

Definición de términos básicos

Presa de Relaves: Estructura de almacenamiento para residuos mineros, consistiendo en una mezcla de agua y materiales de desecho, siendo cruciales para evitar impactos ambientales adversos y riesgos para la seguridad (Vick, 1990).

Análisis de Estabilidad de Taludes: Evaluación de la estabilidad física de una presa, utilizando métodos numéricos y análisis geotécnicos para prevenir fallos (Duncan, 1996).

Control de Estabilidad en Presas de Relaves: Es el conjunto de prácticas y técnicas destinadas a mantener la integridad y seguridad de una presa de relaves, abarcando desde el diseño estructural hasta el monitoreo continuo de su comportamiento (ICOLD, 2019).

TARP's (Tensioned Anchor Retaining Plates System): Sistema utilizado para estabilizar taludes, consiste en placas ancladas que aplican tensión para soportar y fortalecer taludes inestables, siendo útiles en la gestión de la estabilidad de presas de relaves y laderas (Duncan et al., 2014).

Niveles de Alerta: Sistema de clasificación que indica el grado de riesgo o peligro asociado con la condición de una estructura, como una presa de relaves, las cuales pueden variar desde alerta normal (sin peligro) hasta alerta crítica (riesgo inminente de fallo) (ICOLD, 2019).

Modos de Falla: Diferentes maneras en las que una presa de relaves puede fallar, como por filtración, tubificación, sobrepresión de poros, entre otros, las cuales deben ser identificadas para el diseño de medidas preventivas y sistemas de monitoreo (Fell et al., 2018).

Falla por Desbordamiento: Ocurre cuando el nivel del agua en una presa de relaves excede la capacidad de la estructura, causando que el agua sobrepase el muro de la presa, pudiendo ser causado por una planificación inadecuada, precipitaciones excepcionales o fallos en el sistema de drenaje (USBR, 2015).

Falla por Filtración: Tipo de falla que sucede cuando el agua se filtra a través del cuerpo de la presa o su fundación, pudiendo ocasionar erosión interna o el debilitamiento de los materiales de la presa, comprometiendo su integridad estructural (Fell et al., 2018).

Falla de Cimentación: Este modo de falla se produce cuando la base sobre la que se asienta la presa presenta problemas de estabilidad o se debilita, lo que puede llevar a un desplazamiento o colapso de la estructura de la presa (USACE, 2003).

Falla por Tubificación (Piping): Proceso en el que el agua fluye a través de un conducto subterráneo en la presa o su fundación, creando un camino de erosión interno, pudiendo conllevar al colapso de la estructura de la presa (Fell et al., 2018).

Monitoreo Geotécnico Avanzado: Proceso de observación y registro de datos sobre el comportamiento de estructuras geotécnicas, empleando tecnologías avanzadas para identificar cambios críticos o tendencias que puedan señalar problemas potenciales (Mikkelsen, 2003).

Sistemas de Monitoreo en Tiempo Real: Conjunto de herramientas y tecnologías utilizadas para el seguimiento continuo y en tiempo real de parámetros críticos en estructuras geotécnicas (Mikkelsen, 2003).

Monitoreo de Desplazamiento: Proceso de medición y seguimiento de los cambios de posición en una estructura o en el terreno, siendo esenciales en la gestión de la estabilidad de las presas de relaves para identificar movimientos que puedan indicar inestabilidad (Dunnicliff, 1988).

Monitoreo de Nivel de Agua: Método para medir y registrar los cambios en el nivel del agua en estructuras como presas o embalses, con la finalidad de garantizar la estabilidad estructural y operativa de las presas de relaves (Vick, 1990).

Inspección de Relaveras: Proceso de examinar y evaluar el estado y el funcionamiento de una presa de relaves. Las inspecciones regulares son cruciales para identificar problemas

potenciales, garantizar el cumplimiento de las normas de seguridad y llevar a cabo mantenimientos preventivos (ICOLD, 2019).

Instrumentación Geotécnica: Refiere al uso de dispositivos específicos para medir parámetros como presión del suelo, desplazamientos y tensiones, esenciales para la evaluación y el análisis de estructuras geotécnicas (Dunnicliff, 1988).

Hitos Topográficos: Puntos fijos y claramente identificables en el terreno que se utilizan como referencias en mediciones topográficas, siendo esenciales para establecer puntos de control y para realizar mediciones precisas de desplazamientos y deformaciones (Ghilani & Wolf, 2012).

Tecnología de Drones para Monitoreo: Uso de vehículos aéreos no tripulados equipados con cámaras y sensores para recopilar datos en áreas de difícil acceso, siendo útiles para inspecciones visuales y recopilación de datos topográficos (Colomina & Molina, 2014).

Piezómetros: Instrumentos diseñados para medir la presión del agua en el suelo o estructuras como presas, proporcionando datos esenciales para evaluar la estabilidad y el riesgo de fallos estructurales (Terzaghi, 1943).

Sensores de Cuerda Vibrante: Dispositivos utilizados para medir el desplazamiento y la presión en estructuras geotécnicas, cuyo funcionamiento detectan los cambios en la frecuencia de vibración de una cuerda tensada, lo que se correlaciona con el desplazamiento o la presión (Mikkelsen, 2003).

Inclinómetros: Dispositivos usados para medir la inclinación o el movimiento angular de una estructura, especialmente útiles en el monitoreo de la estabilidad de taludes y presas (Mikkelsen, 2003).

Acelerógrafo: Un instrumento utilizado para registrar la intensidad y duración de las aceleraciones del suelo, especialmente durante eventos sísmicos, siendo fundamentales para

evaluar cómo las estructuras responden a la actividad sísmica y para diseñar medidas de mitigación apropiadas (Kramer, 1996).

Imágenes InSAR (Interferometría de Apertura Sintética): Técnica de radar que utiliza la interferencia de ondas de radio para crear imágenes y medir pequeños desplazamientos en la superficie de la Tierra, útil para monitorear deformaciones en presas de relaves (Gabriel et al., 1989).

Estación Robótica: Dispositivo automatizado utilizado en topografía que combina las funcionalidades de una estación total con la capacidad de ser operada a distancia, permitiendo la medición y el seguimiento preciso de puntos geográficos sin necesidad de operación manual constante (Ghilani & Wolf, 2012).

Radar: Tecnología que utiliza ondas de radio para detectar y medir características físicas de estructuras geotécnicas, con el objetivo de evaluar cambios superficiales y movimientos en tiempo real, ofreciendo una herramienta valiosa para la detección temprana de inestabilidades y deformaciones (Luzi et al., 2004).

Telemetría: Tecnología que permite la medición y transmisión de datos desde ubicaciones remotas a un centro de control, la cual es utilizada para transmitir datos de monitoreo en tiempo real, como niveles de agua y presiones de poros (Mikkelsen, 2003).

Centro de Control: Instalación donde se recopilan, monitorean y analizan los datos procedentes de la instrumentación geotécnica, siendo esenciales para la toma de decisiones en el manejo de presas de relaves y su respuesta ante una emergencia (USBR, 2015).

Propuesta de Solución

Metodología de la solución

La metodología de solución adoptada se estructuró de la siguiente manera:

- **Análisis y evaluación de la información existente:** Se realizó una evaluación de los datos históricos de los instrumentos geotécnicos, lo que permitió identificar limitaciones y necesidades específicas para la mejora del sistema de monitoreo.
- **Implementación de tecnologías modernas:** La adopción de tecnologías avanzadas como las imágenes satelitales Insar, los acelerógrafos, el radar FastGBSAR y la estación robótica Leica GeoMoS, complementó el monitoreo tradicional.
- **Nueva campaña de perforación e instrumentación geotécnica:** Se llevó a cabo una campaña de perforaciones geotécnicas, instalando instrumentos modernos como piezómetros eléctricos e inclinómetros, para fortalecer el sistema de monitoreo.
- **Automatización y adaptación a la telemetría:** Se integraron sistemas de telemetría en varios instrumentos geotécnicos, facilitando la recopilación y transmisión de datos en tiempo real y mejorando la eficiencia en la gestión de datos.
- **Definición de los niveles de alerta:** A través de análisis de sensibilidad de estabilidad de taludes y otros estudios, se establecieron TARPs precisos y niveles de alerta, para una respuesta rápida y eficaz en situaciones críticas.
- **Evaluación de riesgos y planificación de respuesta:** Se efectuó una evaluación de riesgos utilizando la metodología del Bow Tie, enfocándose en los modos de falla potenciales y la planificación de contingencias y respuestas de emergencia.
- **Implementación del centro de control:** Se estableció un centro de control para la gestión integral de la información y supervisión continua.

- Evaluación y monitoreo continuo: Se implementó un sistema de monitoreo constante, apoyado por inspecciones y la elaboración de informes geotécnicos.

En la Tabla 1 se presenta un resumen del proceso secuencial de la propuesta de solución.

Tabla 1

Proceso secuencial de la propuesta solución

Nº	Proceso Secuencial	Descripción	Entregables
1	Análisis y evaluación de la información existente	Evaluación de los datos históricos y estado actual de los instrumentos geotécnicos en la presa.	Figuras, de la evaluación realizada.
2	Implementación de tecnologías modernas	Adopción de tecnologías avanzadas como el radar interferométrico FastGBSAR y estaciones robóticas.	Figuras, tablas y descripción de la implementación.
3	Nueva campaña de perforación e instrumentación geotécnica	Campaña de perforaciones con instalación de nuevos instrumentos como piezómetros eléctricos y acelerógrafos.	Planos, figuras, tablas, cronograma y descripción detallada de la instalación.
4	Automatización y adaptación a la telemetría	Integración de sistemas de telemetría para la recopilación y transmisión de datos en tiempo real.	Planos, figuras, tablas, flujogramas y protocolos.
5	Definición de los niveles de alerta	Análisis de sensibilidad de estabilidad de taludes para establecer TARPs y niveles de alerta.	Figuras, tablas y descripción de los análisis realizados.
6	Evaluación de riesgos y planificación de emergencias	Evaluación meticulosa de riesgos y planificación de contingencias y respuestas de emergencia.	Figuras, tablas y flujogramas.
7	Implementación del centro de control	Establecimiento de un centro de control para la gestión integral de la información y supervisión continua.	Figuras y tablas.

N°	Proceso Secuencial	Descripción	Entregables
8	Evaluación y monitoreo continuo	Implementación de un sistema de monitoreo constante y elaboración de informes detallados.	Figuras, tablas y formatos de inspección.

Nota. Elaboración propia.

Desarrollo de la solución

Análisis situacional

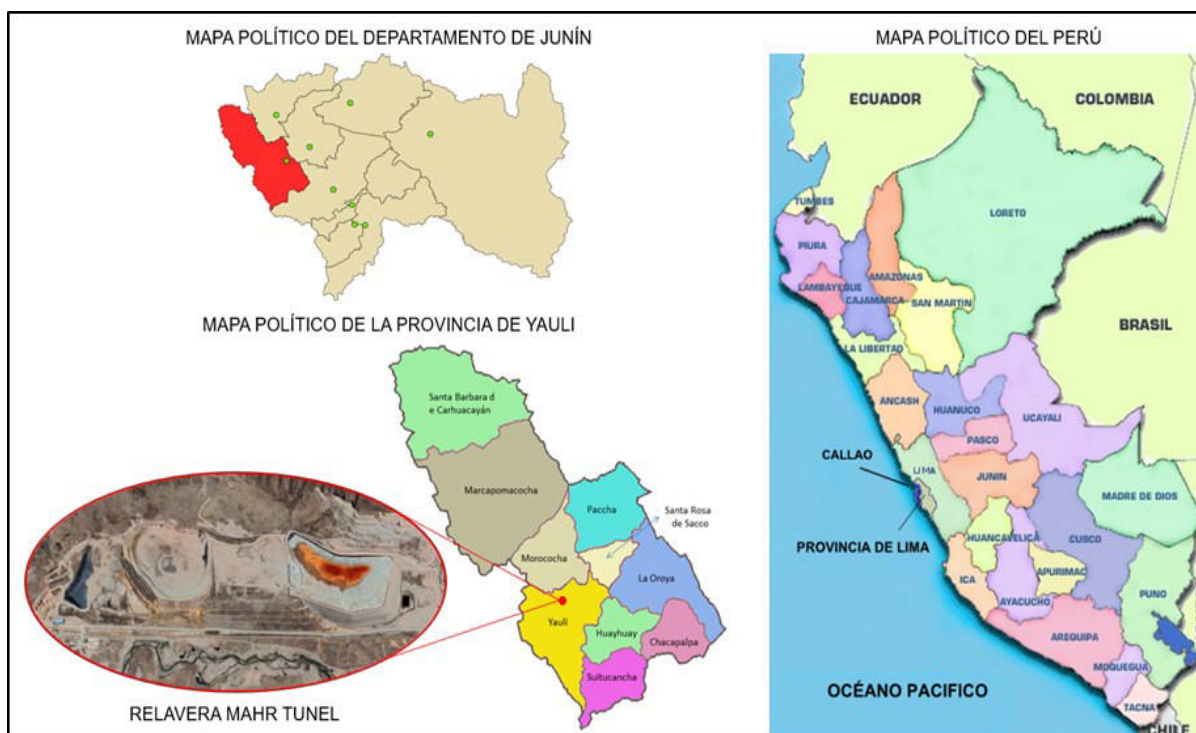
Volcan Compañía Minera S.A.A. Cuenta con 6 unidades, siendo una de ellas la unidad minera de San Cristóbal. Se extrae minerales tratados en la planta concentradora Mahr Túnel y los relaves de la planta son enviados a la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel. El cual se encuentra en su etapa final de recrecimiento, cuyo final de vida útil fue en diciembre del 2019, por lo que desde la fecha se encuentra inoperativo.

Ubicación

La presa de depósitos de relaves Mahr Túnel, se encuentra ubicado en el departamento de Junín, provincia y distrito de Yauli, situándose referencialmente a unos 4 km al suroeste de centro poblado de Yauli con una altitud promedio de 4 000 msnm como se muestra en la Figura 2.

Figura 2

Ubicación de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel



Nota. Elaboración propia.

Ruta y acceso

Su acceso desde la ciudad de Lima es a través de la carretera central Lima – La Oroya hasta llegar al paraje Calera Cut Off en el km 159, de donde sale una carretera afirmada que pasa por la C. H. Pachachaca llegando posteriormente a los depósitos de relaves Mahr Túnel con un recorrido de 6 km aproximadamente.

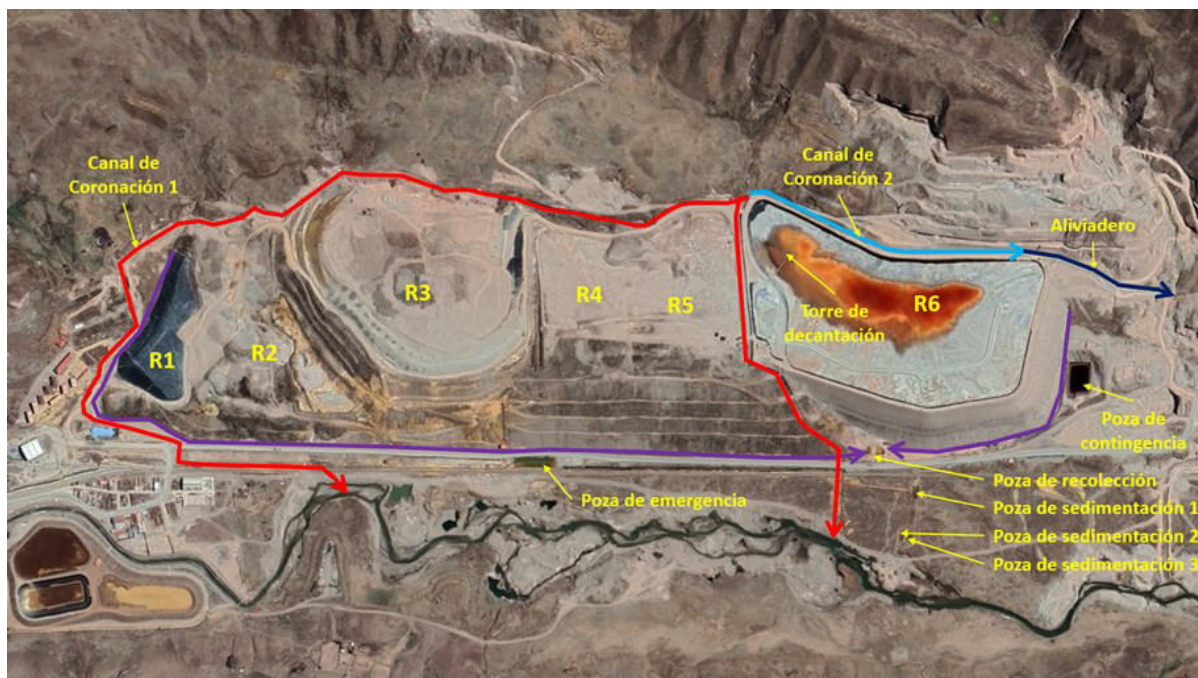
Características de la presa de relaves

La presa de depósitos de relaves Mahr Túnel está estructurada por múltiples componentes que se han ido desarrollando y adaptando a lo largo del tiempo, respondiendo a las necesidades operativas y a los estándares de seguridad y ambientales. En Figura 3 se visualiza la ubicación de los componentes, los cuales se encuentran compuestas por: depósitos de relaves 1, 2, 3, 4, 5 y 6,

torre de decantación, aliviadero, canal de coronación 1 y 2, canal de aguas ácidas y sistema de tratamiento de agua de contacto (pozas de contingencia, recolección, emergencia, sedimentación 1, 2 y 3).

Figura 3

Componentes de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel



Nota. Elaboración propia.

Desarrollo de la metodología de solución

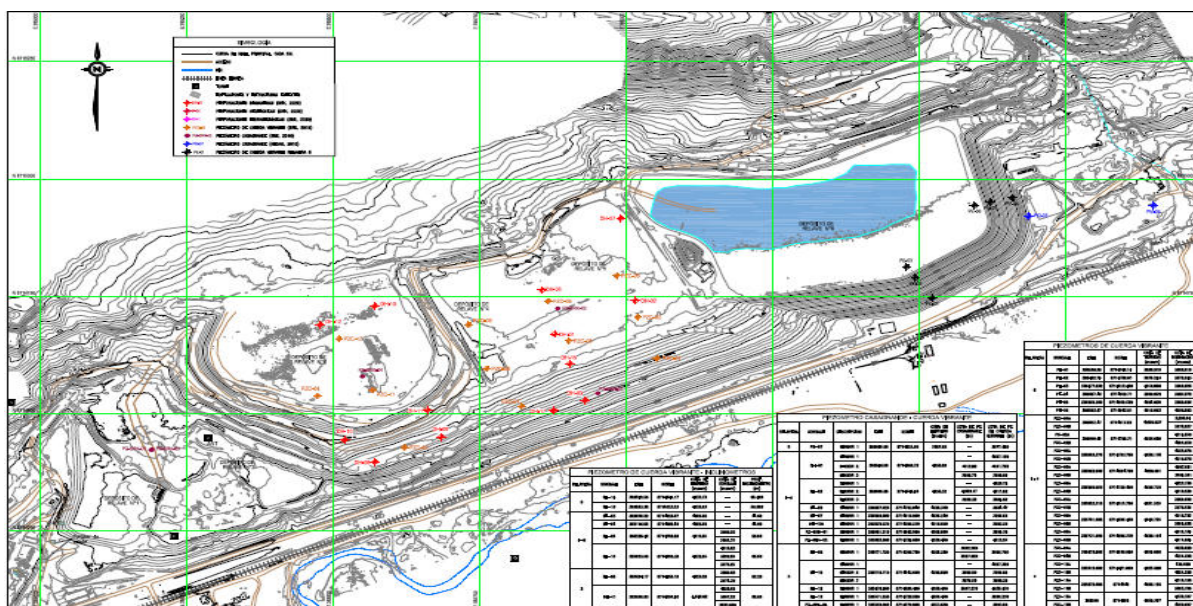
Análisis y evaluación de la información existente

Recopilación de información histórica

La primera fase del proyecto se centró en recopilar datos históricos de instrumentación y monitoreo geotécnico desde 2016 hasta 2021. En el proceso se identificaron 7 piezómetros tipo casagrande, 12 piezómetros eléctricos de cuerda vibrante y 5 hitos topográficos cuyas ubicaciones se muestran en la Figura 4.

Figura 4

Ubicación de instrumentos geotécnicos existentes desde el 2016 hasta el 2021



Nota. Elaboración propia.

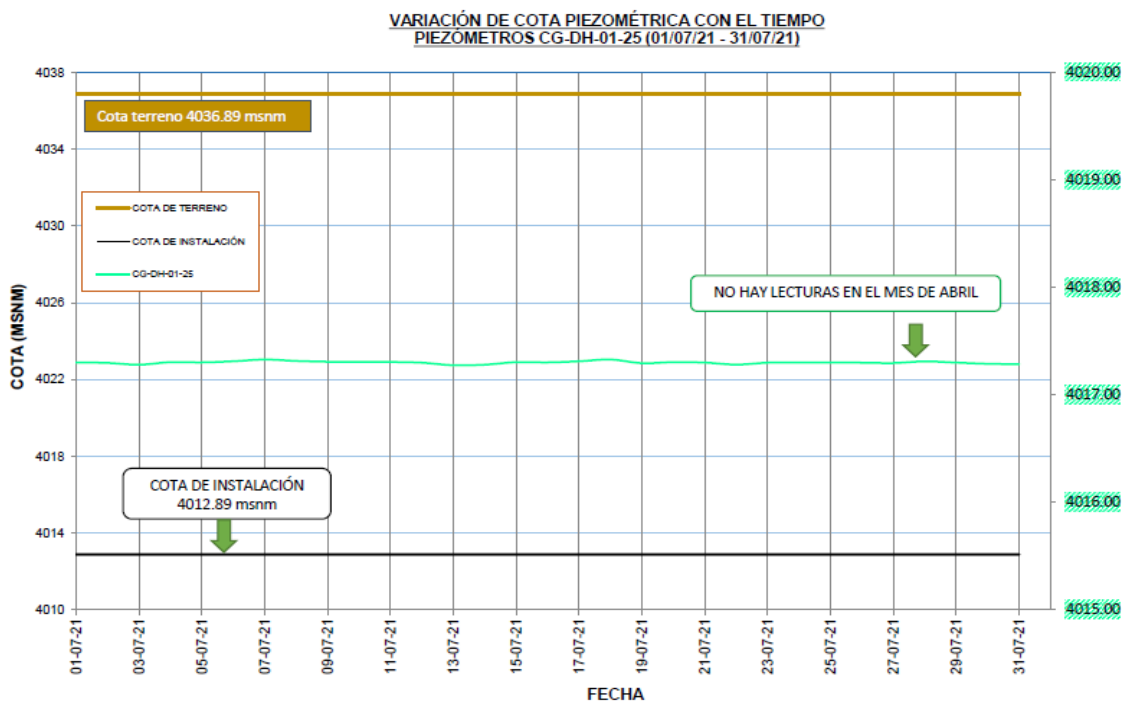
Análisis y evaluación de la información recopilada

En esta etapa se puso especial énfasis en los registros históricos de los piezómetros, tanto de tipo casagrande como eléctricos de cuerda vibrante, elementos clave para entender la dinámica hídrica y la estabilidad de la presa. La revisión detallada de estos registros, ilustrados en la Figura 5, Figura 6 y Figura 7, mostró una variabilidad considerable en la frecuencia de los datos, desde registros diarios hasta periodos sin datos, planteando así un desafío significativo para interpretar las condiciones geotécnicas de la presa.

La Figura 5 muestra los registros típicos de los piezómetros tipo casagrande desde 2016 hasta 2021, donde se observaron retrasos en la respuesta de estos instrumentos, limitando su capacidad para reflejar cambios rápidos en las condiciones hídricas.

Figura 5

Registro típico de los piezómetros tipo casagrande, desde el 2016 hasta el 2021

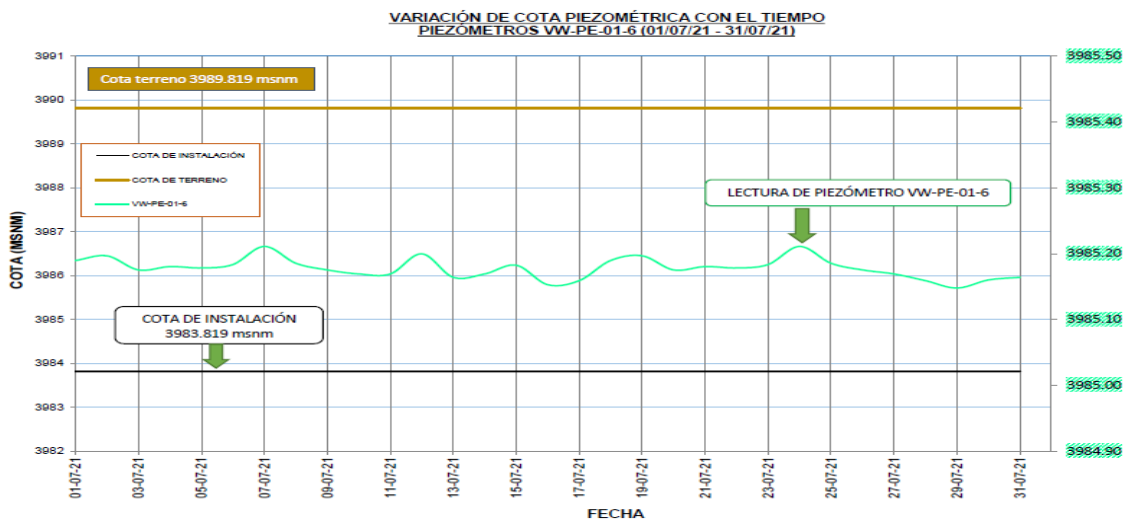


Nota. Elaboración propia.

Por otro lado, la Figura 6, que ilustra el nivel piezométrico en el mismo periodo, reveló discrepancias entre los niveles de agua registrados por los piezómetros y los datos de precipitación, indicando posibles problemas en la correlación de los datos. Además, se evidenció que los sensores de cuerda vibrante enfrentan limitaciones en su capacidad de respuesta, especialmente bajo estrés ambiental extremo, como en casos de lluvias intensas o fluctuaciones de temperatura, su rendimiento disminuye. Por otra parte, la cobertura del monitoreo también mostró deficiencias, con áreas de la presa que presentaban una densidad insuficiente de instrumentos, llevando a puntos ciegos con mediciones escasas o nulas, ofreciendo una imagen incompleta de las condiciones geotécnicas del lugar.

Figura 6

Registro de nivel piezométrico desde el 2016 hasta el 2021

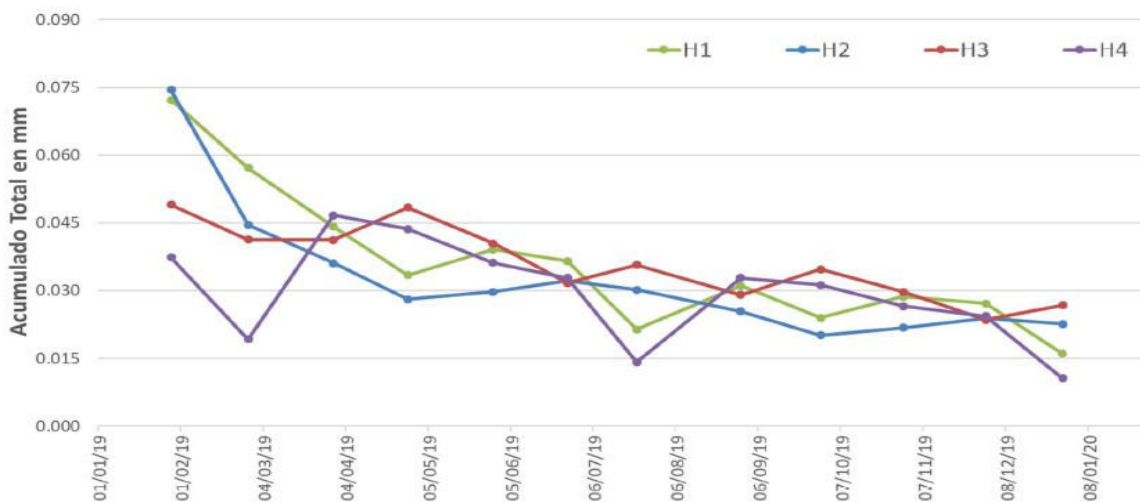


Nota. Elaboración propia.

Finalmente, los registros mostrados en la Figura 7 no mostraron una línea de tendencia confiable, puesto que no existía los datos necesarios desde su instalación

Figura 7

Registro de desplazamiento vertical de la relavera 6 desde el 2019 hasta el 2021



Nota. Elaboración propia.

En los siguientes subcapítulos, se describen detalladamente los trabajos realizados para la optimización del monitoreo geotécnico de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel.

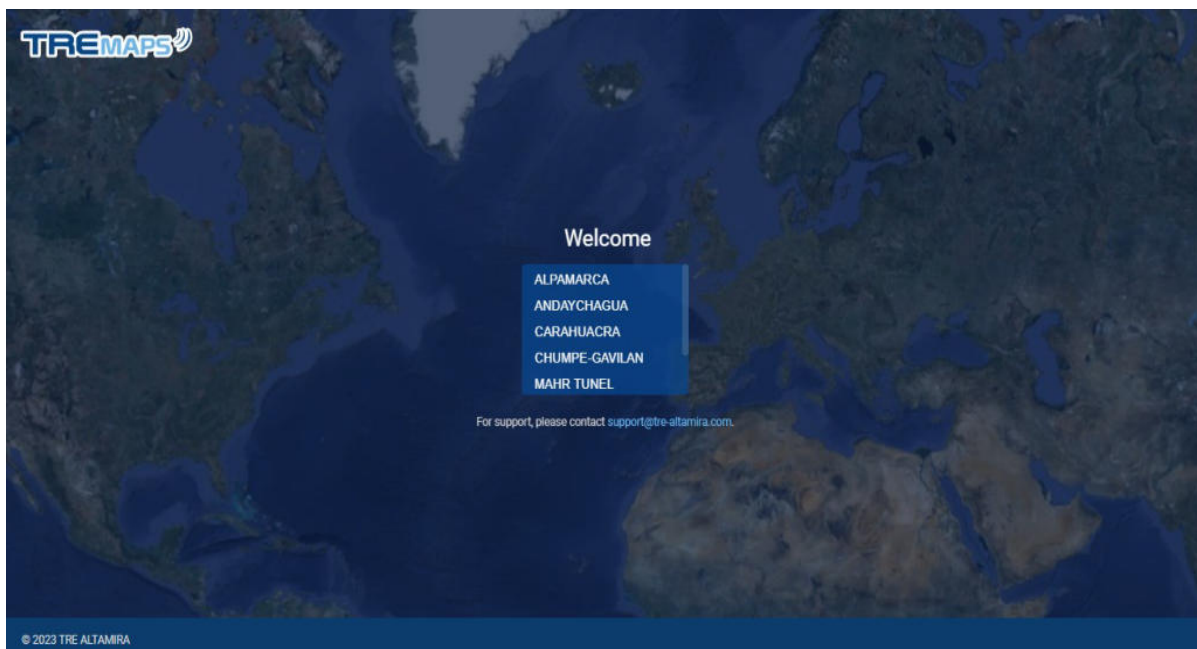
Implementación de tecnologías modernas

Adquisición de imágenes satelitales InSAR

En julio de 2021, Volcán Compañía Minera S.A.A. emprendió una iniciativa para fortalecer el monitoreo geotécnico de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel mediante la adquisición de imágenes satelitales InSAR. Esta tecnología, utilizando datos capturados por satélites especializados como TerraSAR-X en modo ascendente y Sentinel en modo descendente, proporcionó una cobertura completa de la presa, facilitando la identificación de cambios en la superficie. La Figura 8 muestra la interfaz de la plataforma Tre Maps.

Figura 8

Plataforma Tre Maps – Imágenes satelitales InSAR



Nota. Elaboración propia.

Los datos recogidos por la tecnología InSAR se gestionan en la plataforma Tre Maps con una frecuencia de 15 días. Esta técnica es efectiva bajo cualquier condición climática y a cualquier hora, lo que garantiza un monitoreo continuo de la presa. Los primeros puntos de monitoreo, establecidos a partir de estas imágenes, se pueden ver en la Figura 9.

Figura 9

Imágenes satelitales InSAR, puntos de monitoreo

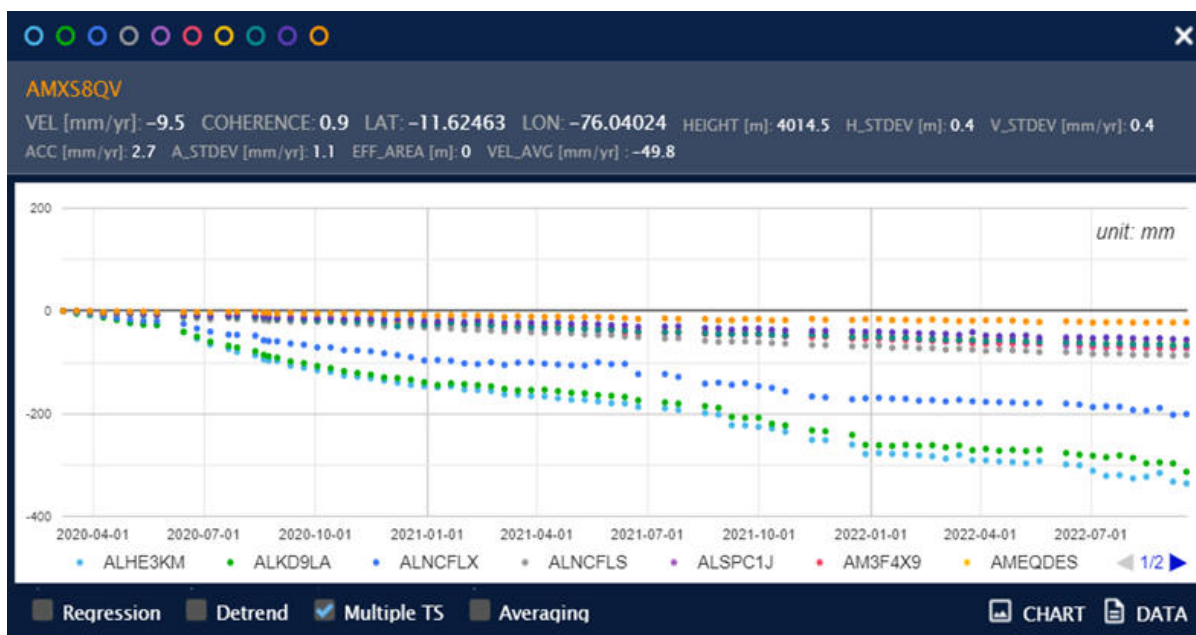


Nota. Elaboración propia.

La Figura 10 muestra una serie de valores típicos de desplazamiento vertical registrados por la tecnología InSar para la presa de relaves 6.

Figura 10

Serie temporales del desplazamiento vertical, relavera 6



Nota. Elaboración propia.

Instalación de la estación robótica Leica GeoMoS

En septiembre de 2021, como parte de la modernización del monitoreo geotécnico de la presa de relaves Mahr Túnel, se puso en marcha la instalación de la estación robótica Leica GeoMoS y los prismas GPR112 para el monitoreo geotécnico de la presa de relave 6. La implementación se realizó en 4 fases:

La fase inicial, comenzó con una inspección detallada de las relaveras para evaluar las condiciones del terreno y determinar las ubicaciones óptimas para la estación robótica y los 52 hitos topográficos. La Figura 11 ofrece una perspectiva panorámica de las presas de relaves 4, 5 y 6, destacando la zona donde se implementaría este avanzado sistema de monitoreo.

Figura 11

Vista panorámica de la presa de relaves 4, 5 y 6, inspección de la zona

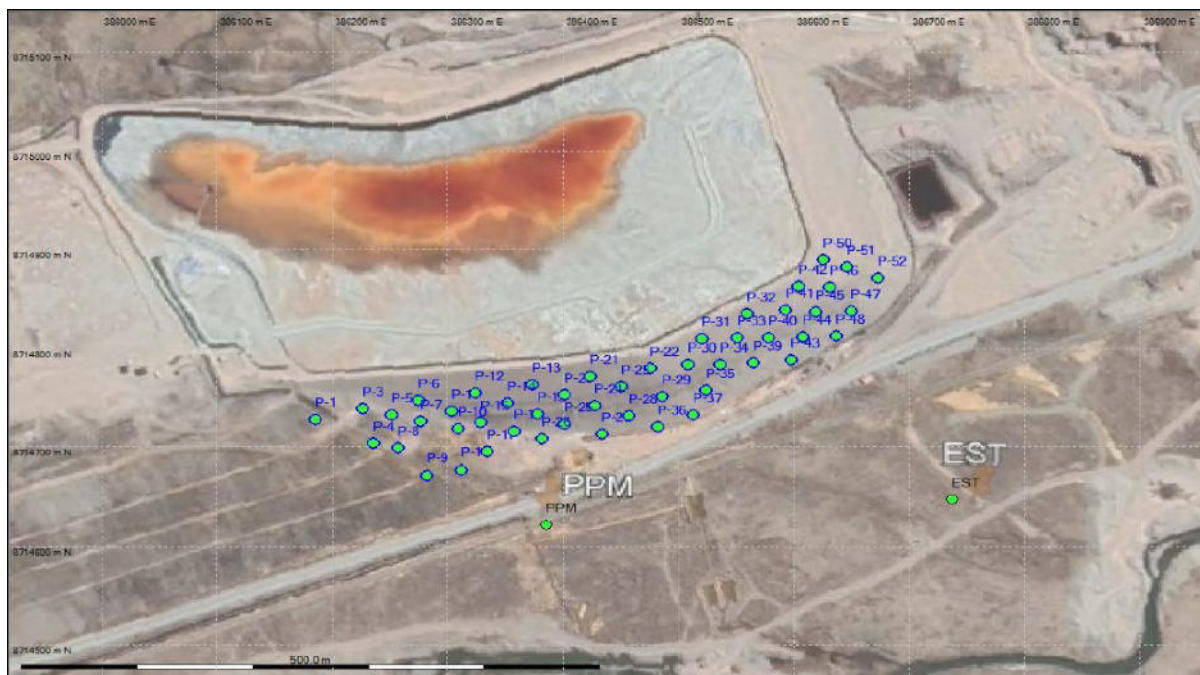


Nota. Elaboración propia.

En la segunda fase, se procedió con la instalación de un pilar o trípode en una ubicación estable y la colocación estratégica de 52 hitos topográficos en diversos puntos de la presa, que incluyó mediciones precisas de coordenadas y orientación para asegurar un monitoreo efectivo. La ubicación de los hitos topográficos se muestra en la Figura 12.

Figura 12

Ubicación de los hitos topográficos y estación robótica (EST)



Nota. Elaboración propia.

La Figura 13 documenta el proceso de fabricación de los hitos topográficos.

Figura 13

Proceso de fabricación de los hitos topográficos



Nota. Elaboración propia.

La Figura 14 muestra el proceso de instalación de las primas en los hitos.

Figura 14

Instalación de los prismas en los hitos topográficos

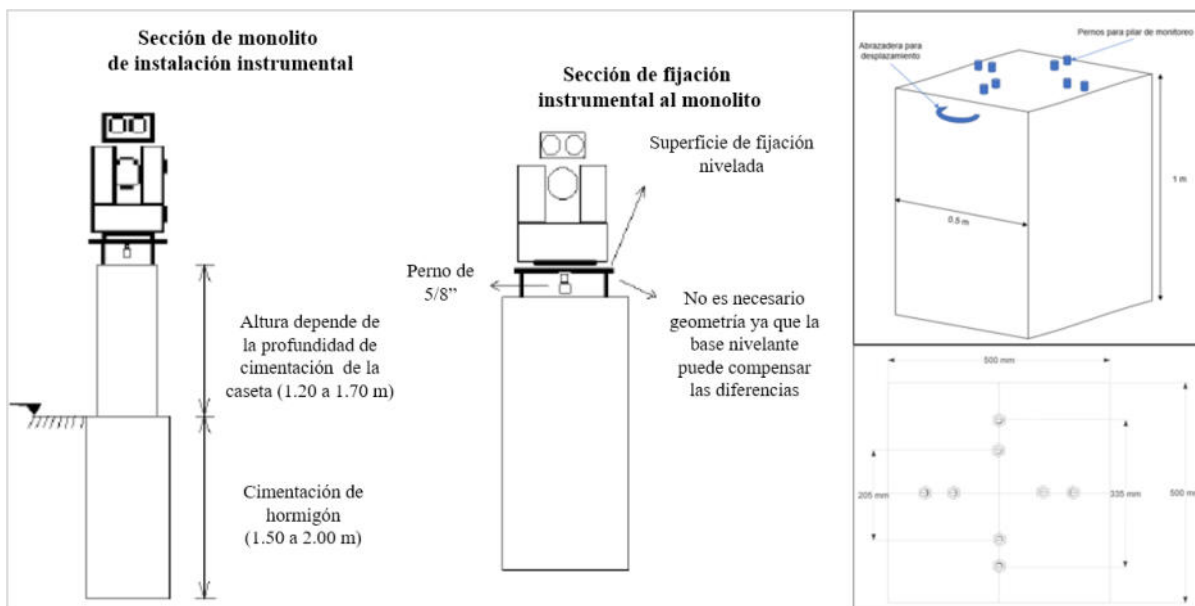


Nota. Elaboración propia.

La tercera se centró en la instalación de una caseta de protección para la estación robótica, equipada con aire acondicionado para mantener un ambiente operativo ideal. La Figura 15 muestra la sección de la estructura de soporte diseñada para esta estación.

Figura 15

Sección de la estructura de soporte de la estación robótica



Nota. Elaboración propia.

Los procesos de construcción de la estructura de soporte, instalación de la caseta y su cerco perimétrico se detallan en la Figura 16 y Figura 17.

Figura 16

Proceso de instalación de la caseta de la estación robótica



Nota. Elaboración propia.

Figura 17

Proceso de instalación del cerco perimétrico de la estación robótica



Nota. Elaboración propia.

La construcción final de la caseta de seguridad y la configuración completa de la estación robótica se presenta en la Figura 18.

Figura 18

Construcción final de la caseta de la estación robótica

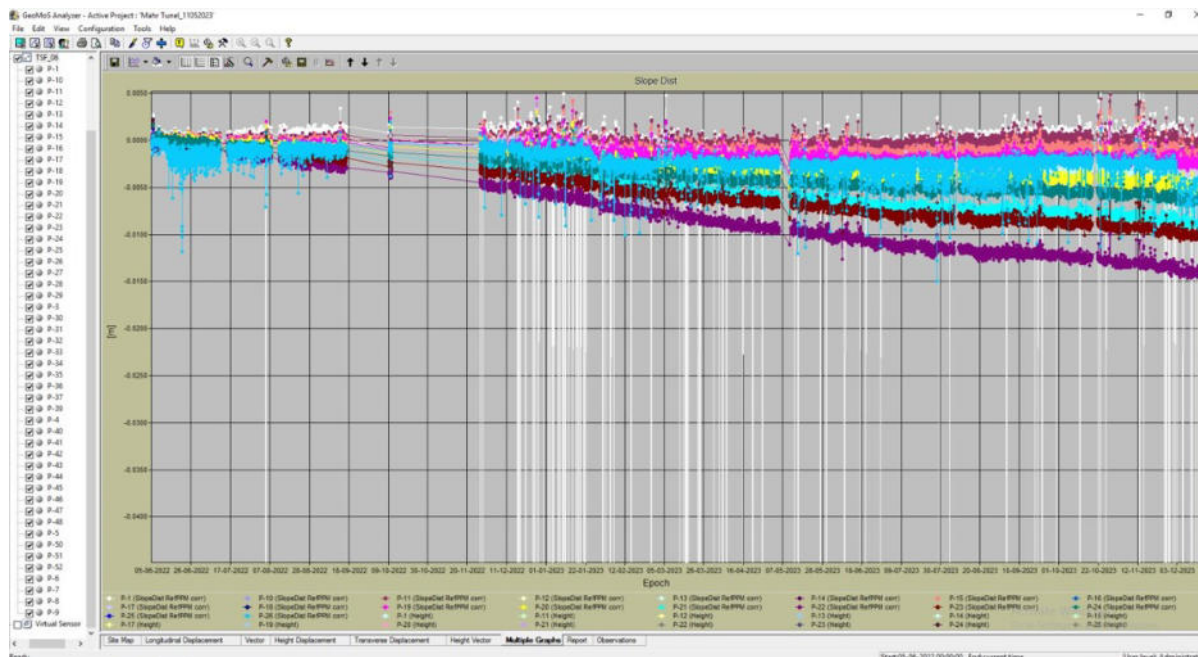


Nota. Elaboración propia.

En la última fase, se instaló y configuró el software GeoMoS Monitor y Analizador, herramientas esenciales para el registro y análisis de datos, como se muestra en la Figura 19.

Figura 19

Plataforma de monitoreo del software Geomos Analyzer



Nota. Elaboración propia.

Instalación del radar FastGBSAR

Continuando con la adopción de tecnologías avanzadas en la presa de relaves Mahr Túnel, se llevó a cabo en noviembre de 2021, la instalación del radar FastGBSAR, un sistema de monitoreo de última generación. En la Tabla 2 se presentan los datos generales de este radar, incluyendo su ubicación y modelo.

Tabla 2

Datos generales del radar FastGBSAR, ubicación y modelo

Código	Coordenadas UTM WGS-84			Modelo
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)	
Radar	386694.336	8714604.128	3978	FastGBSAR

Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 3 se detallan las especificaciones técnicas del radar FastGBSAR.

Tabla 3

Especificaciones técnicas del radar FastGBSAR

Descripción	Valor
Frecuencia de Emisión	17.2 GHz (Banda Ku)
Resolución espacial	0.5m x 4.3 m
Rango operativo	10 m a 6 km
Tiempo mínimo de escaneo	4.0 s
Tiempo mínimo entre dos escaneos	10.0 s
Potencia Isotrópica Radiada Efectiva (EIRP)	19 a 42 dBm
Exactitud	± 0.1mm
Peso del sistema	145 kg
Grado de protección IP	IP65
Rango de temperatura operativa	-20 °C a 60 °C
Consumo de energía	< 200 W

Nota. Elaboración propia.

El proceso de instalación comenzó con una evaluación de la zona, como se muestra en la Figura 20, donde se inspeccionó la relavera 6 para determinar el punto de vista para el radar.

Figura 20

Punto de vista de la relavera 6 del radar FastGB SAR, inspección de la zona



Nota. Elaboración propia.

Luego, como se observa en la Figura 21, se procedió a montar la estructura de soporte y el gabinete de control del radar.

Figura 21

Instalación de la estructura de soporte de radar y gabinete de control



Nota. Elaboración propia.

Para garantizar una operación autónoma y sostenible del sistema completo del radar, se instalaron paneles solares, como se observa en la Figura 22.

Figura 22

Instalación de paneles solares

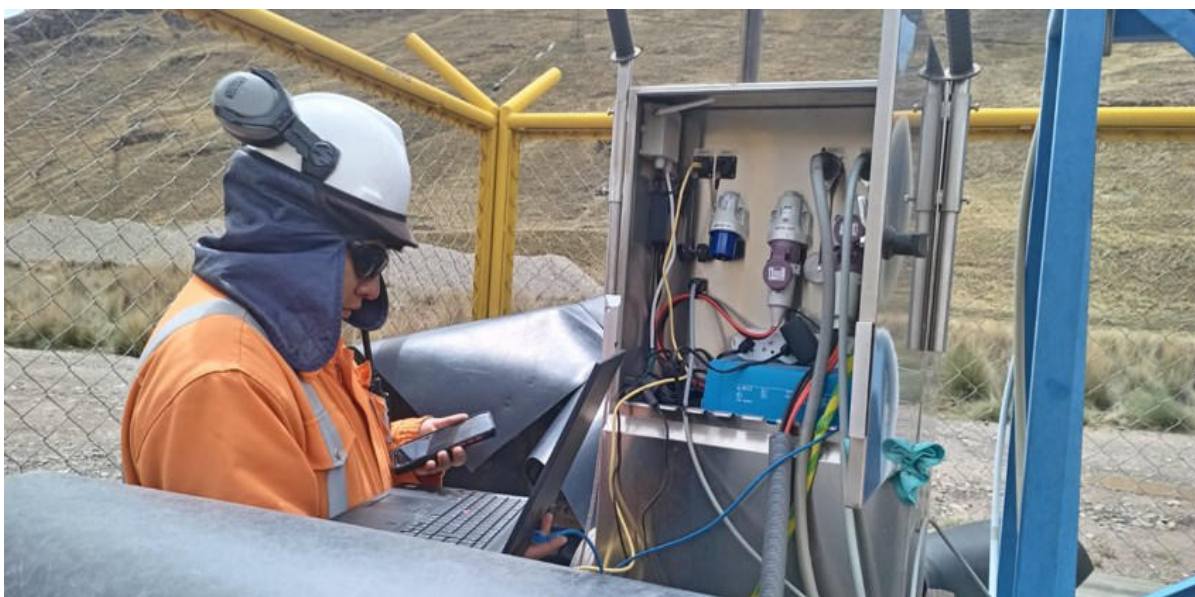


Nota. Elaboración propia.

Posteriormente, se realizó el ajuste y configuración en el campo del radar se llevó a cabo con cuidado y precisión, tal como se documenta en la Figura 23.

Figura 23

Proceso de configuración del radar en campo



Nota. Elaboración propia.

La instalación final del radar, mostrada en la Figura 24, marcó la conclusión del montaje, estableciendo una herramienta vital para el monitoreo continuo de la presa.

Figura 24

Instalación final del radar FastGBSAR



Nota. Elaboración propia.

Para maximizar la eficacia del monitoreo, el radar se situó con un ángulo de apertura de 58° , como se muestra en la Figura 25, lo que permitió una extensa cobertura de la zona.

Figura 25

Posición y línea de vista aproximada (58° de apertura) de Radar Postura 2

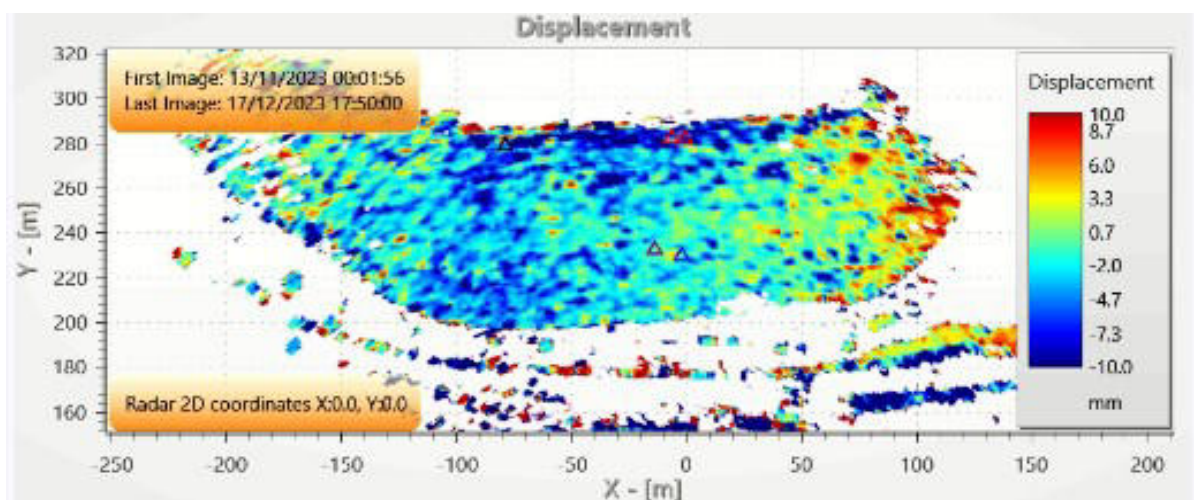


Nota. Elaboración propia.

La fase de monitoreo incluyó la definición de puntos de control y la creación de un mapa 2D de desplazamientos acumulados para identificar las áreas de mayor interés y movimientos significativos en la estructura de la presa, como se observa en la Figura 26.

Figura 26

Puntos de control y mapa 2d de los desplazamientos acumulado

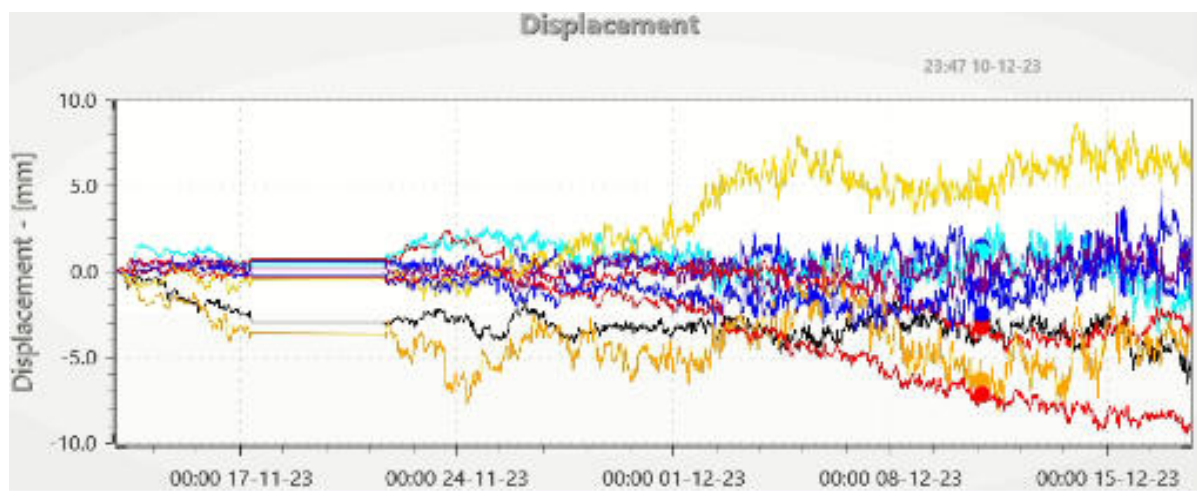


Nota. Elaboración propia.

Finalmente, la Figura 27 presenta los registros de deformación acumulada en los puntos de control, ofreciendo una visión integral y detallada del comportamiento de la presa.

Figura 27

Registro de deformación acumulada de los puntos de control



Nota. Elaboración propia.

Instalación de acelerógrafos

En diciembre de 2021, se llevó a cabo la instalación de 3 acelerógrafos, cuyo proceso comenzó con una inspección técnica y visual de la zona para determinar las ubicaciones más adecuadas para los acelerómetros, como se muestra en la Figura 28.

Figura 28

Inspección en campo para la ubicación del acelerógrafo AC-03



Nota. Elaboración propia.

Tras evaluar varios posibles puntos de instalación, se seleccionó las siguientes ubicaciones para los acelerómetros:

- El acelerógrafo 1 se colocó en el lecho rocoso cerca de las oficinas centrales, asegurando una base estable y sólida para que el dispositivo capture datos sísmicos precisos en una zona central de la presa.
- El acelerógrafo 2 se instaló en la cresta de la presa de realves 5 para controlar las vibraciones y los movimientos sísmicos en una zona de alto riesgo de la presa.

- El acelerógrafo 3 se colocó en la cresta de la presa de relaves 6, otra zona crítica de la presa, con la finalidad de detectar con precisión los movimientos sísmicos y las vibraciones en una zona crítica.

En la Figura 29 se muestra la distribución espacial de los 3 acelerógrafos.

Figura 29

Ubicación de los acelerógrafos



Nota. Elaboración propia.

La Tabla 4 proporciona detalles, como los códigos de los equipos, las coordenadas y los números de modelo y serie de los equipos de monitoreo sísmico que se instalaron.

Tabla 4

Datos generales de los acelerógrafos

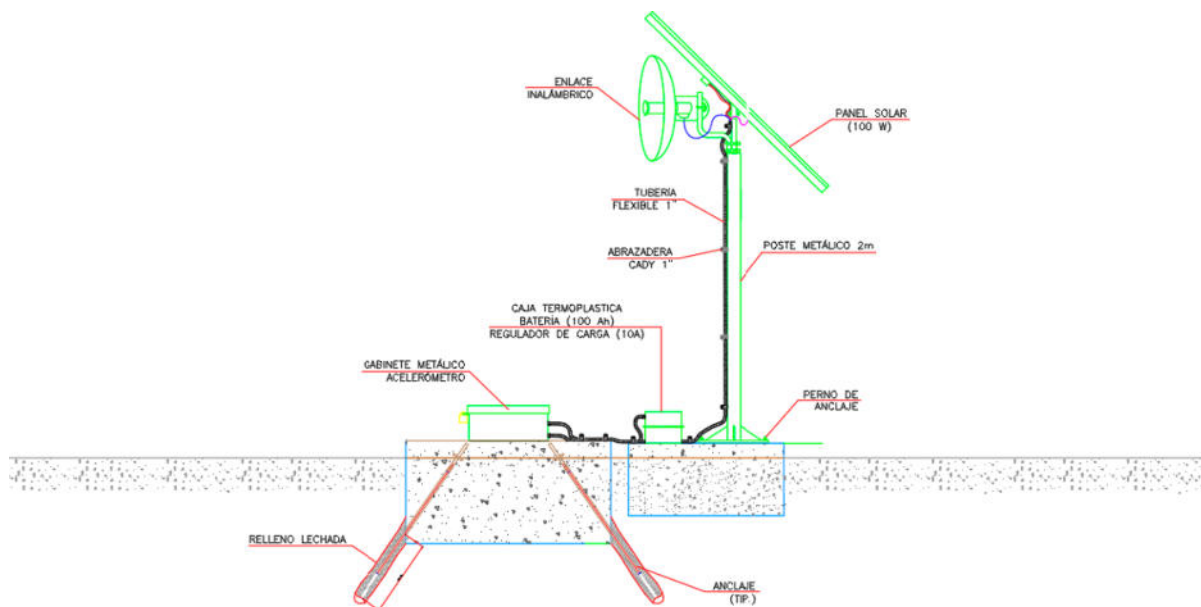
Código	Coordenadas UTM WGS-84			Modelo	SN
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)		
AC-01	386459.28	8714793.13	4036	Kinematics- Obsidian	1616
AC-02	385959.07	8714673.74	4029	Kinematics- Obsidian	1607

Nota. Elaboración propia.

Las secciones de instalación de los acelerómetros se muestran en la Figura 30.

Figura 30

Sección típico de diseño de los acelerógrafos



Nota. Elaboración propia.

En cuanto a los trabajos en campo, se procedió con la preparación de los sitios seleccionados, que implicó la limpieza y nivelación del terreno, seguida por la construcción de bases de concreto sólidas para proporcionar un soporte estable a los acelerógrafos, como se muestra en la Figura 31.

Figura 31

Llenado de la base del acelerógrafo AC-03



Nota. Elaboración propia.

Luego, se procedió a montar cada acelerógrafo en su respectiva base de concreto, como se muestra en la Figura 32. La hoja de calibración se encuentra en el Apéndice E.

Figura 32

Montaje del acelerógrafo AC-03 en la base de concreto



Nota. Elaboración propia.

La fase final del proceso consistió en la instalación del cerco perimétrico y el panel solar, cuya construcción final se muestra en la Figura 33.

Figura 33

Acelerógrafo AC-03 instalado



Nota. Elaboración propia.

Nueva campaña de perforación e instrumentación geotécnica

Con el objetivo de profundizar el conocimiento de las características del subsuelo y modernizar el monitoreo geotécnico de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel. Se programó la ejecución de una campaña de 24 perforaciones diamantinas los cuales fueron distribuidos de la siguiente manera:

- 4 sondajes diamantinos ubicados en las relaveras N° 1 y 2 (P-01, P-02, P-03 y P-04).
- 6 perforaciones diamantinas ejecutadas en la relavera N°3 (DH-08, DH-09, DH-10, DH-11, DH-12 y DH-13).
- 9 perforaciones diamantinas distribuidos en las relaveras N° 4 y 5 (DH-1, DH-2, DH-3, DH-4, DH-5, DH-6, DH-7, DH-15 y DH-17).
- 2 perforaciones diamantinas ubicados en la relavera N°6 (DH-14 y DH-16).

- 3 perforaciones diamantinas distribuidos al noroeste y sur de las relaveras N° 1 y 2 (PH-01, PH-02 y PH-04).

La ubicación de las perforaciones diamantinas se muestra en la Figura 34.

Figura 34

Ubicación de perforaciones diamantinas ejecutadas en la campaña 2021



Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 5 se detalla la ubicación de las perforaciones diamantinas realizadas.

Tabla 5

Ubicación de perforaciones diamantinas ejecutadas en la campaña 2021

Sondaje	Coordenadas UTM WGS-84			Longitud (m)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)	
DH-01	385877.49	8714669.72	4036.89	47.10
DH-02	386015.66	8714740.49	4036.32	60.00
DH-03	385930.20	8714528.07	4009.50	45.00
DH-04	386116.02	8714609.49	4008.59	46.10
DH-05	386228.49	8714708.80	4019.85	66.70
DH-06	385857.02	8714763.04	4036.37	60.00

Sondaje	Coordenadas UTM WGS-84			Longitud (m)
	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)	
DH-07	385990.88	8714916.03	4035.24	60.20
DH-08	385571.72	8714396.72	4025.26	58.00
DH-09	385684.17	8714450.18	4026.08	55.60
DH-10	385519.71	8714443.66	4038.89	65.00
DH-11	385660.63	8714507.40	4040.62	90.50
DH-12	385478.20	8714689.40	4056.47	60.00
DH-13	385571.03	8714728.98	4055.47	60.50
DH-14	386540.56	8714841.42	4035.73	65.50
DH-15	385903.58	8714606.38	4032.85	65.50
DH-16	386583.38	8715023.23	4035.93	50.60
DH-17	385876.53	8714506.23	4010.85	28.00
P01	385001.54	8714342.99	4002.79	30.00
P02	385093.21	8714200.44	4000.40	55.00
P03	384915.98	8714357.05	4015.48	37.00
P04	385274.84	8714269.23	4012.07	50.50
PH-01	385049.65	8714545.51	4013.98	30.50
PH-02	384674.70	8714450.48	4055.27	30.00
PH-04	385121.06	8714128.27	3991.89	30.50

Nota. Elaboración propia.

Ejecución de la campaña de perforación diamantina

La ejecución de la campaña de perforación diamantina en las relaveras 1, 2, 3, 4, 5 y 6 se realizaron entre las fechas del 16 de agosto hasta el 20 de diciembre del 2021. Seguidamente, se describen las actividades más relevantes realizadas:

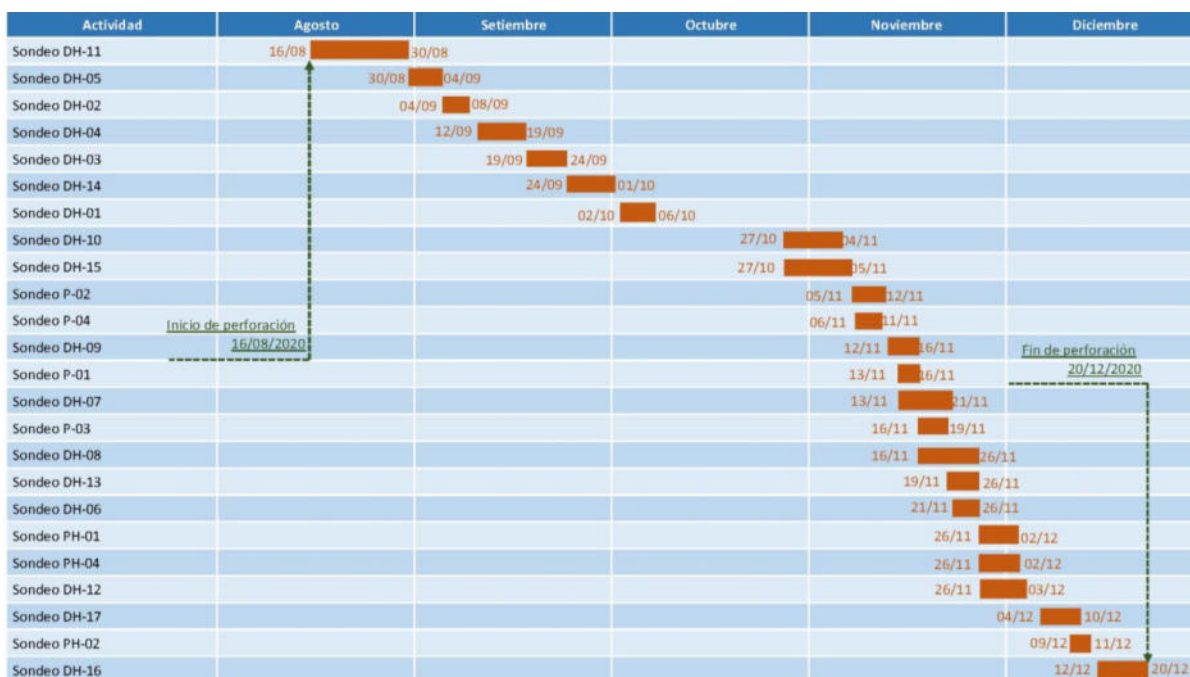
- Desde el 16 de agosto al 06 de octubre, se ejecutaron 8 perforaciones diamantinas (DH-11, DH-05, DH-02, DH-04, DH-03, DH-06, DH-14 y DH-01).

- A partir del 27 de octubre al 16 de noviembre, se ejecutaron 7 perforaciones diamantinas (DH-10, DH-15, DH-10B, DH-15B, P-02, P-04 y DH-09).
- Desde 13 de noviembre al 03 de diciembre, se ejecutaron 10 perforaciones diamantinas (DH-07, P-01, P-03, DH-08, DH-13, DH-06, PH-4, PH-1 y DH-12).
- Del 4 al 11 de diciembre, se ejecutaron 2 sondajes diamantinos (PH-02, DH-17).
- Finalmente, del 12 al 20 de diciembre del 2021 se ejecutó el último sondaje DH-16.

En la Figura 35, se presenta el cronograma de perforaciones diamantinas realizadas.

Figura 35

Cronograma de perforaciones geotécnicas

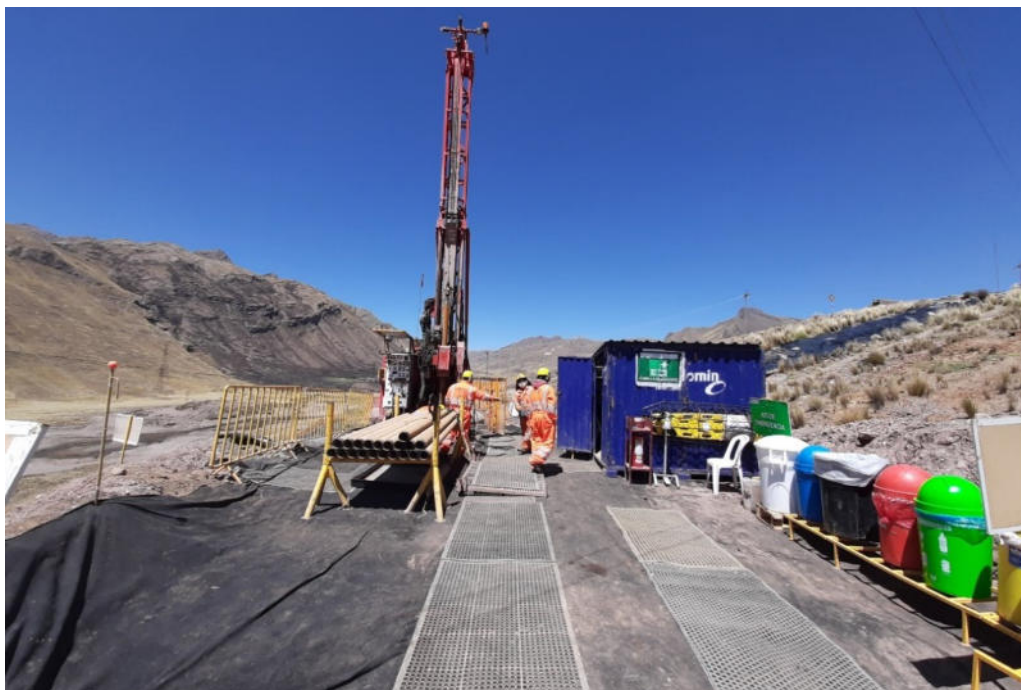


Nota. Elaboración propia.

En la Figura 36 se visualiza una plataforma de perforación estandarizada.

Figura 36

Plataforma de perforación estandarizada del sondaje DH-05



Nota. Elaboración propia.

Instalación de piezómetros tipo casagrande simple y multinivel

Al finalizar los trabajos de perforación se realizó la instalación de piezómetros tipo Casagrande simple y multinivel, en 17 sondajes ejecutados (DH-1, DH-2, DH-6, DH-7, DH-8, DH-10, DH-12, DH-13, DH-17A, DH-17B, P-01, P-02, P-03, P-04, PH-01, PH-02 y PH-04), con tuberías piezométricas de PVC de 1" y 2", con longitudes de 3.0 m y clase 80 (Sched).

La instalación de piezómetros tipo Casagrande se ha realizado de acuerdo con los procedimientos establecidos en las normas, guías y manuales ASTM D5092, ASTM D587 y ASTM D1785. A continuación, se describe de forma resumida el proceso de instalación:

- Al finalizar el sondaje se verificó la profundidad con el conteo de las tuberías de perforación.

- Luego, se realizó la limpieza del tubo por el lapso de 01 hora, inyectando agua a presión, esto con la finalidad de lavar las paredes removiendo el polvo provocado durante la perforación, o bien limpiar el sondeo de los posibles derrumbes.
- Después, se relleno 0.50 m de arena de cuarzo de 1/16 en el fondo del sondeo, el cual sirvió como cama para la tubería piezométrica.
- Posteriormente, se descendió la tubería ranurada de 2" acoplada con la punta cónica que descansó en el fondo del sondeo, el tramo ranurado se forró con geotextil para evitar el paso de material fino al interior del piezómetro (Ver Figura 37).
- Seguidamente, el tubo PVC ranurado de 2" se acopló con la tubería PVC ciega de 2", con cinta Duc Tape en las uniones hasta la superficie del sondeo.
- Paralelamente, se anotó y marcó el total de tubos de PVC utilizados, esto para garantizar la profundidad del piezómetro.
- Para la instalación de piezómetros multinivel se descendió tuberías de 1" paralelamente con el piezómetro de 2", de la misma forma que lo mencionado anteriormente (Ver Figura 38).
- Una vez colocados los piezómetros, desde la superficie se procedió al llenado del espacio anular entre el sondeo y la tubería piezométrica con arena de cuarzo de 1/16" hasta cubrir todo el tramo ranurado y 1 m por encima de este.
- Luego se procedió a introducir un sello de bentonita en pellets con un espesor de 2 a 3 m por encima de la arena de cuarzo y finalmente se completó la instalación con el vertimiento de grouting (Cemento-bentonita) hasta la superficie.

- Al término de la instalación se acondicionó con la construcción de un de concreto (0.40x0.40x0.40 m) el cual permitió fijar el tubo metálico de protección (con tapa y candado).

Figura 37

Tubería ramurada de 1" forrada con geotextil



Nota. Elaboración propia.

Figura 38*Instalación de piezómetro tipo casagrande*

Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 6 se detalla la profundidad de instalación de cada uno y en el Apéndice A se encuentran los esquemas de instalación ejecutados.

Tabla 6*Detalle de instalación de los piezómetros tipo casagrande*

Sondaje	Sensor	Prof. piezómetro (m)	Prof. sondeo (m)	Observaciones
DH-01	A, B, C	10.50, 25.40, 46.40	47.10	Diámetro del piezómetro, $\varnothing=1''$
DH-02	A, B, C	9.70, 25.70, 59.50	60.00	Diámetro del piezómetro A, $\varnothing=1''$
DH-06	A	18.50	60.00	Diámetro del piezómetro A, $\varnothing=1''$
	B	53.50		Diámetro de piezómetro B, $\varnothing=2''$
DH-07	A	8.60	60.20	Diámetro del piezómetro A, $\varnothing=1''$

Sondaje	Sensor	Prof. piezómetro (m)	Prof. sondeo (m)	Observaciones
	B	55.40		Diámetro de piezómetro B, $\varnothing=2''$
DH-08	A	42.50	58.00	Diámetro del piezómetro A, $\varnothing=1''$
	B	57.50		Diámetro de piezómetro B, $\varnothing=2''$
DH-10	A, B, C	12.00, 44.00, 64.60	65.00	Diámetro del piezómetro A, $\varnothing=1''$
DH-12	A	22.50	60.00	Diámetro del piezómetro A, $\varnothing=1''$
	B	59.50		Diámetro de piezómetro B, $\varnothing=2''$
DH-13	A	22.50	60.50	Diámetro del piezómetro A, $\varnothing=1''$
	B	59.50		Diámetro de piezómetro B, $\varnothing=2''$
DH-17A	A	27.90	28.00	Diámetro del piezómetro A, $\varnothing=1''$
DH-17B	B	44.70	45.20	Diámetro de piezómetro A, $\varnothing=2''$
P-01	A	29.50	30.00	Diámetro de piezómetro A, $\varnothing=2''$
P-02	A	10.40	55.00	Diámetro del piezómetro A, $\varnothing=1''$
	B	41.80		Diámetro de piezómetro B, $\varnothing=2''$
P-03	A	36.70	37.00	Diámetro de piezómetro A, $\varnothing=2''$
P-04	A	24.70	50.50	Diámetro del piezómetro A, $\varnothing=1''$
	B	50.00		Diámetro de piezómetro B, $\varnothing=2''$
PH-01	A	30.00	30.50	Diámetro de piezómetro B, $\varnothing=2''$
PH-02	A	29.50	30.00	Diámetro de piezómetro B, $\varnothing=2''$
PH-04	A	29.50	30.50	Diámetro de piezómetro B, $\varnothing=2''$

Nota. Elaboración propia.

Instalación de piezómetros eléctricos de cuerda vibrante

Al finalizar los trabajos de perforación se instalaron 22 sensores de cuerda vibrante en 10 sondeos ejecutados (DH-1, DH-2, DH-5, DH-7, DH-8, DH-09, DH-10, DH-11, DH-12, DH-15 y DH-17A). La instalación de piezómetros tipo cuerda vibrante se ha realizado de acuerdo con los

procedimientos establecidos en las normas, guías y manuales ASTM D5092, ASTM D587 y ASTM D1785. A continuación, se describe el proceso de instalación:

- Previa instalación se saturaron los sensores de cuerda vibrante, para una mejor saturación del filtro poroso. Su hoja de calibración se encuentra en el Apéndice C.
- Luego, se verificó la profundidad con el conteo de las tuberías de perforación.
- Se procedió a realizar su limpieza por el lapso de 01 hora, inyectando agua a presión, esto con la finalidad de lavar las paredes removiendo el polvo provocado durante la perforación, o bien limpiar el sondeo de los posibles derrumbes.
- Antes de introducir los sensores de cuerda vibrante, se deben tomar sus lecturas cero, los cuales sirvieron como lectura base para los posteriores monitoreos.
- Con los sensores ya calibrados, se descendieron hasta la cota deseada con la ayuda de las tuberías guías piezométricas e inclinométricas.
- En todo momento se anotó y marcó el total de tubos guía utilizados, esto para garantizar la profundidad a la cual se va a instalar el sensor de cuerda vibrante.
- Luego desde la superficie se procedió con la inyección de grouting (bentonita, cemento y agua) al pozo, este procedimiento se realizó mediante el uso de una bomba de inyección; la cual consistió en inyectar la mezcla por medio de una manguera de polietileno de ½” de diámetro. La inyección se realizó en forma ascendente desde la parte inferior hasta la superficie.
- Al término de la instalación se acondicionó con la construcción de un dado de concreto (0.40x0.40x0.40 m) el cual permitirá fijar el tubo metálico de protección.

Con base a las cotas requeridas en el esquema de diseño, los sensores de cuerda vibrante se fijaron en las tuberías piezométricas e inclinométricas para su instalación, tal como se visualizan en la Figura 39 y Figura 40.

Figura 39

Instalación de sensor de cuerda vibrante en tubería piezométrica



Nota. Elaboración propia.

Figura 40

Instalación de sensor de cuerda vibrante en tubería inclinométrica



Nota. Elaboración propia.

En la Tabla 7 se presentan los detalles de instalación de cada sensor de cuerda vibrante instalado y en el Apéndice A se encuentran los esquemas de instalación ejecutados.

Tabla 7

Detalle de instalación de los sensores de cuerda vibrante

Sondaje	Sensor	Capacidad sensor (kPa)	Prof. sensor CV (m)	Prof. del sondeo (m)	Tubería guía
DH-01	A	345	10.00		Piezómetro, Ø=1"
	B	345	25.10	47.10	Piezómetro, Ø=1"
	C	500	46.00		Piezómetro, Ø=1"
DH-02	A	345	9.20		Piezómetro, Ø=1"
	B	500	25.20	60.00	Piezómetro, Ø=1"
	C	700	51.50		Piezómetro, Ø=1"
DH-05	A	500	31.60	58.10	Tubería inclinométrica
	B	700	58.10		Tubería inclinométrica
DH-08	A	350	38.50	58.00	Piezómetro, Ø=1"
DH-09	A	350	36.40	55.20	Tubería inclinométrica
	B	350	51.70		Tubería inclinométrica

Sondaje	Sensor	Capacidad sensor (kPa)	Prof. sensor CV (m)	Prof. del sondeo (m)	Tubería guía
	A	350	11.50		Piezómetro, $\varnothing=1''$
DH-10	B	350	43.00	65.00	Piezómetro, $\varnothing=1''$
	C	700	58.60		Piezómetro, $\varnothing=1''$
	A	345	20.00		Tubería inclinométrica
DH-11	B	500	43.40	90.50	Tubería inclinométrica
	C	700	57.00		Tubería inclinométrica
	A	700	20.90		60.00
DH-15	A	350	17.00		Tubería inclinométrica
	B	350	42.00	63.50	Tubería inclinométrica
	C	700	57.00		Tubería inclinométrica
DH-17A	A	350	27.50		28.00

Nota. Elaboración propia.

Instalación de inclinómetros verticales

Al finalizar los trabajos de perforación se realizó la instalación de inclinómetros verticales en 9 sondajes (PZR6-09, DH-3, DH-04, DH-05, DH-09, DH-11, DH-14, DH-15 y DH-16). La instalación se realizó de acuerdo con los procedimientos establecidos en la norma ASTM D6230-98 (2005). A continuación, se describe de forma resumida:

- Una vez finalizado el sondeo hasta la profundidad programada, se procedió con la instalación del inclinómetro; el cual consistió en introducir la tubería inclinométrica hasta el fondo del hoyo perforado. Estas tuberías se reforzaron con cinta metálica en todas sus uniones, para evitar así el ingreso de grouting al interior del instrumento como se muestra en la Figura 41.
- La instalación del inclinómetro se efectuó usando la tubería de revestimiento como protección para asegurar que la tubería inclinométrica ingrese sin complicaciones, una

vez que la tubería quedó instalada, se retiró la tubería de perforación hasta asegurar que el pozo estuviera estable (ver Figura 42)

- Una vez ingresada la tubería, se verificó la dirección de las ranuras con la ayuda de la brújula. Se marcó la dirección A180-A0 la cual es generalmente la dirección de la máxima pendiente, por la cual se podría producir el deslizamiento.
- Antes de la cementación del pozo se preparó el grouting, en el cual se mezcló cemento (C), agua (A) y bentonita en polvo (B) en las proporciones: C: A: B; 1:2:1 o en C: A: B: 1 bolsa: 120 o 160 litros de agua: $\frac{1}{2}$ B (11.5 kilogramos).
- Luego se inyectó grouting desde la superficie para rellenar el espacio anular (entre las paredes del pozo y la pared exterior de la tubería) y se tapó con cinta metálica la boca del tubo inclinométrico para evitar que el grouting ingrese dentro de la tubería.
- Posteriormente, se procedió a construir el dado protector (0.40x0.40x0.40 m) que tiene un candado para asegurar que este sea solo medido o inspeccionado.
- Finalmente, se verificó con el sensor inclinométrico que la tubería haya quedado correctamente instalada y que las ranuras no hayan sido tapadas con el grouting.

Figura 41

Tapón de fondo del inclinómetro



Nota. Elaboración propia.

Figura 42

Instalación de inclinómetro vertical en sondeo



Nota. Elaboración propia.

Cabe precisar que algunos de estos inclinómetros se usaron como tubería guía para la instalación de sensores de cuerda vibrante, en la Tabla 8 se presentan detalles de la instalación de cada inclinómetro y en el Apéndice B se encuentran los esquemas de instalación ejecutados.

Tabla 8

Detalle de instalación de los inclinómetros

Sondaje	Profundidad del sondeo (m)	Orientación A₀-A₁₈₀ (°)	Observaciones
DH-03	45.00	N160	Inclinómetro vertical
DH-04	46.60	N153	Inclinómetro vertical
DH-05	58.10	N148	Inclinómetro con 2 sensores de cuerda vibrante
DH-09	55.20	N190	Inclinómetro con 2 sensores de cuerda vibrante
DH-11	90.50	N153	Inclinómetro con 3 sensores de cuerda vibrante
DH-14	65.50	N150	Inclinómetro vertical
DH-15	63.50	N153	Inclinómetro con 3 sensores de cuerda vibrante
DH-16	50.00	N75	Inclinómetro vertical

Nota. Elaboración propia.

En la Figura 43 se muestra la lectura base de los instrumentos geotécnicos instalados.

Figura 43

Lectura base de los instrumentos geotécnicos instalados



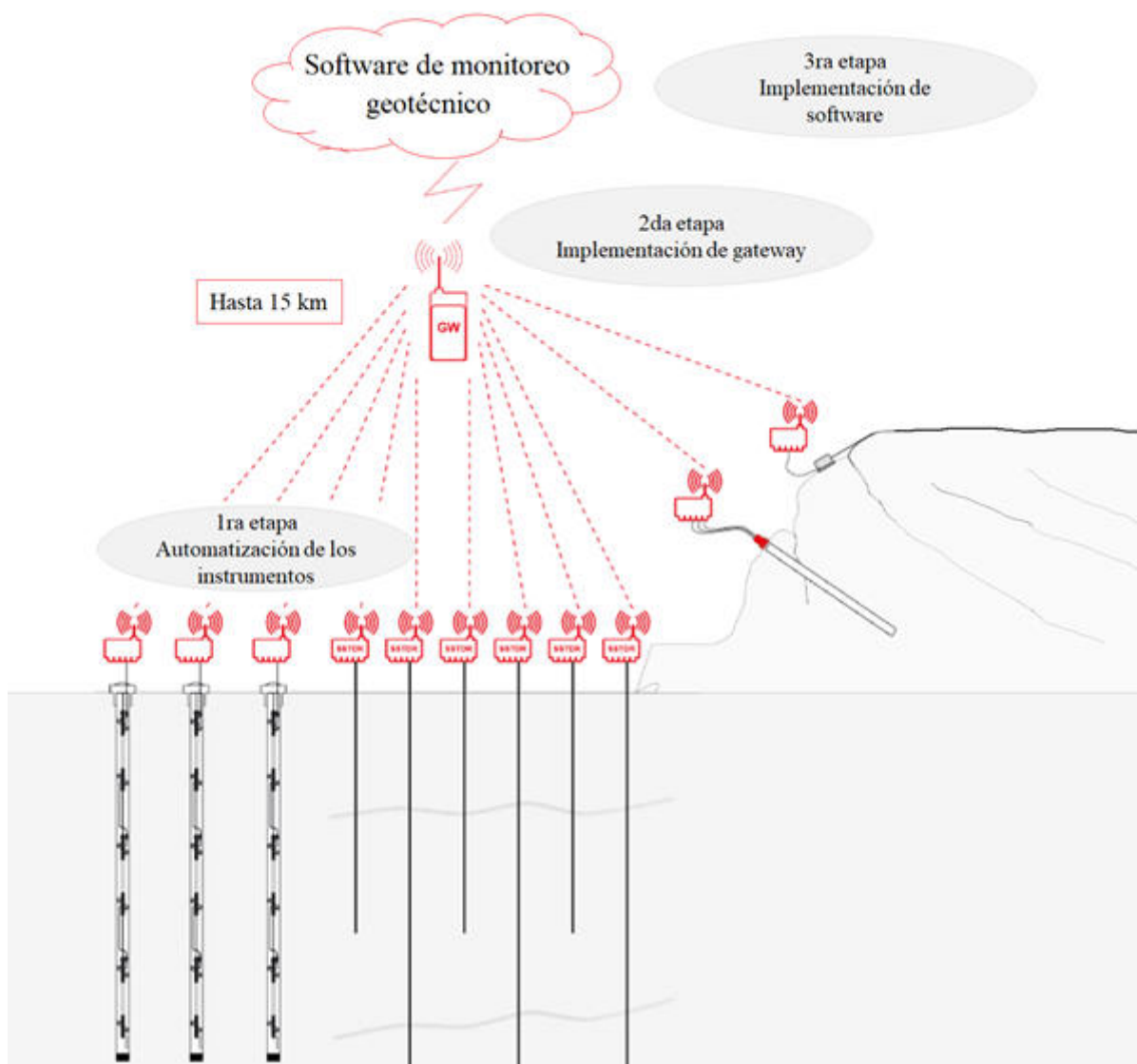
Nota. Elaboración propia.

Automatización y adaptación a la telemetría

La automatización y adaptación a la telemetría de los instrumentos geotécnicos se llevó a cabo en 3 etapas. Primero, la automatización de los instrumentos geotécnicos donde se sentaron las bases para una recopilación de datos en tiempo real. Luego, la implementación del sistema gateway para la transmisión y gestión de los datos recopilados. Finalmente, la integración del software T4G para el análisis, visualización y gestión de los datos geotécnicos recogidos. En la Figura 44 se visualiza de manera detallada este proceso dividido en etapas.

Figura 44

Esquema de adaptación a la telemetría de los instrumentos geotécnicos



Nota. Elaboración propia.

Automatización de los instrumentos geotécnicos

Para la automatización de los inclinómetros se comenzó con la selección de 9 instrumentos, cuya instalación consta de sondas inclinométricas in place verticales (IPI) biaxial con tecnología MEMS y salida digital RS485. La ubicación, junto con los detalles adicionales sobre su instalación y características se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9*Resumen de los inclinómetros automatizados*

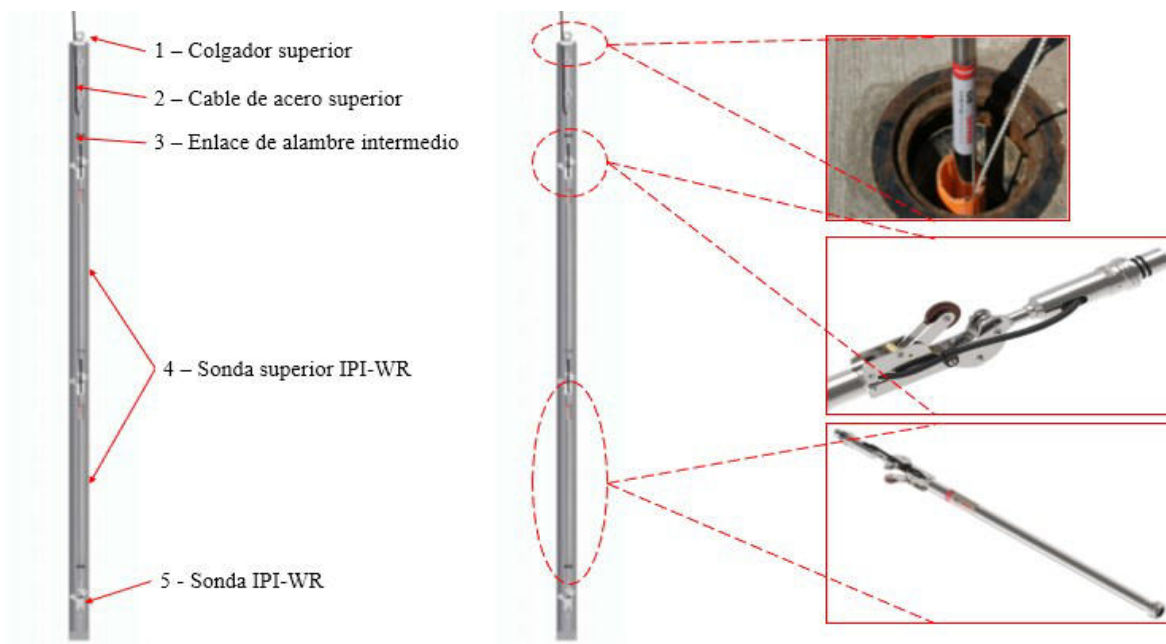
ID ubicación	ID nodo	Cantidad de sensores	Norte (m)	Este (m)
DH-03	29510	3	8714528	385930
DH-04	29504	3	8714609	386116
DH-05	29492	3	8714709	386228
DH-09	29493	3	8714450	385684
DH-11	29502	3	8714507	385661
DH-15	29496	3	8714606	385904
PZR6-09	60969, 60995	42	8714862	386563
INR-02	61047, 61030	37	8714764	386591
INR-01	61059, 61057	36	8714700	386629

Nota. Elaboración propia.

Los inclinómetros fijos (IPI) instalados utilizaron una serie de sondas inclinométricas interconectadas de sistemas microelectromecánicos (MEMS), que están separadas por cables de acero y suspendidas dentro de la carcasa del inclinómetro instalado. Estos dispositivos son capaces de medir movimientos en dos direcciones y son increíblemente sensibles. Estos, detectan incluso los cambios más leves en el ángulo del módulo si se mueve la carcasa que lo rodea, permitiendo tomar decisiones confiables, de tal forma de reducir al mínimo los riesgos geotécnicos asociados a las distintas estructuras, tomando acciones oportunas. En la Figura 45 se muestra un esquema de los componentes del sistema inclinométrico instalado.

Figura 45

Esquema de los componentes del sistema inclinométrico fijo IPI



Nota. Elaboración propia.

Tras determinar la ubicación y los sensores a instalarse, se procedió a preparar los sensores IPI sobre el terreno, tal como se muestra en la Figura 46. Su hoja de calibración se encuentra en el Apéndice G.

Figura 46

Preparación de los sensores IPI en campo, PZR6-09



Nota. Elaboración propia.

Luego, se insertaron los sensores dentro de la carcasa, como se muestra en la Figura 47.

Figura 47

Instalación de los sensores inclinómetros, PZR6-09



Nota. Elaboración propia.

Para automatizar los instrumentos, se instalaron nodos geotécnicos, los cuales constan de un nodo (datalogger), una antena, un conector de antena y una batería de litio, dicha instalación se puede visualizar en la Figura 48.

Figura 48

Instalación de los nodos geotécnicos, PZR6-09



Nota. Elaboración propia.

La etapa final implicó la configuración de los nodos digitales utilizando una aplicación de Android, donde se estableció el protocolo de comunicación y las direcciones de bus para los sensores en el puerto RS485, completando así la integración del sistema de monitoreo.

Finalmente, se dejaron todos los nodos geotécnicos correctamente instalados en campo, tal como se muestra en la Figura 49.

Figura 49

Nodo geotécnico instalado



Nota. Elaboración propia.

Paralelamente, se llevó a cabo la automatización de los piezómetros eléctricos de cuerda vibrante, cuyos detalles de instalación se describen en la Tabla 10.

Tabla 10*Resumen de los piezómetros eléctricos de cuerda vibrante automatizados*

Relavera	ID Ubicación	ID Nodo	Profundidad de instalación (m)	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)
	DH-08	21636	38.5	385572	8714397	4025
	DH-09	21482	36.4, 51.4	385684	8714450	4026
	DH-10	21698	11.5, 43, 58	385520	8714444	4026
	DH-11	21495	20, 43.4, 57	385661	8714507	4041
3	DH-12	21501	21	385478	8714689	4056
	PZC-04	22149	38, 56	385474	8714537	4055
	PZC-10	22149	22, 46	385619	8714431	4026
	PZC-11	22149	36, 61.4	385568	8714550	4056
	PZC-12	21501	17, 34.4	385510	8714659	4056
	PZC-01	15247	30, 42	386052	8714617	4020
	PZC-02	15247	22.4, 34.7	386019	8714705	4037
	PZC-03	15247	10.3, 20	385983	8714794	4036
	PZC-05	15251	29, 42.6	385902	8714655	4037
	PZC-06	15251	13, 26	385867	8714739	4037
	PZC-07	21535	31, 43	385823	8714516	4022
4 y 5	PZC-08	15251	30, 46.1	385762	8714595	4041
	PZC-09	21621	19, 27	385731	8714689	4038
	DH-01	21486	9.7, 25.1, 46	385877	8714670	4037
	DH-02	21526	10, 25, 52	386016	8714740	4036
	DH-05	21621	31.6, 58	386228	8714709	4020
	DH-15	21535	17, 42, 57	385904	8714606	4033
	DH-17	21706	28	385877	8714506	4011
	PE-01		5.5	386521	8714746	4006
6	PE-02	21526	30.5	386493	8714789	4006
	PE-03		17	386478	8714812	4017

Relavera	ID Ubicación	ID Nodo	Profundidad de instalación (m)	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)
	PE-04		3	386657	8714960	3990
	PE-05		15.3	386620	8714951	4005
	PE-06	29146	16.5	386593	8714944	4017
	PZR6-01	21486	9, 28, 59	386410	8714692	3983
	PZR6-02	15251	8, 52	386547	8714733	3981
	PZR6-03	21486	12, 41, 59	386608	8714774	3982
	PZR6-04	22149	34, 38	386688	8714823	3985
	PZR6-05	22149	27, 37	386590	8714675	3978
	PZR6-06	15247	33, 43	386665	8714715	3978
	PZR6-07	21486	32, 80, 102	386493	8714812	4036
	PZR6-08	21526	30	386492	8714817	4036
	PZR6-09	21526	52	386492	8714817	4036
	PZR6-10	21486	40, 75, 102	386567	8714861	4036
	PZDR6-02	21526	30	386535	8714923	4035
	PZDR6-03	21526	47	386441	8714863	4036
	PZDR6-04	21621	21, 40	386441	8714863	4036

Nota. Elaboración propia.

Des mismo modo, se efectuó la automatización de los piezómetros de tubo abierto, cuyos aspectos específicos de instalación se detallan en la Tabla 11.

Tabla 11

Resumen de los piezómetros tipo casagrande automatizados

Relavera	ID Ubicación	ID Nodo	Profundidad de instalación (m)	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)
3	PZ-SRK-04	22149	60	385550	8714579	4054
	DH-08-A	21636	33.7	385572	8714397	4025

Relavera	ID Ubicación	ID Nodo	Profundidad de instalación (m)	Este (m)	Norte (m)	Cota (msnm)
	DH-08-B		58			
	DH-10-B	21698	44	385520	8714444	4026
	DH-10-C		64			
	DH-12	21501	60	385478	8714689	4056
	PZ-SRK-01	28197	45.54	385951	8714543	4010
	PZ-SRK-02	21705	27.1	385883	8714724	4038
	DH-01-B	21486	24.8	385877	8714670	4037
4 y 5	DH-01-C		40.95			
	DH-02-B	21703	27.85	386016	8714740	4036
	DH-02-C		50.7			
	DH-06-B	15246	52.6	385857	8714763	4036
	DH-07-B	21711	55.8	385991	8714916	4035
6	PQ-03	21564	10.7	384916	8714357	4015

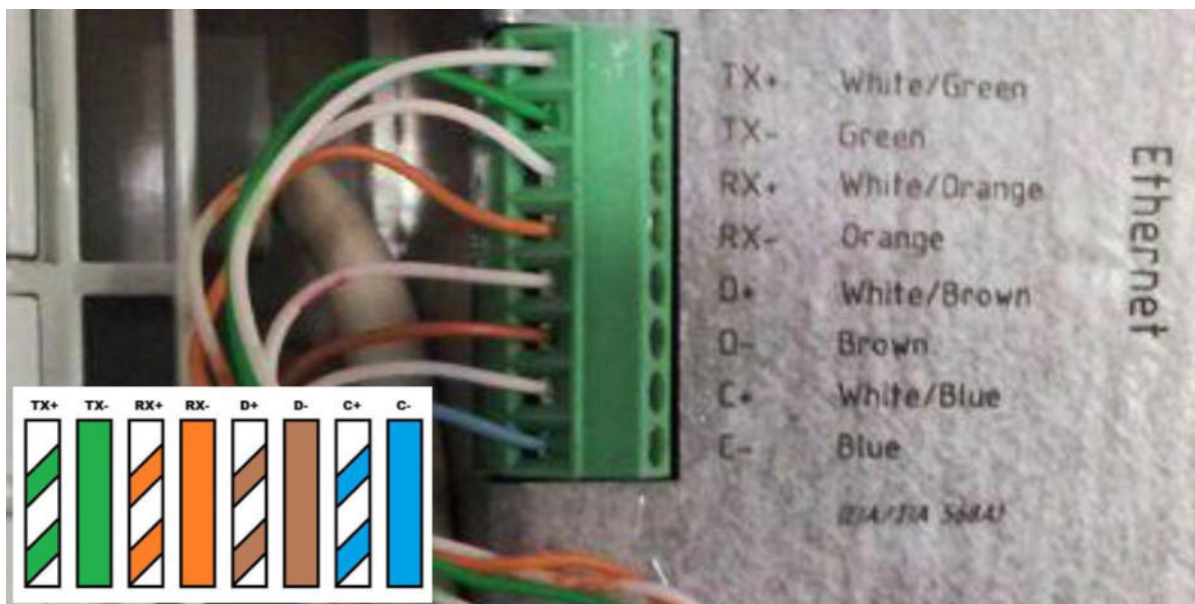
Nota. Elaboración propia.

Implementación del sistema gateway

En febrero de 2021, tras la automatización de los instrumentos geotécnicos, se procedió con el inicio de la etapa 2 que es la implementación de la gateway LS-G6 para gestionar los datos de los nodos geotécnicos inalámbricos. Diseñada para resistir entornos industriales exigentes y fabricada con policarbonato resistente a los impactos, caracterizándose por su resistencia a la inflamabilidad, resistencia UV y protección IP67. La Figura 50, muestra la conexión de cables en el terminal de la Gateway, evidenciando su configuración física y preparación operativa.

Figura 50

Conexión de cable UTP en terminal de la gateway

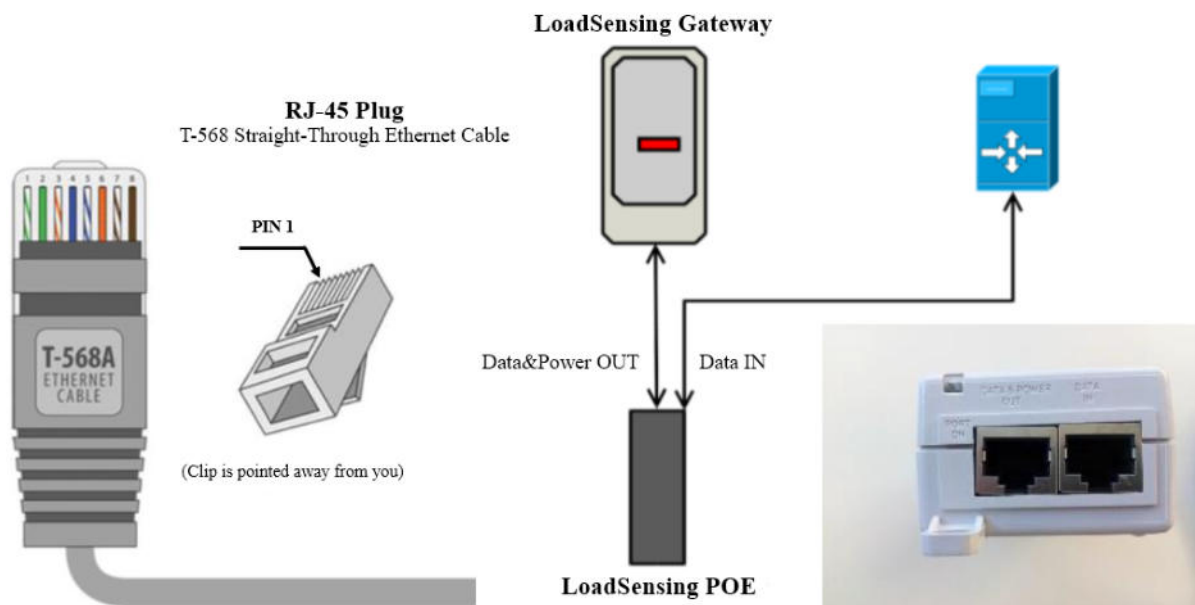


Nota. Elaboración propia.

Luego, se estableció el sistema de energía de la gateway utilizando un inyector PoE conectado a 220 V AC, caracterizado por su eficiencia energética con un consumo aproximado de 3.2 W, llegando a picos de hasta 3.84 W y manteniendo un consumo en reposo de solo 2,16 W. Lo que optimizó el consumo energético para garantizar el funcionamiento del dispositivo. Este paso, fundamental para el correcto funcionamiento de la Gateway. Se complementa con la realización de la conexión ethernet, asegurando un acceso ininterrumpido a Internet y evitando problemas con la configuración predeterminada, como se ilustra en la Figura 51.

Figura 51

Esquema de Conexión de la Gateway a la red

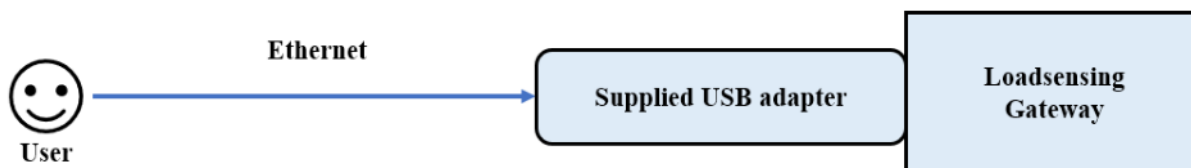


Nota. Elaboración propia.

Posteriormente, se configuraron dos métodos principales para acceder a la Gateway. El primero, a partir de una conexión local directa utilizando el puerto USB interno de la Gateway, ofrecía una alternativa segura para la recuperación de datos en caso de pérdida de la contraseña de acceso remoto, detallado en la Figura 52. El segundo, a través de Internet o una red local, utilizando interfaces Ethernet y 3G/GPRS protegidas con protocolo HTTPS para una comunicación segura. Este proceso se explica en el flujograma de la Figura 53.

Figura 52

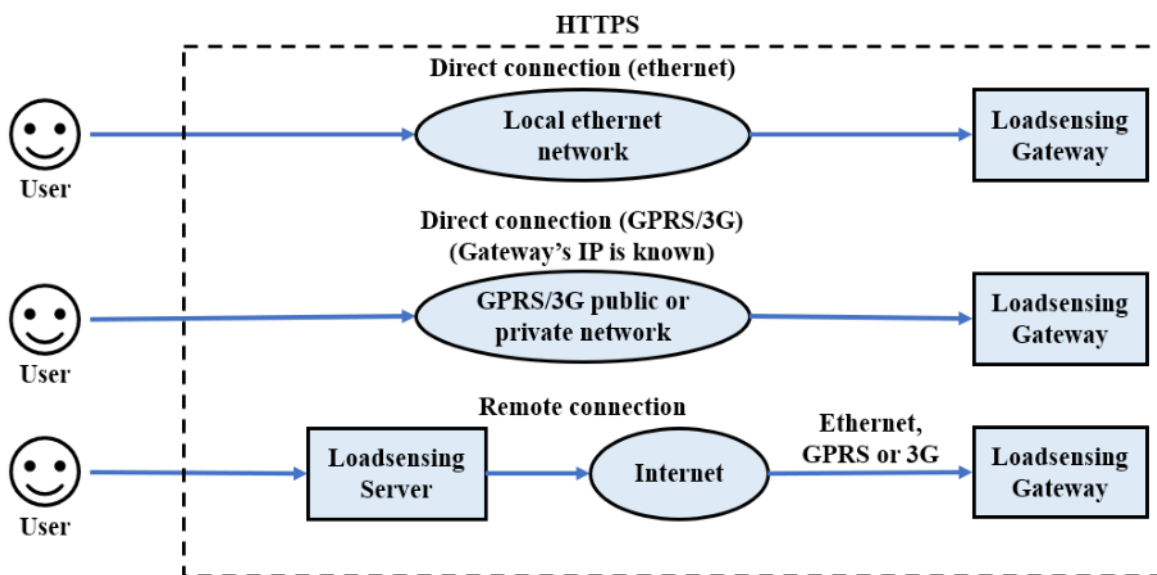
Flujograma de acceso remoto a la gateway mediante conexión local directa



Nota. Elaboración propia.

Figura 53

Flujograma de acceso remoto a la gateway mediante internet o una red local



Nota. Elaboración propia.

Finalmente, se estableció un sistema para la visualización y recuperación de datos desde la gateway, almacenándose en la memoria interna de 8 GB del dispositivo, permitiendo un registro de datos a largo plazo, permitiendo acceder a estas lecturas en formatos de texto y gráfico, facilitando el análisis y seguimiento de los datos, como se muestra en la Figura 54.

Finalmente, se facilitó la creación de archivos CSV personalizados para análisis detallados, añadiendo una capa adicional de flexibilidad en el manejo de los datos. Los detalles específicos sobre cómo acceder a la Gateway, incluyendo las credenciales necesarias para diferentes niveles de usuario, se proporcionan en la Tabla 12.

Tabla 12

Datos de acceso a la gateway

Gateway ID	URL	Usuario	Contraseña	Privilegio	Ubicación
21565	https:// 10.24.39.41	admin	kiehauxah	Administrador	Oficina
		viewonly	mahrTúnel	Visualizador	proyectos

Nota. Elaboración propia.

Figura 54

Acceso a la página principal de la Gateway

CMT Edge Networks Status Configuration

Network: Instrumentación Geotécnica Mahr Túnel

/ Networks / 21214

Comments Instrumentación Geotécnica

Compacted custom CSV [download compacted-custom-readings-21214-MAHR_TUNEL-current.dat](#)

DATOS CUSTOMIZADO

coverage test map

Nodes

Id, name, serial or model Search

0 nodes selected of 44

Id	Name IT	Status IT	Model IT	Serial IT
15247	R5_CASETA_1A	OK	LS-G6-VW5-FCC	15247
21585	R5_CASETA_1B	OK	LS-G6-VW5-FCC	21585
21703	DH-02	OK	LS-G6-VW5-FCC	21703
21535	DH-15	OK	LS-G6-VW5-FCC	21535
21706	DH-17, PZC-07A VW, PZC-07B VW	OK	LS-G6-VW5-FCC	21706
21706	DH-17, PZC-07A VW, PZC-07B VW	OK	LS-G6-VW5-FCC	21706
21488	DH-01	OK	LS-G6-VW5-FCC	21488
29492	INC_DH-05	OK	LS-G6-DIG-2-FCC	29492
21821	DH-05	OK	LS-G6-VW5-FCC	21821
29504	INC_DH-04	OK	LS-G6-DIG-2-FCC	29504
29510	INC_DH-03	OK	LS-G6-DIG-2-FCC	29510
29498	INC_DH-15	OK	LS-G6-DIG-2-FCC	29498
21495	DH-11	OK	LS-G6-VW5-FCC	21495
29502	INC_DH-11	OK	LS-G6-DIG-2-FCC	29502
29493	INC_DH-09	OK	LS-G6-DIG-2-FCC	29493
21482	DH-09, PZC-10	OK	LS-G6-VW5-FCC	21482
21898	DH-10	OK	LS-G6-VW5-FCC	21898
28197	PZ-SRK-01	OK	LS-G6-VW-1-EU	28197
21836	DH-08	OK	LS-G6-VW5-FCC	21836
21711	DH-07	OK	LS-G6-VW5-FCC	21711
22149	PZ-SRK-04, PZCV-04	OK	LS-G6-VW5-FCC	22149

« 1 2 3 »

ACCESO INDIVIDUAL A LOS NODOS

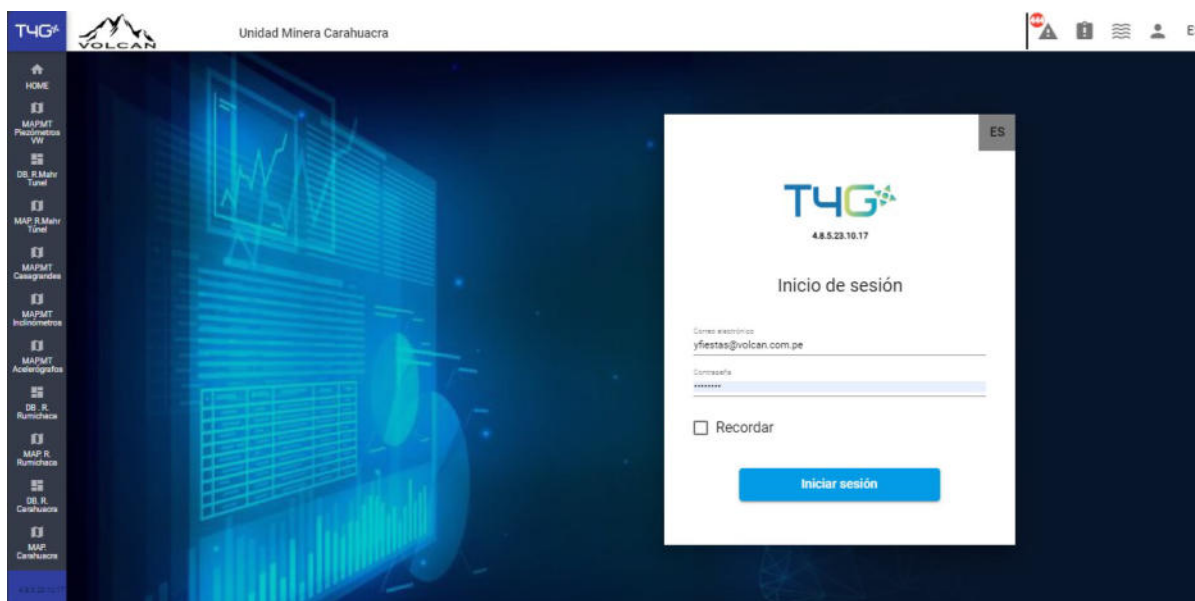
Nota. Elaboración propia.

Integración del software de monitoreo geotécnico T4G

Después de implementar con éxito el sistema gateway en la presa de Mahr Túnel. Se llevó a cabo la etapa 3 de la adaptación a la telemetría de la instrumentación geotécnica. El cual consistió en la integración del software T4G, representando así un avance significativo en la adaptación a la telemetría. Este software, es un integrador de diseño para consolidar y gestionar de manera eficiente los diversos planes de monitoreo geotécnico. El proceso de implementación del software T4G comenzó abriendo un portal de inicio de sesión, tal como se muestra en la Figura 55. En esta etapa, se solicitó los datos y contraseña del usuario para garantizar un acceso seguro y autorizado al sistema, estableciendo de esta manera una base sólida para la gestión eficiente y segura de los datos de monitoreo geotécnico.

Figura 55

Portal de ingreso de usuario

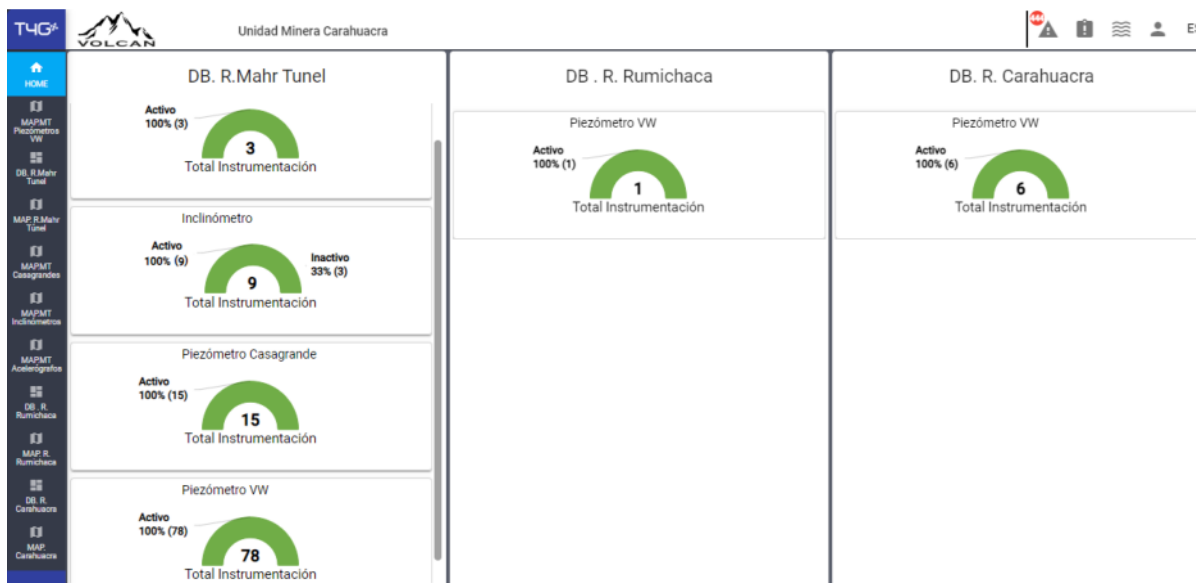


Nota. Elaboración propia.

Tras esta autenticación, se abrió la pantalla principal del T4G, que presentó una barra de herramientas versátil y un reloj que mostraba la hora local, proporcionando una interfaz de usuario intuitiva y eficaz para el monitoreo, como se muestra en la Figura 56.

Figura 56

Dashboard estado de Instrumentos

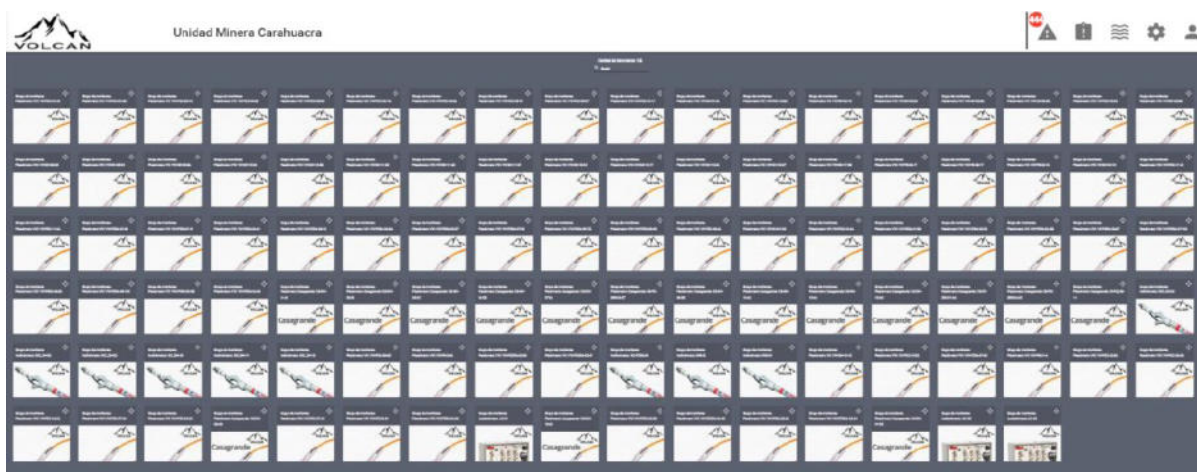


Nota. Elaboración propia.

Luego se llevó a cabo la personalización y configuración del dashboard de monitoreo del T4G, un componente clave para el seguimiento y análisis de los datos. Esta herramienta, detallada en la Figura 57 aseguró que todos los datos relevantes estuvieran organizados y accesibles de manera eficiente y ordenada.

Figura 57

Dashboard de instrumentos configurados en relavera Marh Túnel



Nota. Elaboración propia.

Simultáneamente, se trabajó en la integración de áreas de monitoreo tipo mapa dentro de T4G, lo que permitió un geoposicionamiento preciso de los instrumentos y una visualización clara de su ubicación y estado, facilitando una comprensión más profunda de los datos en su contexto geográfico, como se evidencia en la Figura 58, Figura 59 y Figura 60.

Figura 58

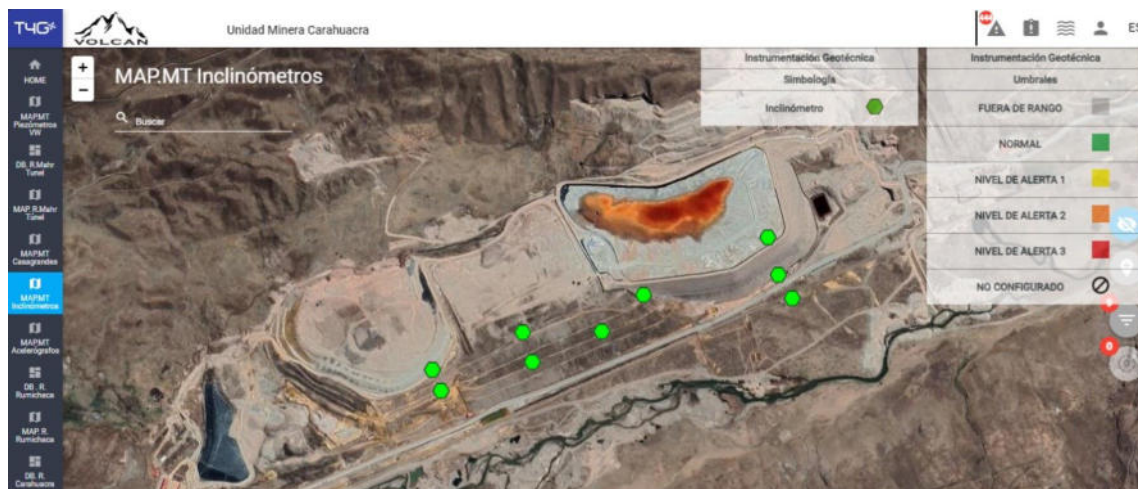
Panel de Mapa de monitoreo de piezómetros VW en la relavera Marh Túnel



Nota. Elaboración propia.

Figura 59

Panel de mapa de monitoreo de inclinómetro en la relavera Marh Túnel



Nota. Elaboración propia.

Figura 60

Panel de mapa de monitoreo de acelerógrafos en la relavera Marh Túnel



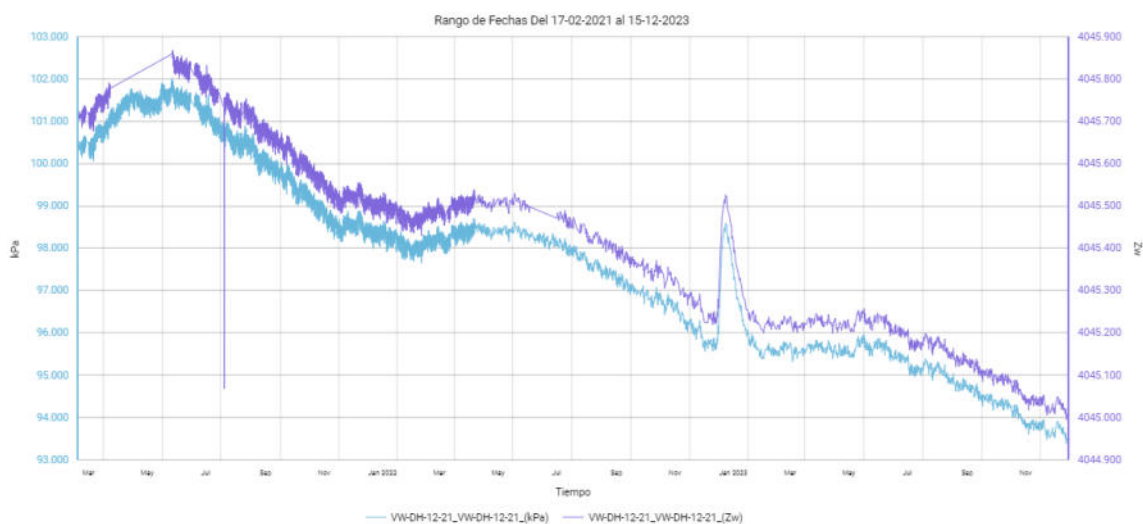
Nota. Elaboración propia.

Además, se desarrollaron funciones avanzadas dentro de T4G que incorpora funciones avanzadas que mejoran la gestión y el análisis de los datos, incluyendo configuraciones de alarmas,

sistemas de alerta y la visualización en tiempo real de la información. Las capacidades gráficas del software se resaltan en la Figura 61, Figura 62 y Figura 63.

Figura 61

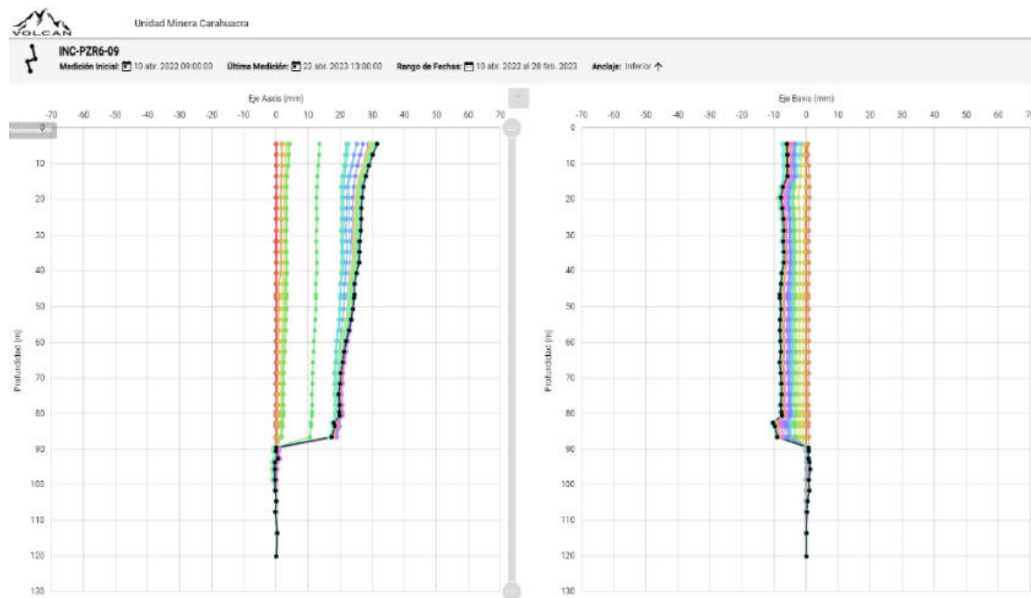
Datos históricos de piezómetro (Presión, nivel de agua en cota)



Nota. Elaboración propia.

Figura 62

Datos históricos de inclinómetro vertical, desplazamiento acumulativo (mm)



Nota. Elaboración propia.

Figura 63

Datos históricos de la estación acelerográfica



Nota. Elaboración propia.

En el Apéndice H se encuentra el acta de asistencia de la capacitación sobre el uso del software T4G de monitoreo geotécnico.

Definición de los niveles de alerta

Tras adaptar los instrumentos geotécnicos a la telemetría en la presa de depósito de relaves Mahr Túnel, el siguiente paso fue establecer los niveles de alerta, proceso que se llevó a cabo en 3 fases. Primero, la definición de los perfiles estratigráficos. Luego, el análisis de sensibilidad de estabilidad de taludes. Por último, niveles de alerta y límites esperados.

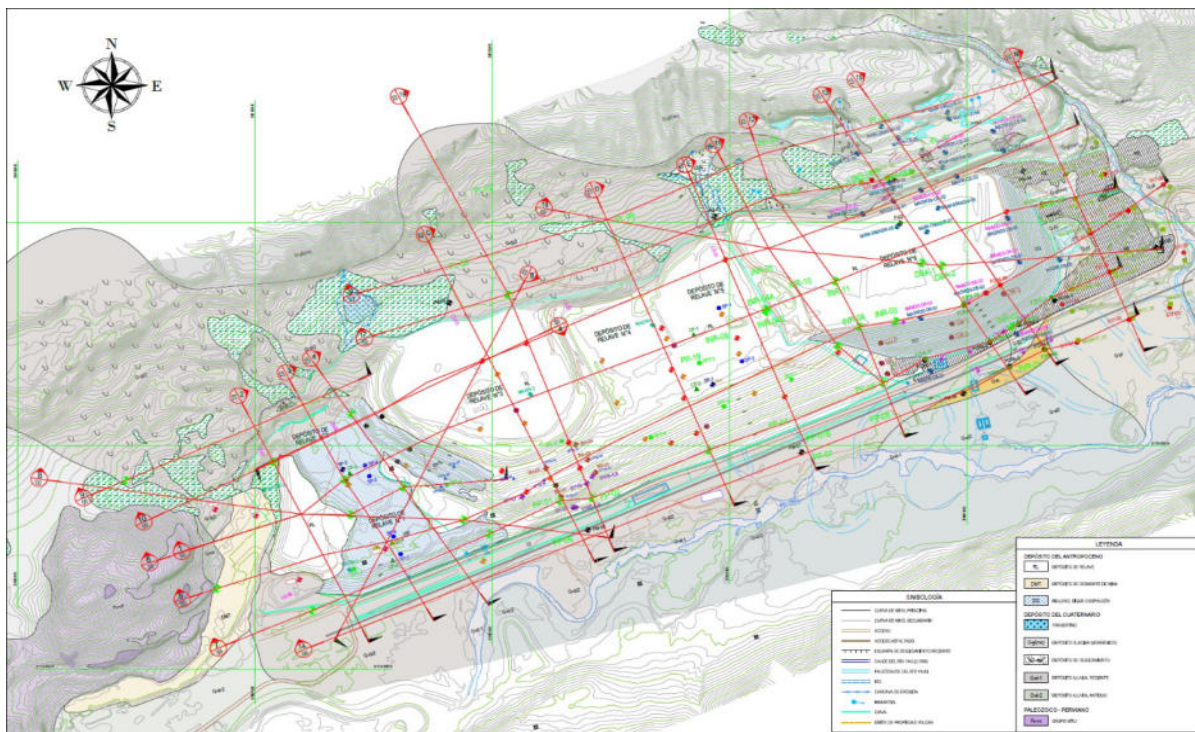
Definición de los perfiles estratigráficos

El primer paso consistió en comprender las características geológicas y estructurales de los depósitos de relave mediante un análisis detallado de cada depósito. La Figura 45 muestra la distribución de las secciones geológicas realizadas, ofreciendo una visión general de la disposición

y las características geológicas de toda la zona. Entre el apéndice R hasta Z se presentan todas las secciones geotécnicas realizadas.

Figura 64

Plano de distribución de las secciones geológicas de corte



Nota. Elaboración propia.

A continuación, se detalla la descripción estratigráfica de cada uno de los depósitos.

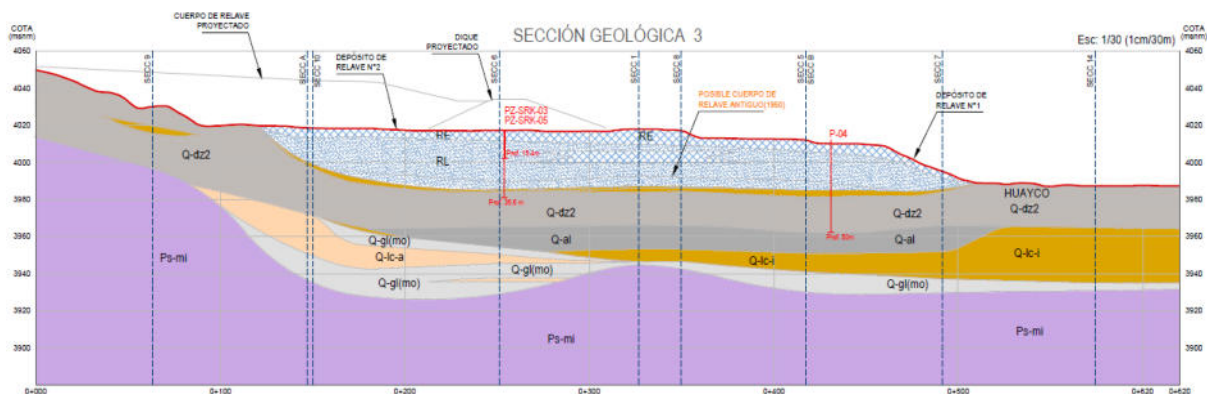
Depósitos de relaves 1 y 2

Los depósitos de relaves 1 y 2 se encuentran localizados en el extremo derecho de Mahr Túnel y emplazados en una llanura aluvial junto a una ladera con inclinaciones de 10 a 13 grados, siendo estas áreas las más antiguas del complejo, con operaciones que datan de 1938. Hacia 1951 estos depósitos abarcaban aproximadamente 13.6 hectáreas y, notablemente, en su borde derecho se encontraba un depósito de tungsteno de granulometría gruesa y alto contenido de pirita, añadiendo complejidad a la geología del lugar. La Figura 65 ilustra el modelo geológico de la

sección geológica 3, desarrollado a partir del análisis de las perforaciones PZ-SRK-03. P-04 y PM-09, que alcanzaron el suelo natural, descubriendo capas de turba, limo orgánico y arcilla limosa en distintas profundidades, resaltando la diversidad del subsuelo y su variabilidad. El sondeo PM-09 es particularmente revelador, mostrando una secuencia variada de horizontes aluviales que incluyen desde arena gravosa con arcilla y cantos, pasando por grava bien graduada con limo, hasta llegar a capas intercaladas de arena fina y arcilla de alta plasticidad, subrayando la complejidad del suelo en esta área, con un espesor del depósito de relaves que oscila entre 21 y 33 metros. Lo que es fundamental para la planificación y gestión adecuada de los depósitos 1 y 2.

Figura 65

Sección geológica 3 – Relavera 1 y 2



Nota. Elaboración propia.

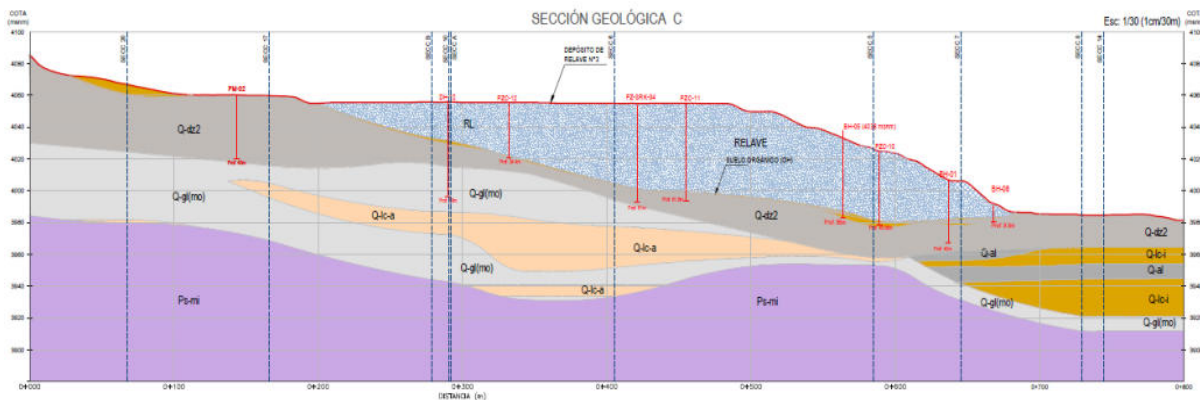
Depósito de relaves 3

El depósito de relave 3 está ubicado entre los depósitos 2 y 4. Se asienta en una ladera glaciar con inclinaciones de 12 a 13 grados, que comienza en una depresión aluvial que se extiende por unos 90 metros y desemboca en una llanura aluvial horizontal hacia el río Yauli. El análisis detallado de este depósito se refleja en la sección geológica C, ilustrada en Figura 66, que fue desarrollada a partir de 6 perforaciones diamantinas que alcanzaron suelo natural (DH-12, PZ-SRK-04. BH-05, BH-01, BH-08 y PM-08), desvelado una mezcla fascinante de materiales y capas

subterráneas, desde turba con arcilla y grava en distintas capas detectadas en los sondeos BH-01 y BH-05, hasta limo orgánico y arcilla arenosa con grava identificados en los sondeos PZ-SRK-04 y DH-12.

Figura 66

Sección geológica C – Relavera 3



Nota. Elaboración propia.

En el área de transición entre los depósitos glaciares y aluviales, se identificó una depresión de entre 90 a 120 metros de longitud. En la que se concentró la presencia de turba, arcilla y limo orgánico. En cuanto a la estructura del depósito glaciar, descrita como grava limosa con arena y fragmentos de rocas polimícticas, se evidenció una alta densidad y compacidad del material. Lo que se corroboró en las perforaciones realizadas. Por último, el análisis del depósito aluvial reveló tres horizontes distintos, proporcionando una visión detallada de las capas que componen este segmento del depósito.

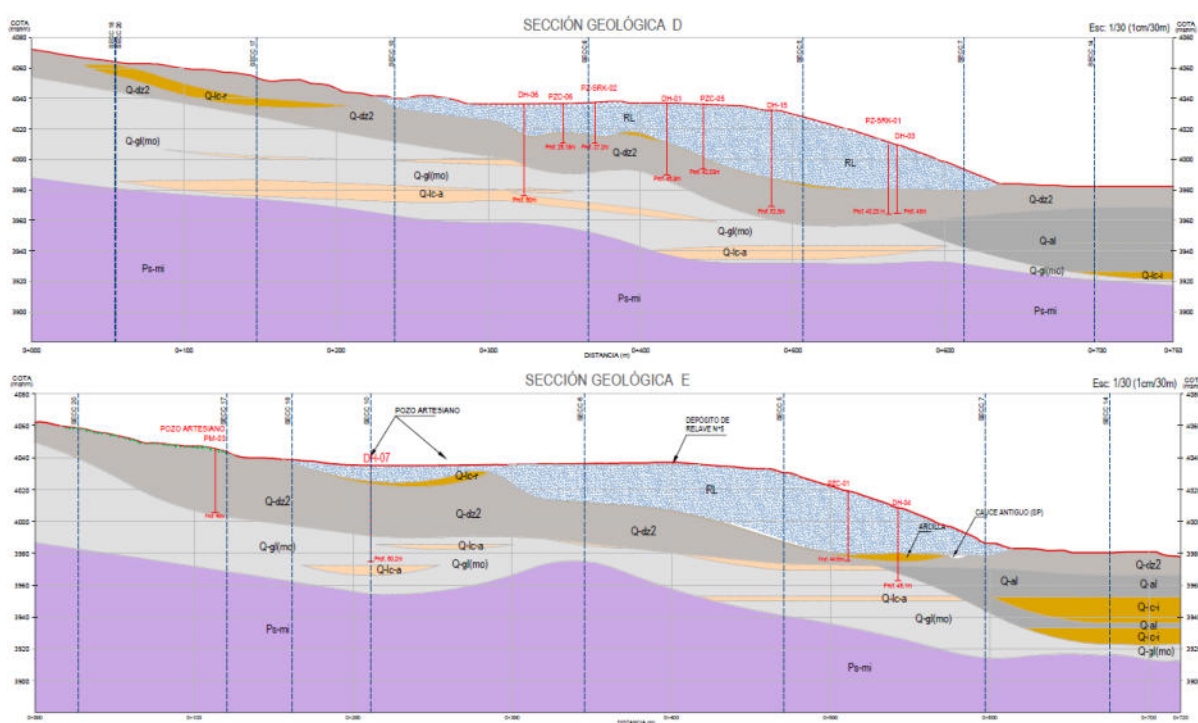
Depósitos de relaves 4 y 5

Los depósitos de relaves 4 y 5, ubicados entre los depósitos 3 y 6, se extienden sobre una ladera glaciar ondulada, con una inclinación promedio de 11 grados. Esta área, detallada en la Figura 67, exhibe zonas de depresión sub-horizontal que se extienden de 60m a 105 m y laderas

inclinadas de 19° a 21°, que fueron construidos a partir de 6 sondajes (DH-03, PZ-SRK-01, DH-15, DH-01, PZ-SRK-02 y PM-06), revelando la siguiente composición de subsuelo: el sondeo DH-03. se encontró una capa de arcilla de 4.6 metros de espesor, mientras que en los sondeos DH-15 y DH-01 se detectaron capas de limo orgánico; además, en el sondeo DH-06 se encontró una mezcla de turba y limo orgánico de 0.50 metros de espesor.

Figura 67

Sección geológica D y E – Relavera 4 y 5



Nota. Elaboración propia.

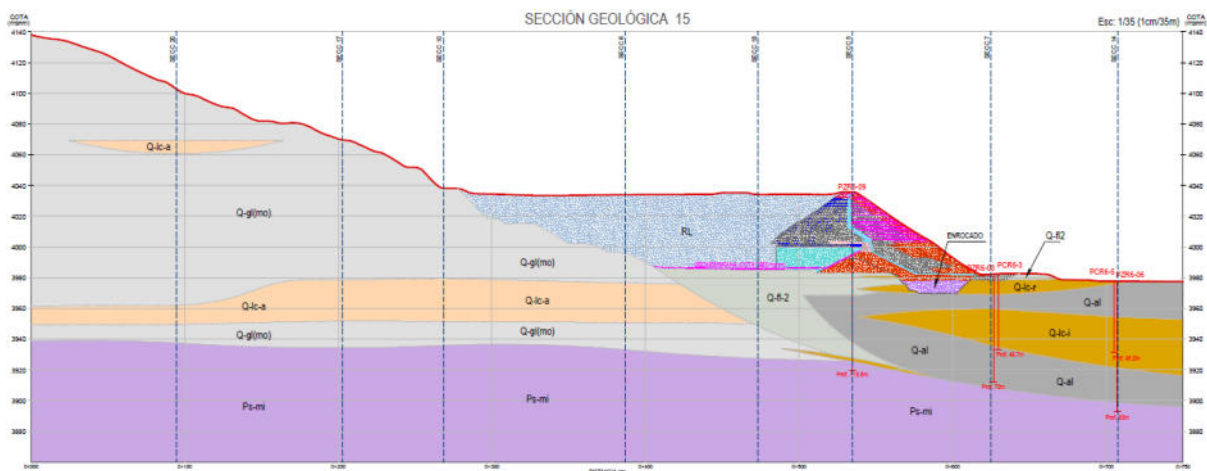
El depósito glaciar en esta área se compone de grava limosa con arena y cantos de color rojo pálido y clastos de rocas polimícticas, cuya densidad y litificación varían significativamente, lo cual se observa en los diferentes sondeos realizados.

Depósito de relaves N°6

El depósito de relaves N°6, localizado en el extremo izquierdo y en la zona sur de la presa de relaves Mahr Túnel, se distingue por una ladera glaciar con una inclinación de 20°, que se extiende hacia una llanura aluvial horizontal hasta el cauce del río Yauli. Esta área, en la proximidad de la cantera Esperanza, presenta características geográficas únicas con bancos de 7 a 10 m, bermas de entre 7 y 18 metros de ancho y ángulos de banco variando de 30 a 36°. El análisis geológico de esta zona, representado en la Figura 68, se basa en la Sección 15, construida a partir de tres perforaciones diamantinas en el depósito glaciar - DH-14, P-02, P-01 - y dos perforaciones en el depósito aluvial - S17-11 y PM-06. El depósito glaciar consiste en grava limosa con arena y cantos de color rojo pálido, con fragmentos angulosos a subangulosos y clastos de rocas polimícticas, con una densidad que varía de densa a muy densa.

Figura 68

Sección geológica 15 – Relavera 6, zona sur



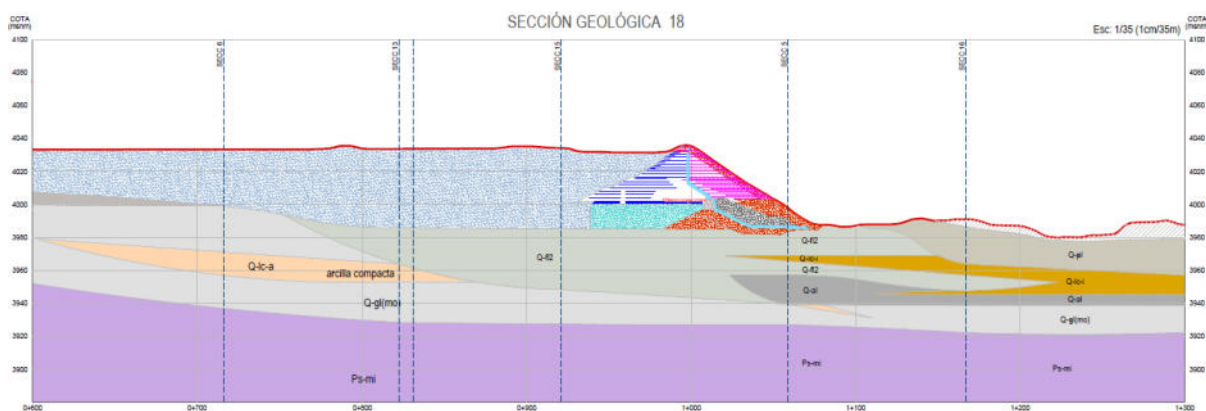
Nota. Elaboración propia.

En la zona sur de la presa, específicamente en la cimentación, se encuentran intercalaciones de limos y arcillas de hasta 5 m de espesor, donde los materiales finos fueron removidos y reemplazados por suelo granular hasta aproximadamente 15 metros de profundidad, asegurando así la estabilidad y solidez de la estructura del dique

En la zona este de la presa 6, representada en la Figura 69, permitió identificar la estructura geológica del área a través de tres horizontes en el depósito del Cuaternario. El horizonte superior es un cono deyectivo aluvial formado por los sedimentos de la quebrada Sachuna, creando un abanico aluvial con un espesor aproximado de 20m y compuesto principalmente por grava arcillosa. Lo que indica un proceso activo de sedimentación en la zona; mientras que el horizonte intermedio, correspondiente al depósito aluvial del río Yauli, se extiende a través de la llanura del valle con un espesor entre 10 y 25 metros, compuesto por una mezcla de arena bien graduada y arcilla, reflejando la influencia dinámica fluvial del río Yauli. Por último, el horizonte inferior situado en la zona de cimentación, es un depósito lacustrino bajo el aluvial del río Yauli, con un espesor de 7 a 20 metros, compuesto principalmente por arcilla de alta plasticidad y consistencia rígida, indicativo de un ambiente de deposición más estable y tranquilo, característico de los entornos lacustres.

Figura 69

Sección geológica 18 – Relavera 6, zona este



Nota. Elaboración propia.

Esta identificación de los horizontes en la zona este de la presa 6 es crucial para entender las dinámicas geotécnicas del área, proporcionando información vital para la gestión eficaz de la





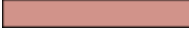






presa y para la evaluación y mitigación de riesgos potenciales, asegurando así la seguridad y la estabilidad a largo plazo de la infraestructura y su entorno.




Análisis de sensibilidad de estabilidad de taludes

Para establecer los niveles de alerta en la presa Mahr Túnel, se llevó a cabo un análisis de sensibilidad de la estabilidad de taludes, centrándose en cómo las variaciones en el nivel freático afectan la estabilidad estructural. Los cuales fueron realizados utilizando el software SLIDE (Rocscience), versión 9 (2020). El proceso de análisis involucró el uso del método de Spencer, una técnica reconocida para la evaluación de superficies de falla potenciales en un enfoque bidimensional basado en el equilibrio límite. Donde se consideraron tanto superficies de falla circulares como del tipo bloque. Las propiedades de los materiales fueron consideradas homogéneas e isotrópicas, cuyos aspectos físicos y mecánicos, se presentan en la Tabla 13.

Tabla 13

Propiedad mecánicas de las unidades geotécnicas

Unidad geotécnica		γ (kN/m ³)	Φ' (°)	c' (kPa)	Color
Unidad 01:	Roca de fundación				
Unidad 2A:	Grava arcillosa-limosa	18	35	23	
Unidad 2B:	Arena limosa (Q-al-2b)	19	32	0	
Unidad 2C:	Grava limosa con arena(Q-al-2a)	19	33	0	
Unidad 2D:	Arena – depósito fluvial (Q-al-3)	19	32	0	
Unidad 2E:	Arcilla dura (Q-lc)	16.5	27	11	
Unidad 03:	Relave fino	16	27.5	0	
Unidad 04:	Relleno compactado	20	38	5	
Unidad 05:	Relave grueso compactado	19	35	0	
Unidad 06:	Enrocado	22	38	0	
Unidad 07:	Relave consolidado	21	27	0	

Unidad geotécnica		Υ (kN/m³)	Φ' (°)	c' (kPa)	Color
Unidad 08:	Relleno con geomalla	22.6	34	20	
Unidad 09:	Muro reforzado	20	37	30	
Unidad 10:	Dren/ Filtro	16	30	0	

Nota. Elaboración propia.

Los factores de seguridad mínimos que fueron utilizados para determinar los niveles de alerta se establecieron conforme a la Tabla 12.

Tabla 14

Valores de factores de seguridad mínimos para el análisis de sensibilidad

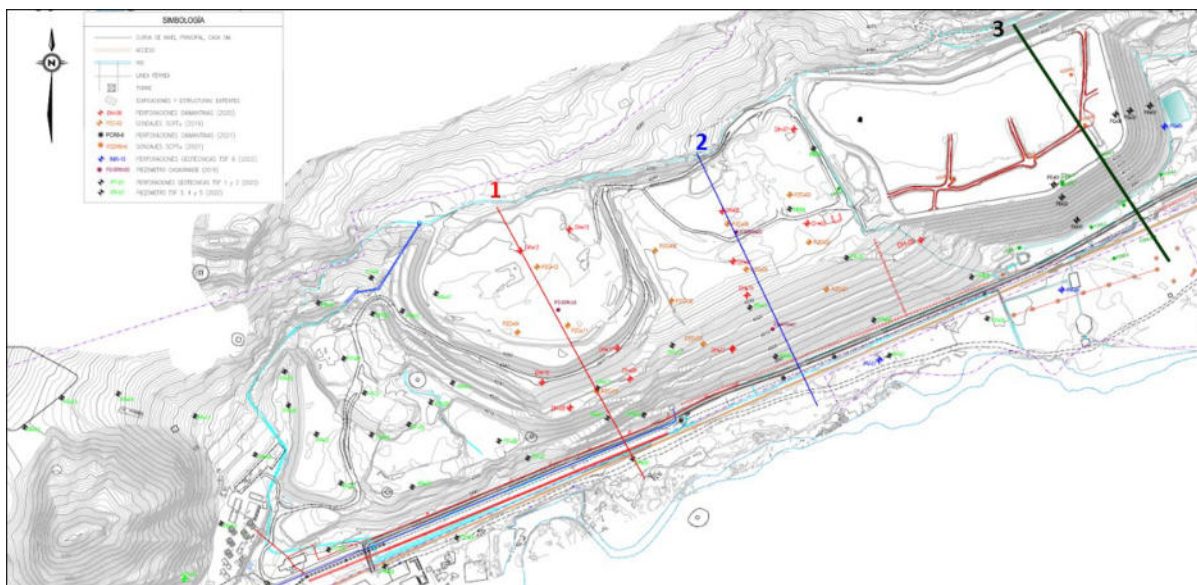
Nivel de alerta	Factor de seguridad
Nivel de alerta 1	1.50
Nivel de alerta 2	1.35
Nivel de alerta 3	1.00

Nota. Elaboración propia.

Los análisis de sensibilidad de estabilidad de taludes realizados abarcaron 3 secciones críticas de los depósitos de relaves, cuya distribución geográfica se ilustra en la Figura 70.

Figura 70

Plano de distribución de las secciones de análisis

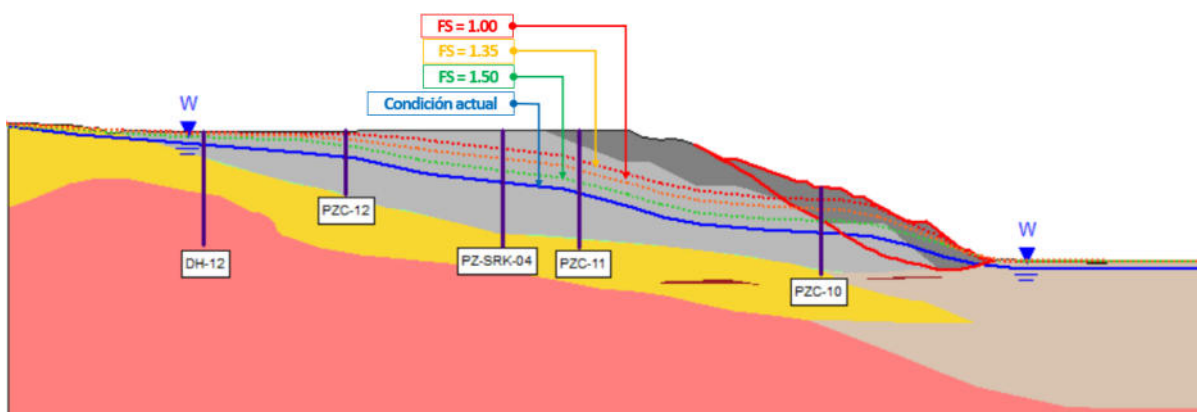


Nota. Elaboración propia.

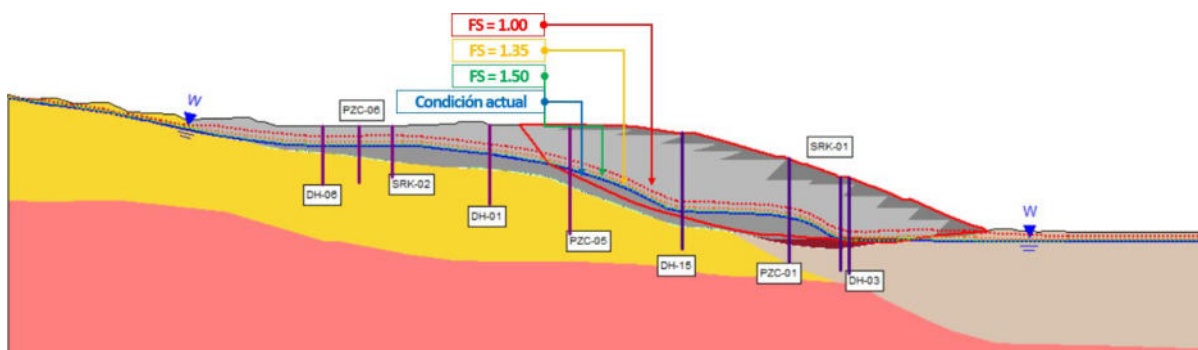
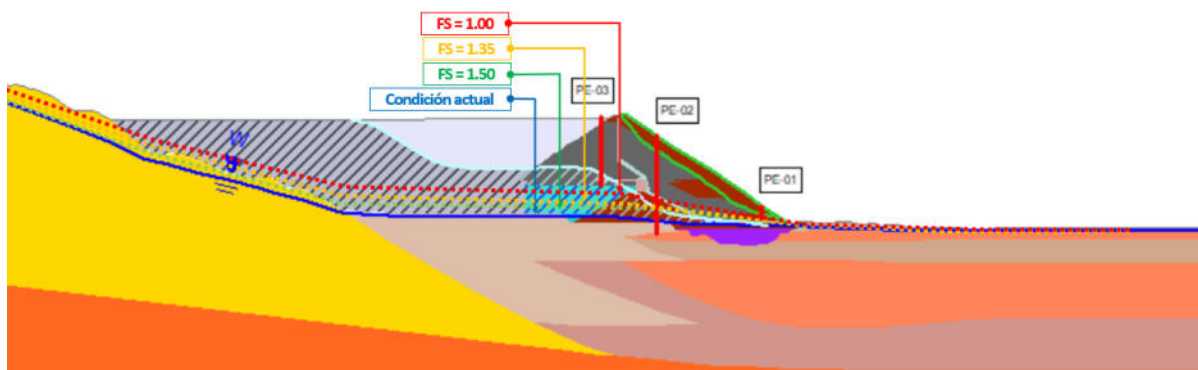
Los resultados se presentan en la Figura 71, Figura 72 y Figura 73, donde se presentan los factores de seguridad calculados para diferentes niveles piezométricos, permitiendo identificar casos en los que la estabilidad del talud podría verse comprometida.

Figura 71

Análisis de sensibilidad de la sección 1-1



Nota. Elaboración propia.

Figura 72*Análisis de sensibilidad de la sección 2-2**Nota.* Elaboración propia.**Figura 73***Análisis de sensibilidad de la sección 4-4**Nota.* Elaboración propia.*Niveles de alerta y límites esperados*

Luego de obtener los resultados del análisis de sensibilidad de las secciones críticas, se establecieron los niveles de alerta y los límites esperados para las lecturas de los piezómetros tipo casagrande y de cuerda vibrante, que se reflejan en la Tabla 15, Tabla 16 y Tabla 17.

Tabla 15*Límites de alerta para los niveles piezométricos, relavera 3*

Instrumento	Nivel de alerta			
	Normal	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
	FS > 1.5 (msnm)	1.35 < FS < 1.5 (msnm)	1.0 < FS < 1.35 (msnm)	FS < 1.0 (msnm)
VW-PZC-04-38	< 4034.24	4034.24 a 4040.40	4040.40 a 4045.56	>4045.56
VW-PZC-04-56	< 4034.24	4034.24 a 4040.40	4040.40 a 4045.56	>4045.56
VW-DH-10-12	< 4009.93	4009.93 a 4016.18	40016.18 a 4021.61	>4021.61
VW-DH-10-43	< 4009.93	4009.93 a 4016.18	40016.18 a 4021.61	>4021.6
CG-DH-10-44	< 4009.93	4009.93 a 4016.18	40016.18 a 4021.61	>4021.61
CG-DH-10-64	< 4007.59	4007.59 a 4014.46	4014.46 a 4019.45	>4019.45
CG-DH-08-34	< 4007.99	4007.99 a 4014.13	40014.13 a 4019.22	>4021.61
VW-DH-12-21	< 4052.62	4052.62 a 4054.25	4054.25 a 4055.25	>4055.25
CG-DH-12-60	< 4052.62	4052.62 a 4054.25	4054.25 a 4055.25	>4055.25
VW-PZC-12-17	< 4048.09	4048.09 a 4051.41	4051.41 a 4053.83	>4053.83
VW-PZC-12-34	< 4048.09	4048.09 a 4051.41	4051.41 a 4053.83	>4053.83
CG-PZC-SRK-04-60	< 4034.86	4034.86 a 4041.10	4041.10 a 4046.09	>4046.09
VW-PZC-11-36	< 4028.88	4028.88 a 4035.22	4035.22 a 4040.11	>4040.11
VW-PZC-10-22	< 4007.59	4007.59 a 4014.46	4014.46 a 4019.45	>4019.45
CG-DH-13-60	< 4050.61	4050.61 a 4052.1	4052.11 a 4053.94	>4053.94
VW-DH-11-20	< 4025.75	4027.75 a 4029.75	4029.75 a 4031.75	>4031.75
VW-DH-09-36	< 4008.38	4008.38 a 4014.63	4014.63 a 4019.62	>4019.62
VW-DH-09-51	< 4008.38	4008.38 a 4014.63	4014.63 a 4019.62	>4019.62

Nota. Elaboración propia.

Tabla 16*Límites de alerta para los niveles piezométricos, relavera 4 y 5*

Instrumento	Nivel de alerta			
	Normal	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
	FS > 1.5 (msnm)	1.35 < FS < 1.5 (msnm)	1.0 < FS < 1.35 (msnm)	FS < 1.0 (msnm)
VW-PZC-08-30	< 4017.89	4017.89 a 4019.49	4019.49 a 4022.31	> 4022.31
VW-PZC-08-46	< 4017.89	4017.89 a 4019.49	4019.49 a 4022.31	> 4022.31
VW-PZC-09-19	< 4026.70	4026.70 a 4028.33	4028.33 a 4031.13	> 4031.13
VW-PZC-09-27	< 4026.70	4026.70 a 4028.33	4028.33 a 4031.13	> 4031.13
VW-PZC-07-31	< 3992.19	3992.19 a 3993.81	3993.81 a 3996.58	> 3996.58
VW-PZC-07-43	< 3992.19	3992.19 a 3993.81	3993.81 a 3996.58	> 3996.58
VW-DH-17-28	< 3980.45	3980.45 a 3982.11	3982.11 a 3984.88	> 3984.88
VW-DH-06-53	< 4026.70	4026.7 a 4028.33	4028.33 a 4031.13	> 4031.13
VW-PZC-06-13	< 4026.70	4026.7 a 4028.33	4028.33 a 4031.13	> 4031.13
VW-PZC-06-26	< 4026.71	4026.7 a 4028.34	4028.33 a 4031.14	> 4031.13
CG-PZ-SRK-02-27	< 4027.0	4027.00 a 4028.64	4028.64 a 4031.46	> 4031.46
VW-DH-01-10	<4027.72	4027.72 a 4028.36	408.36 a 4029.36	> 4029.36
VW-DH-01-25	<4022.72	4022.72 a 4024.36	4024.36 a 4027.36	> 4027.36
CG-DH-01-25	<4022.72	4022.72 a 4024.36	4024.36 a 4027.36	> 4027.36
CG-DH-01-41	<4022.72	4022.72 a 4024.36	4024.36 a 4027.36	> 4027.36
VW-PZC-05-29	< 4014.98	4014.98 a 4016.64	4016.64 a 4019.43	> 4019.43
VW-PZC-05-35	< 4014.98	4014.98 a 4016.64	4016.64 a 4019.43	> 4019.43
VW-DH-15-17	< 4017.85	4017.85a 4019.75	4019.75 a 4021.75	> 4021.75
VW-PZC-01-30	< 3992.10	3992.10 a 3993.72	3993.72 a 3995.53	> 3995.53
CG-PZ-SRK-01-46	< 3980.06	3980.06 a 3981.68	3981.68 a 3984.57	> 3984.57
VW-DH-03	< 3979.39	3979.39 a 3981.00	3981.00 a 3983.80	> 3983.80
VW-DH-02-10	<4028.72	4028.72 a 4030.36	4030.36 a 4032.36	> 4032.36

Instrumento	Nivel de alerta			
	Normal	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
	FS > 1.5	1.35 < FS < 1.5	1.0 < FS < 1.35	FS < 1.0
	(msnm)	(msnm)	(msnm)	(msnm)
CG-DH-02-28	<4022.72	4022.72 a 4024.36	4024.36 a 4027.36	> 4027.36
CG-DH-07-56	< 4026.70	4026.7 a 4028.33	4028.33 a 4031.13	> 4031.13
VW-PZC-02-22	< 4014.98	4014.98 a 4016.64	4016.64 a 4019.43	> 4019.43
VW-PZC-02-35	< 4014.98	4014.98 a 4016.64	4016.64 a 4019.43	> 4019.43
VW-PZC-03-10	< 4027.00	4027.00 a 4028.64	4028.64 a 4031.46	> 4031.46
VW-PZC-03-20	< 4027.00	4027.00 a 4028.64	4028.64 a 4031.46	> 4031.46

Nota. Elaboración propia.

Tabla 17

Límites de alerta para los niveles piezométricos, relavera 6

Instrumento	Nivel de alerta			
	Normal	Normal	Normal	Normal
	FS > 1.5	FS > 1.5	FS > 1.5	FS > 1.5
	(msnm)	(msnm)	(msnm)	(msnm)
PQ-03	< 3.984.5	3.984.5 a 3.987.0	3.987.0 a 3.990	> 3.990.0
VW-PE-01_06	< 3.987.0	3.987 a 3.989.5	3.989.5 a 3.990.5	> 3.990.5
VW-PE-02_31	< 3.996.0	3.996 a 3.998.5	3.998.5 a 4.001.5	> 4.001.5
VW-PE-03_17	< 4.013.5	4.013.5 a 4.015.5	4.015.5 a 4.018.5	> 4.018.5
VW-PE-04_03	< 3.988.0	3.988 a 3.990.5	3.990.5 a 3.993.5	> 3.993.5
VW-PE-05_15	< 3.995.0	3.995 a 3.997.5	3.997.5 a 4.000.5	> 4.000.5
VW-PE-06_17	< 4.015.0	4.015.5 a 4.018.0	4.018.0 a 4.020.5	> 4.020.5
PZR6-07	< 4.008.5	4.008.5 a 4.009.5	4.011.0 a 4.012.0	> 4.012.0
PZR6-08	< 4.008.5	4.008.5 a 4.009.5	4.011.0 a 4.012.0	> 4.012.0
PZR6-09	< 3.998.0	4.998.0 a 3.999.0	4.001.0 a 4.002.0	> 4.002.0
PZDR6-02	< 4.015.0	4.015.5 a 4.017.0	4.017.0 a 4.020.0	> 4.020.0

Instrumento	Nivel de alerta			
	Normal	Normal	Normal	Normal
	FS > 1.5 (msnm)	FS > 1.5 (msnm)	FS > 1.5 (msnm)	FS > 1.5 (msnm)
PZDR6-03	< 4.015.7	4.015.7 a 4.017.7	4.017.7 a 4.019.7	> 4.019.7
PZDR6-04	< 4.015.7	4.015.7 a 4.017.7	4.017.7 a 4.019.7	> 4.019.7
PZR6-01	< 3.978.5	3.978.5 a 3.979.5	3.979.5 a 3.981.0	> 3.981.0
PZR6-02	< 3.978.5	3.978.5 a 3.979.5	3.979.5 a 3.981.0	> 3.981.0
PZR6-03	< 3.981.0	3.981.0 a 3.982.0	3.982.0 a 3.982.5	> 3.982.5
PZR6-04	< 3.981.0	3.981.0 a 3.982.0	3.982.0 a 3.982.5	> 3.982.5
PZR6-05	< 3.977.0	3.977.0 a 3.977.5	3.977.5 a 3.977.90	> 3.977.9
PZR6-06	< 3.977.0	3.977.0 a 3.977.5	3.977.5 a 3.977.90	> 3.977.9

Nota. Elaboración propia.

Además, se establecieron niveles de desplazamiento y deformación para los hitos topográficos, la estación robótica y el radar, basándose en la bibliografía existente y buenas prácticas de ingeniería, como se detalla en la Tabla 18.

Tabla 18

Límites de alerta para los hitos topográficos, estación robótica y radar

Nivel de Alerta	Velocidad y Desplazamiento
	≤ 0.50 cm/día
Normal	Asentamiento: Entre dos lecturas en 1 mes la diferencia < 0.50cm. Desplazamiento horizontal: Entre dos lecturas en 1 mes la diferencia < 1cm.
	0.50 – 1.00 cm/día
Nivel 1	Asentamiento: Entre dos lecturas en 1 mes la diferencia < 0.75cm. Desplazamiento horizontal: Entre dos lecturas en 1 mes la diferencia < 1.5cm.

Nivel de Alerta	Velocidad y Desplazamiento
	1.0 – 5.00 cm/día
Nivel 2	Asentamiento: Entre dos lecturas en 1 mes la diferencia < 1cm. Desplazamiento horizontal: Entre dos lecturas en 1 mes la diferencia < 2cm.
	> 5.00 cm/día
Nivel 3	Asentamiento: Entre dos lecturas en 1 mes la diferencia > 1cm. Desplazamiento horizontal: Entre dos lecturas en 1 mes la diferencia > 2cm.

Nota. Elaboración propia.

Del mismo modo, se definieron rangos de deformación para el monitoreo de los inclinómetros, como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19

Límites de alerta para los inclinómetros

Nivel de Alerta	Velocidad absoluta
Normal	≤ 0.50 cm/día
Nivel 1	0.50 – 1.00 cm/día
Nivel 2	1.0 – 5.00 cm/día
Nivel 3	> 5.00 cm/día

Nota. Elaboración propia.

En cuanto a los niveles de alerta por eventos sísmicos, se utilizó la referencia de Swaisgood (2003) para establecer los rangos de desplazamiento admisibles en la cresta de la presa, cuyos criterios se presentan en la Tabla 20.

Tabla 20*Nivel de daño versus asentamiento de cresta ante un terremoto*

Asentamiento de la Cresta (% de altura de presa + espesor de fundación)	Nivel de Daño
> 0.5 %	Serio
0.1% a 1 %	Moderado
0.02 a 0.5 %	Menor
< 0.1 %	Ninguno

Nota. Elaboración propia.

La integración de estos análisis fue la definición de los límites y niveles de alerta proporcionan a los operadores de la presa herramientas cruciales para el monitoreo y respuesta rápida ante cualquier cambio o evento potencialmente riesgoso, elevando así la eficiencia en la gestión de riesgos en la presa de relaves Mahr Túnel.

Evaluación de riesgos y planificación de respuesta

Para garantizar la seguridad y estabilidad de la presa de relaves Mahr Túnel, se llevó a cabo un análisis de riesgos y una planificación de la respuesta, centrados en prevenir y controlar posibles incidentes de fallo. El proceso comenzó con la aplicación de la metodología Bow Tie, una técnica eficaz para evaluar y gestionar los riesgos asociados a la presa de relaves. Lo que permitió identificar las causas raíz y establecer controles preventivos y críticos para cada uno de los depósitos de relaves. El resultado de este análisis se presenta en la Figura 74, que muestra el Bow Tie del depósito de relaves de Mahr Túnel 1 al 6, detallando las causas, los controles y las medidas preventivas implementadas.

Figura 74

Bow Tie del depósito de relaves 1 al 6 de Mahr Túnel

CAUSA	CONTROL PREVENTIVO	CONTROL CRÍTICO PREVENTIVO	EVENTO TOP		CONTROL MITIGANTE	CONTROL CRÍTICO MITIGANTE	CONSECUENCIA
			PMIC - Potential Maximum Consequence Categoría 5	CRL - Current Risk Level Catastrófico B - Probable 24 (H) Salud y Seguridad			
Falla por inestabilidad Física de la Presa de Relaves (slumps, overtopping, erosiones, piping, deficiente ingeniería, construcción y operación)	Ejecutar Inspección Multidisciplinaria Post Storm (revisión de informe).	Monitoreo de las infiltraciones e integrar la instrumentación geotécnica, de acuerdo a TARP.	MUE - PERIODO DE ESTABILIDAD DEL DEPÓSITO DE MAHRTUNEL		Ejecutar y mantener vigentes Convenio con instituciones para hospitales y policía para la asistencia y delimitación de huella de inundación	Contar con un equipo entrenado y capacitado en el Plan de respuesta a emergencia actualizado	Muerte y/o lesiones severas de 5 o más personas
	Implementar la Gestión de gobierno (Nombramiento, entrenamiento y establecimiento de un Organigrama con Responsabilidades)	Realizar Inspección Semanal Sigore y seguimiento a los planes de acción de las observaciones generadas.			Mantener la Brigada de respuesta a emergencia capacitada y entrenada referente a falla de la presa de relaves	Activar el Sistema de Alerta Temprana (asignación de recursos, albergues, alimentos, agua, etc...)	Proceso Judicial
	Cumplir los lineamientos del Manual de operaciones de relaves, mantenimiento y vigilancia	Aseguramiento de la Calidad de la construcción y cumplimiento de las especificaciones técnicas (implementación e Ingeniería Upgrade)			Activar la Brigada de respuesta a emergencia capacitada y entrenada de otras unidades de la compañía y otras MAS OREANAS.	Mantener la posta médica equipada (Equipos, organigrama, plano)	Accidente patrimonial por pérdida de equipo / Pérdida de proceso por paralización de operaciones.
	Interpretación del monitoreo de los niveles de las piscas colectoras y borde libre.	Implementar las acciones y recomendaciones del estudio de Upgrade de relaves			Centro de control entrenado en protocolo de comunicación de emergencia referente a post evento de falla de la presa de relaves.	Activación de maquinaria equipos línea amarilla disponibles en la unidad para emergencias	Impacto negativo a la imagen de la empresa
	Implementar las recomendaciones del estudio considerados en el PPM 12 / CDA	Implementar el SAT en zona industrial y en zona urbana (zonas seguras, rutas de evacuación, y sistema de alerta sonora)			Activar el Plan de Gestión de Crisis	Disponibilidad y operatividad de equipos para responder a una emergencia (Helicópteros, ambulancias, etc...)	
	Interpretar data de información geotécnica en tiempo real	Ejecutar el DSR- DSU, e implementar las recomendaciones que surgen del mismo			Aplicar el plan de respuesta a emergencias	Contar con un centro de control para la recepción de comunicaciones de emergencias	
		Revisión técnica por parte de Panel de Revisores Independientes - RIC y GUENORE (Diseño Upgrade - emergencia Mahrtunel)					
	Cumplir el Manual de operaciones para el mantenimiento y limpieza de los canales de coronación de los depósitos de Mahrtunel, agua sin contacto	Realizar el mantenimiento y limpieza de los canales de coronación					
	Análisis del Informe (Control de nivel del espejo de agua del pond)						
	Culminación de los canales de coronación depósitos antiguos						
	Cumplir los criterios de diseño del PPM 14 referente a borde libre de acuerdo a la clasificación de la presa						
	Interpretar la Data de información meteorológica						

Nota. Elaboración propia.

Se llevó a cabo una evaluación profunda para identificar los posibles modos de falla de la presa, y se establecieron medidas de contingencia efectivas que pudieran activarse antes, durante y después de un posible evento, cuyos datos se muestran en la Tabla 21. Los modos de falla identificados fueron: el fallo en el dique de la presa de relaves; la erosión interna o tubificación en el terraplén, la fundación o el estribo de la presa, la falla por desbordamiento de la presa; y la filtración que podría llevar a una liberación ambiental.

Tabla 21*Modos de falla en el depósito de relave 6, Mahr Túnel*

Item	Modo de falla	Causas
1	Fallo en el dique de la presa de relaves (corona, talud o pie)	Inestabilidad por licuación estática de estrato profundo a nivel de fundación. Inestabilidad por licuación de estrato profundo a nivel de fundación por acción de un sismo.
2	Erosión interna o tubificación en el terraplén, la fundación o el estribo de la presa	Licuación interna de estratos finos bajo condiciones sísmicas. Presión hidráulica elevada en estratos de fundación susceptibles a licuación.
3	Falla por desbordamiento de presa	Incremento del nivel freático en la presa debido a licuación de estratos profundos.
4	Filtración (liberación ambiental)	Movimientos y fisuras en la presa causados por licuación sísmica.

Nota. Elaboración propia.

La planificación también incluyó la elaboración de planes de respuesta de acciones desencadenantes (TARPs), diseñados para interceptar y gestionar efectivamente cualquier indicio de peligro antes de que se convierta en una emergencia. Estos planes, que se detallan en el Apéndice I, identifican los desencadenantes específicos y asignan roles y responsabilidades claros para cada nivel de alerta, asegurando una respuesta rápida y efectiva.

Implementación del centro control

Una vez culminado con la adaptación a la telemetría, la definición de los niveles de alerta, y la evaluación de riesgos y planificación de emergencias. Se implementó un centro de control para integrar y supervisar todos los aspectos del sistema de telemetría. Para ello, se eligió la ubicación de la sala de centro de control, cuya área elegida fueron las oficinas del campamento

Huaripampa de San Cristóbal, siendo estratégica por su accesibilidad, seguridad y proximidad a la presa. Luego, se acondicionó el área para soportar equipos tecnológicos avanzados y proporcionar un entorno de trabajo ergonómico y eficiente para el personal. En la Figura 75 se muestra la ubicación del centro de control.

Figura 75

Ubicación de la sala de centro de control



Nota. Elaboración propia.

El equipamiento tecnológico de la sala de centro de control está compuesto por un sistema de cómputo de alta gama, múltiples pantallas de visualización para el seguimiento en tiempo real y sistemas avanzados de comunicación, permitiendo una visualización integral y un análisis detallado de los datos recopilados de los instrumentos geotécnicos. En la Tabla 22 se presentan los equipos computacionales implementados para el centro de control.

Tabla 22

Equipos computacionales implementados para el centro de control

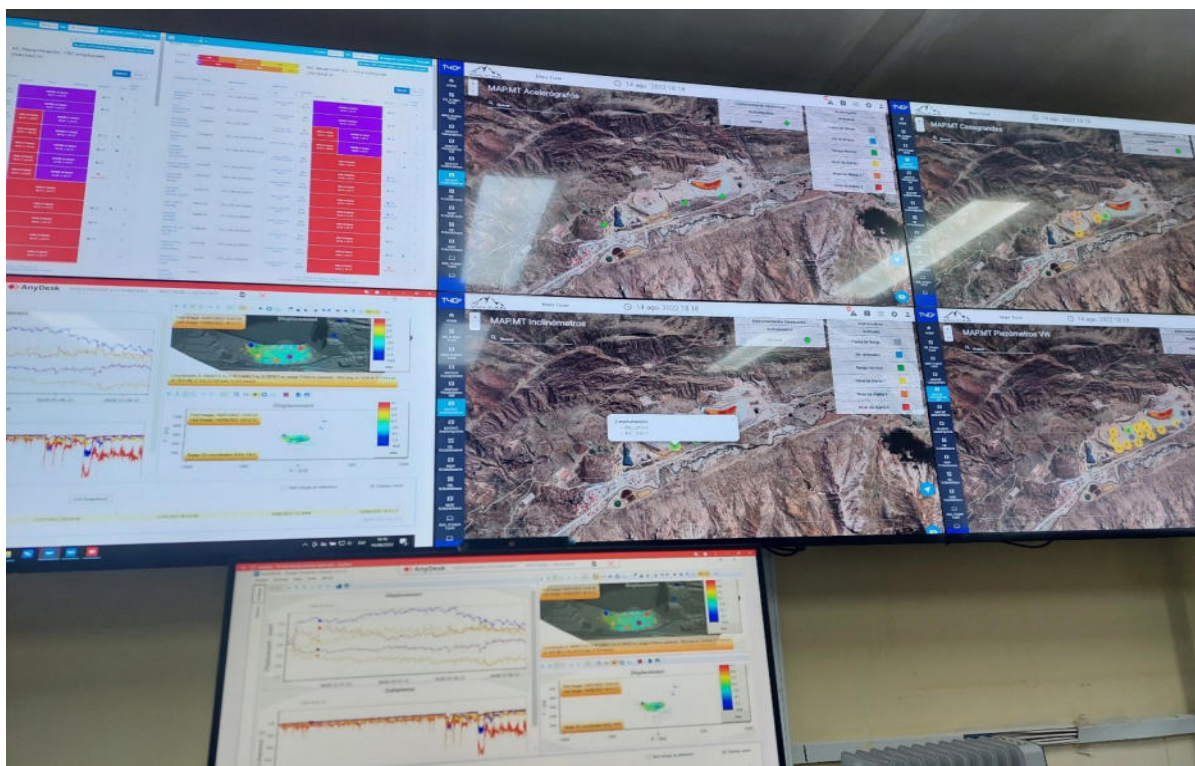
Equipo	Marca	Modelo	Características
PC Workstation	Lenovo	P330 SFF	Hasta 6 monitores conectados
Monitor	Lenovo	ThinkVision P24h-20	23.8" 2560x1440 QHD

Nota. Elaboración propia.

Seguidamente, en la Figura 76 se muestra una evidencia fotográfica de los equipamientos tecnológicos de la sala de centro de control para el monitoreo geotécnico de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel.

Figura 76

Equipamiento tecnológico de la sala de centro de control



Nota. Elaboración propia.

Entre el apéndice J hasta P se presentan todos los planos de distribución y sección de instrumentación geotécnica adaptados a la telemetría.

Evaluación geotécnica de la presa

La evaluación geotécnica de la presa de relaves Mahr Túnel se efectuó combinando técnicas avanzadas de monitoreo geotécnico con inspecciones visuales. Lo que permite una comprensión detallada de su estado y estabilidad de la presa, esencial para un análisis efectivo y la anticipación de posibles problemas.

Monitoreo geotécnico

La estrategia comienza con la planificación del monitoreo, descrita en la Tabla 23, donde se establece la frecuencia para cada tipo de instrumentación y tecnología de monitoreo geotécnico, asegurando así la recopilación sistemática y segura de datos.

Tabla 23

Frecuencia de monitoreo geotécnico

Tipo	Frecuencia de monitoreo
Piezómetro de tubo abierto o tipo Casagrande	1 hora
Piezómetro eléctrico de cuerda vibrante	1 hora
Inclinómetros	1 hora
Hitos topográficos	10 min
Radar	5 min
Imágenes satelitales InSAR	15 días
Acelerógrafos	Cada vez que pasa los 0.05g

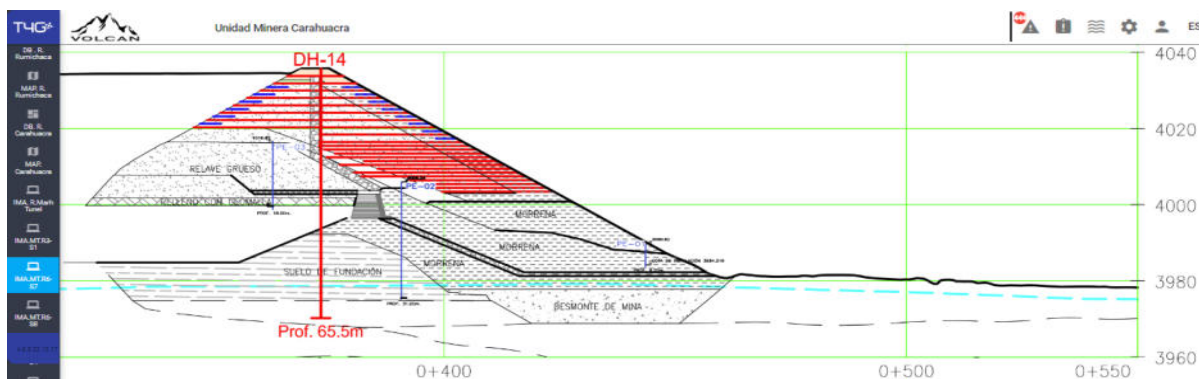
Nota. Elaboración propia.

Para la evaluación geotécnica, la plataforma T4G ofrece perfiles detallados del nivel piezométrico, como se muestra en la Figura 77, donde se brinda información crucial sobre la ubicación de los instrumentos geotécnicos y la variación de los niveles de agua subterránea en

distintas áreas de la presa, siendo esencial para la evaluación de la presión hidráulica y la adaptación de estrategias de drenaje y refuerzo estructural.

Figura 77

Perfil de la línea piezométrica de la relavera 6

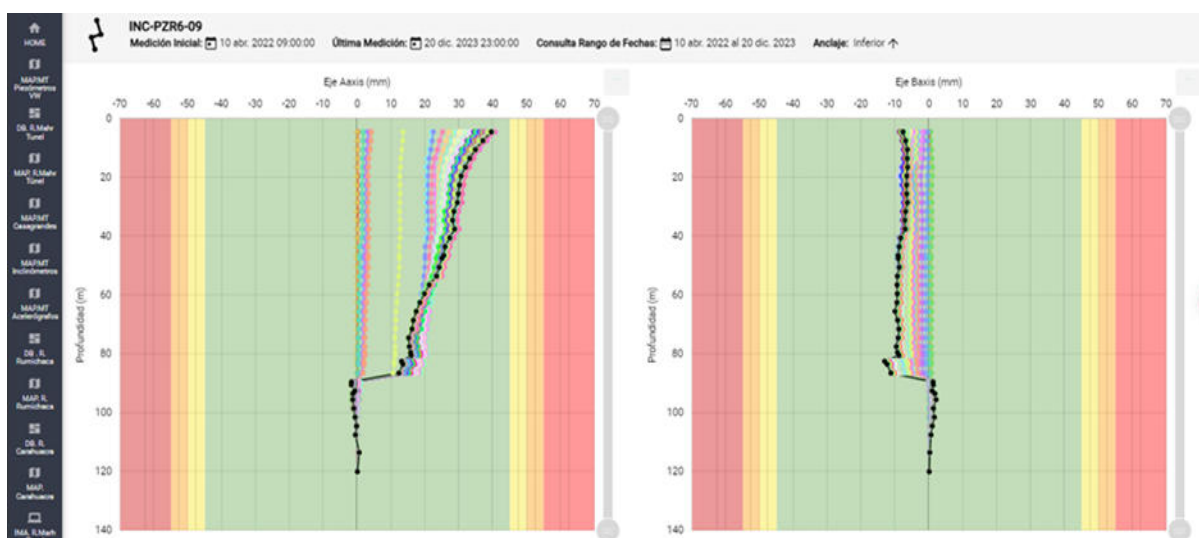


Nota. Elaboración propia.

En cuanto al control de las deformaciones internas, el T4G, muestra los reportes de los inclinómetros en tiempo real, tal como se visualiza en la Figura 78, cuyo caso los desplazamientos acumulados se mantienen dentro de rangos normales.

Figura 78

Monitoreo geotécnico de los inclinómetros

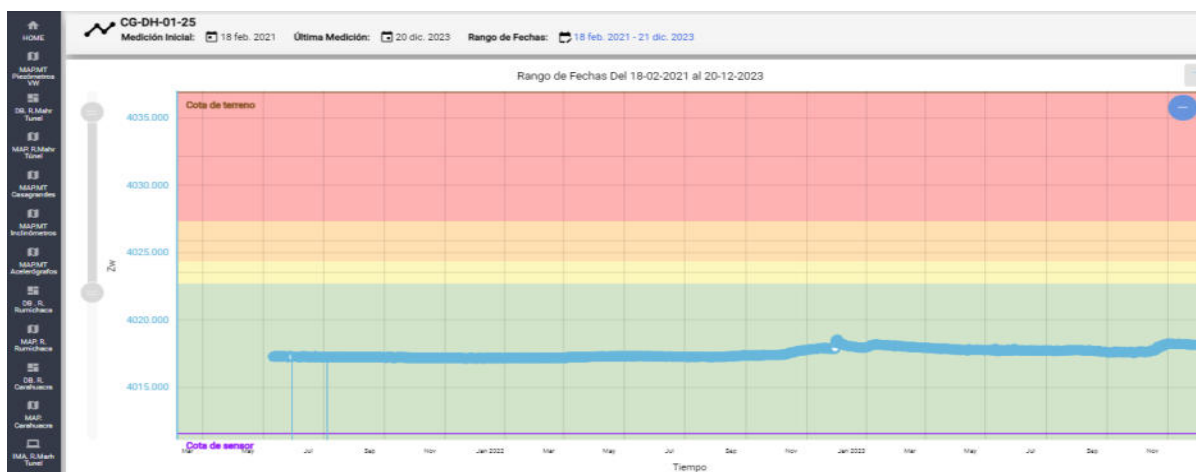


Nota. Elaboración propia.

Paralelamente, los niveles piezométricos se evalúan mediante el monitoreo de los piezómetros tipo casagrande y sensores de cuerda vibrante, cuyo reporte típico se presenta en la Figura 79, donde estos niveles también se encuentran dentro de un rango aceptable.

Figura 79

Monitoreo geotécnico de los piezómetros

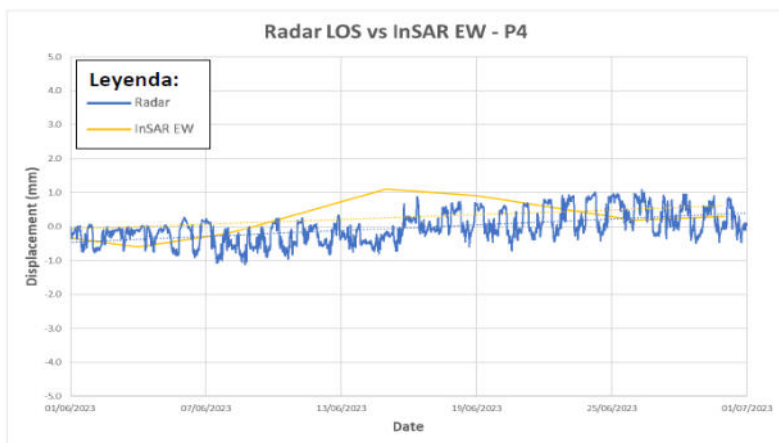


Nota. Elaboración propia.

Adicionalmente, se analiza la integración de datos del radar e imágenes satelitales InSAR, proporcionando una visión detallada de los movimientos superficiales, tal como se muestra en la Figura 80.

Figura 80

Integración de datos del radar vs InSAR



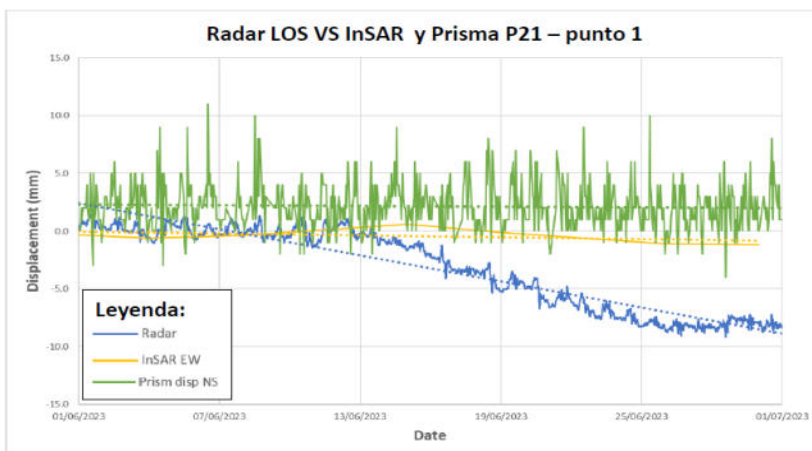
	Desplazamiento acumulado (mm)
Radar LOS	0.77*
InSAR Este-Oeste	0.84*

Nota. Elaboración propia.

Este análisis se complementa con la integración de datos de InSAR y la estación robótica, enfocado en comprender, correlacionar y corregir los datos para detectar deformaciones y movimientos del terreno a gran escala, como se ve en la Figura 81.

Figura 81

Integración de datos del radar vs InSAR vs estación robótica



Análisis de periodo: Desde 01/06/2023 hasta 30/06/2023



	Desplazamiento acumulado (mm)
Radar LOS	-10.92*
InSAR East-West	-0.91*
P21 disp NS	-0.34*

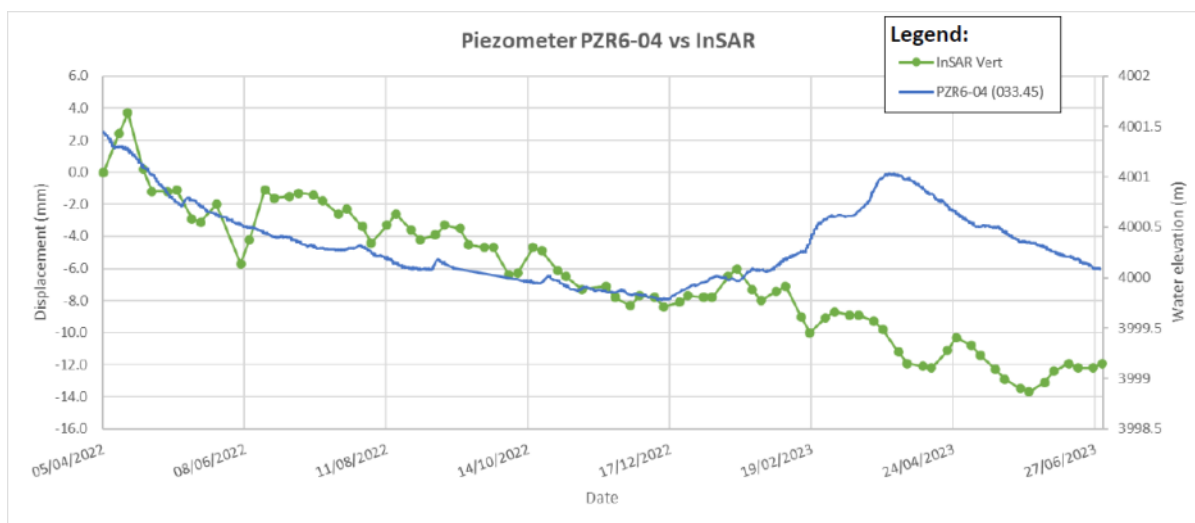
* Valor extrapolado para una tendencia lineal

Nota. Elaboración propia.

Finalmente, para complementar la evaluación se realizó un análisis de la integración de los datos del nivel piezométrico y las deformaciones monitoreadas por las imágenes satelitales InSAR, con la finalidad de identificar si la elevación o depresión del nivel piezométrico influye con las deformaciones que se podrían detectar en la presa.

Figura 82

Integración de datos del piezómetro vs InSAR



Nota. Elaboración propia.

Inspección de relaveras

Como parte de la evaluación geotécnica de la presa, se realizó una inspección técnica visual a lo largo del depósito de la relavera, cuyo tipo y frecuencia se muestra en la Tabla 24.

Tabla 24

Tipo de inspección y frecuencia

Tipo	Frecuencia	Alcance
Rutina	Semanal	Inspección en la cresta y taludes aguas bajo del dique, estribos, sistema de descarga de relaves, playa de relaves, laguna de operación, accesos, señalización, instrumentación geotécnica y sistema de drenaje.

Inspección trimestral	Trimestral	La condición general de la presa de relaves Mahr Túnel y sus estructuras debe ser observada a detalle por lo menos una vez cada tres meses.
Inspección formal	Anual	Los objetivos de la inspección formal son llevar a cabo una revisión detallada de las condiciones y operaciones de la presa de relaves, con la finalidad de brindar información para ser empleada en la revisión de los programas de operación, mantenimiento e inspecciones necesarias. Debe ejecutarse inmediatamente después de cualquier movimiento sísmico de intensidad moderada o fuerte en la cercanía de la mina, o deslizamiento, o deformación considerable en el talud de la presa sin la presencia de fuentes externas que haya podido ocasionarla, inmediatamente después de precipitaciones inusuales de gran intensidad inusual, e inmediatamente después de cualquier acto de sabotaje conocido o que se sospeche contra alguna instalación.
Inspección en condiciones inusuales	-	Debe ejecutarse inmediatamente después de cualquier movimiento sísmico de intensidad moderada o fuerte en la cercanía de la mina, o deslizamiento, o deformación considerable en el talud de la presa sin la presencia de fuentes externas que haya podido ocasionarla, inmediatamente después de precipitaciones inusuales de gran intensidad inusual, e inmediatamente después de cualquier acto de sabotaje conocido o que se sospeche contra alguna instalación.

Nota. Elaboración propia.

Para estas inspecciones, se utilizó formatos estándares, como se muestra en la Figura 83, lo que permite una recopilación de datos estandarizada y garantiza que todos los aspectos críticos se revisen en cada inspección.



Nota. Elaboración propia.

Las zonas inspeccionadas son todos los componentes de relaves, que incluye los depósitos de relaves 1, 2, 3, 4, 5 y 6, torre de decantación, aliviadero, canal de coronación 1 y 2, canal de aguas ácidas y sistema de tratamiento de agua de contacto (pozas de contingencia, recolección, emergencia, sedimentación 1, 2 y 3). En la Figura 85 y Figura 86 se presentan imágenes panorámicas de la relavera 3 y 6, tomadas por un dron.

Figura 85

Vista panorámica de la relavera 3, vuelo con dron



Nota. Elaboración propia.

Figura 86

Vista panorámica de la relavera 6, vuelo con dron



Nota. Elaboración propia.

Factibilidad técnica - operativa***Factibilidad técnica***

Para el desarrollo del proyecto en la presa de relaves Mahr Túnel, Volcán Compañía Minera S.A.A. conformó un equipo multidisciplinario compuesto por 1 superintendente de proyectos, 1 ingeniero de relaves, 2 ingenieros geotécnicos, 2 ingenieros de proyectos, 1 ingeniero estructural, 1 topógrafo, 1 personal administrativo, 2 especialistas en relaciones comunitarias y 2 personales de apoyo, como se muestra en la Figura 87. El autor contribuyó en el rol de ingeniero geotécnico junior, fue trabajar estrechamente con el ingeniero geotécnico senior, enfocándonos en dirigir, supervisar y coordinar las distintas etapas del proyecto.

Figura 87

Equipo de trabajo, proyectos de San Cristóbal - Carahuacra



Nota. Elaboración propia.

Además, se contó con el soporte del equipo de la empresa Explomin, encargados de las perforaciones bajo nuestra supervisión, y el apoyo del equipo del personal de la empresa SRK Consulting en la supervisión de la conformación de plataformas y asesoramiento en seguridad.

En el aspecto tecnológico y logístico, se asignaron recursos como laptops Workstation Lenovo y software especializado, incluyendo Excel para análisis de datos, Slide2 de Rocscience, Civil 3d y ArcGIS Map para modelamiento y T4G para monitoreo geotécnico.

También se obtuvieron equipos como sondas inclinométricas y piezométricas, lectores de cuerda vibrante, equipos de protección personal, y camionetas para el transporte, todos proporcionados por la empresa. En la Figura 88 se muestran los equipos para la lectura de data base y monitoreo geotécnico de la instrumentación geotécnica instalada.

Figura 88

Equipo de lectura de instrumentación geotécnica



Nota. Elaboración propia.

El proyecto tuvo un impacto significativo en la comunidad de Pachachaca, brindando empleo y utilizando maquinaria como excavadoras, volquetes y retroexcavadoras para la construcción de las plataformas de perforación, cuya colaboración es clave para el éxito del proyecto, logrando finalizar los trabajos sin contratiempos ambientales y manteniendo una relación positiva con la comunidad local.

Factibilidad operativa

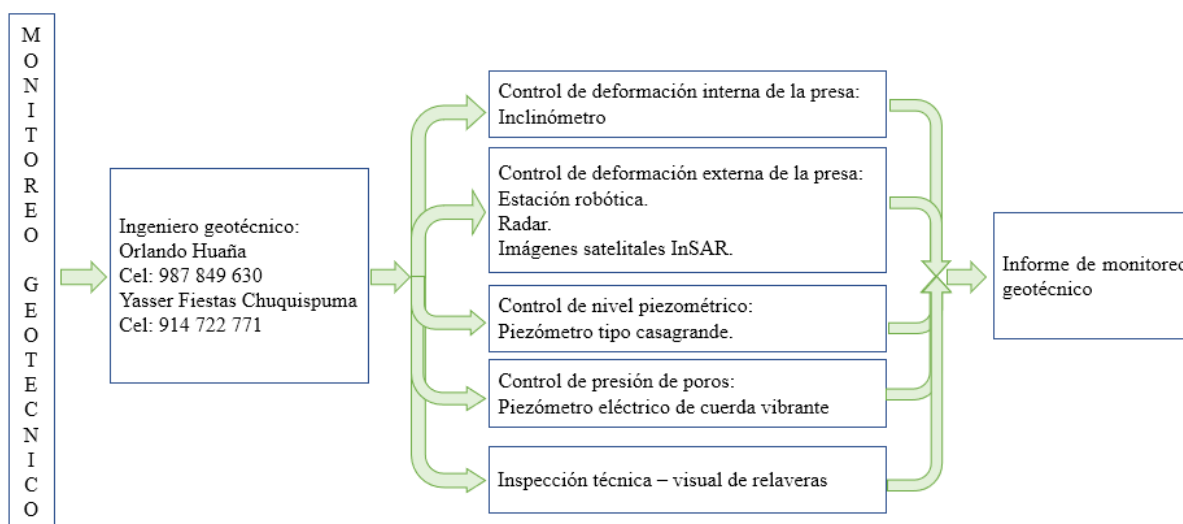
Para optimizar la instrumentación geotécnica en la presa Mahr Túnel, se inició con una evaluación detallada de las condiciones de los instrumentos geotécnicos existentes hasta 2020. Un proceso que destacó la necesidad de incorporar tecnologías avanzadas como imágenes satelitales

InSAR, estación robótica, radar y telemetría para mejorar la precisión en el monitoreo geotécnico y la interpretación de datos.

Con el objetivo de reforzar el control de estabilidad de la presa, se identificó y estableció puntos de control en zonas críticas, complementados por niveles de alerta, que son monitoreados continuamente por equipo de geotecnia. Este enfoque, detallado en la Figura 89, ha sido esencial para mantener una vigilancia constante y proactiva sobre la estabilidad de la presa, asegurando así una gestión más efectiva de los riesgos potenciales.

Figura 89

Esquema de monitoreo geotécnico de presa de relaves Mahr Túnel

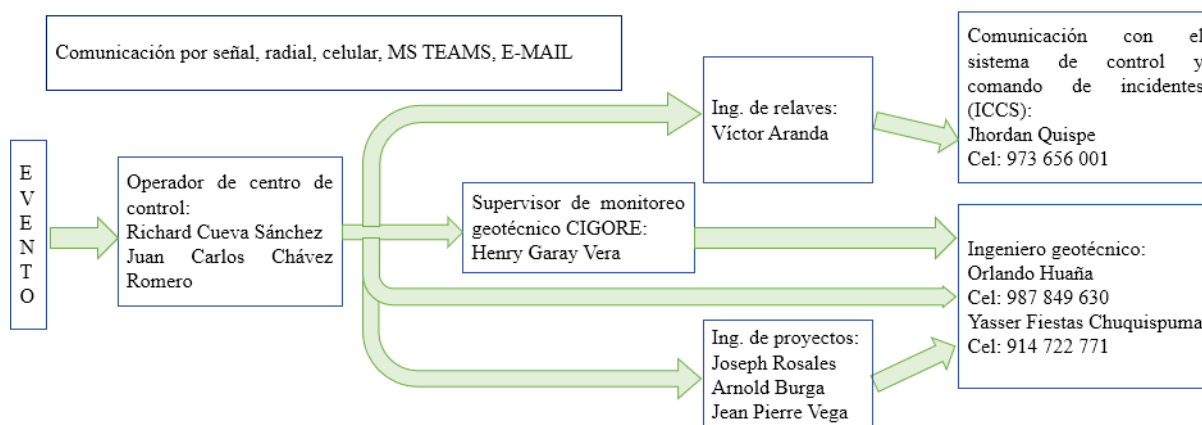


Nota. Elaboración propia.

Además, se ha desarrollado un protocolo de comunicación claro, ilustrado en la Figura 8790, que asegura una respuesta rápida y coordinada en situaciones críticas. Siendo de vital para manejar eficientemente cualquier incidente, garantizando una reacción ágil y adecuada ante eventos que requieran atención inmediata.

Figura 90

Flujo de comunicación del monitoreo de la presa de relaves ante un evento



Nota. Elaboración propia.

Con las tecnologías implementadas se obtuvieron los siguientes beneficios:

- Precisión del monitoreo: La integración de tecnologías como InSAR y radar, complementada por el uso de softwares avanzados, ha revolucionado el monitoreo y análisis de datos, proporcionando información para una mejor toma de decisiones.
- Análisis de datos: El procesamiento de los datos, el uso de software especializado, como T4G y Slide2 de Rocscience, ha facilitado la identificación de tendencias y patrones que podrían pasar desapercibidos con métodos tradicionales.
- Optimización de los recursos humanos: La automatización de procesos ha permitido al personal enfocarse en análisis y decisiones críticas, reduciendo la necesidad de realizar lecturas manuales frecuentes.
- Respuesta a emergencias: La mejora en los sistemas de alerta temprana y la capacidad de recibir datos en tiempo real han incrementado la capacidad de respuesta del equipo ante situaciones de emergencia, potencialmente salvando vidas.
- Sostenibilidad y compromiso comunitario: La adopción de tecnologías modernas demuestra un compromiso con prácticas responsables y la comunidad local.

Inversión

Para optimizar el monitoreo geotécnico de la presa de depósitos de relaves, se realizó una inversión total de \$2,309,551.41, como se muestra en la Tabla 25, garantizando así la efectividad y sostenibilidad de la presa a largo plazo.

Tabla 25

Resumen de inversión total

Ítem	Descripción	Unidad	Valor	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
1	Perforación e instrumentación geotécnica.	global	1	1 050 000.00	1 050 000.00
2	Suministro de materiales y equipos.	global	1	1 155 801.41	1 155 801.41
	Licencia de software, T4G.	global	1	26 500.00	26 500.00
3	Implementación de centro de control.	global	1	54 750.00	54 750.00
4	Mano de obra.	global	1	22 500.00	22 500.00
Total					2 309 551.41

Nota. Inversión total del proyecto (Volcan Compañía Minera S.A.A, 2022).

Las inversiones realizadas se han organizado en 5 categorías. La primera categoría, que incluía la campaña de perforación e instrumentación geotécnica, representa una inversión de \$1,050,000.00, como se detalla en la Tabla 26.

Tabla 26*Inversión de perforación e instrumentación geotécnica*

Ítem	Descripción	Unidad	Valor	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
1	Perforación	metros	1 250	500.00	750 000.00
2	Instrumentación geotécnica	metros	1 000	150.00	300 000.00
Total					1 050 000.00

Nota. Lista de inversión de la adquisición del software (Volcan Compañía Minera S.A.A, 2022).

Adicionalmente, se ha destinado una cantidad de \$1,155,801.41 para el alquiler de equipos tecnológicos avanzados y suministros necesarios para la automatización de los instrumentos geotécnicos, como se indica en la Tabla 27.

Tabla 27*Inversión de alquiler de equipos y suministro de instrumentación geotécnica*

Ítem	Descripción	Unidad	Valor	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
1	Alquiler e instalación del Radar.	mes	24	14 391.50	345 396.00
2	Alquiler de imágenes satelitales InSAR	mes	24	7 500.00	180 000.00
3	Suministro y puesta en funcionamiento de la estación robótica.	global	1	50 500.00	50 500.00
4	Suministro de equipos y materiales para la automatización de instrumentos geotécnicos, inclinómetro.	unidad	133	3 230.00	429 590.00
5	Suministro de equipos y materiales para la automatización de instrumentos geotécnicos, piezómetro de casagrande.	unidad	15	1 571.67	23 575.00
6	Suministro de equipos y materiales para la automatización de instrumentos	unidad	78	634.62	49 500.00

Ítem	Descripción	Unidad	Valor	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
	geotécnicos, sensores de cuerda vibrante.				
7	Suministro de instrumentación geotécnica de acelerógrafos.	unidad	3	20 580.00	61 740.00
8	Suministro y puesta en funcionamiento de estación acelerográfica y gateway.	global	1	15 500.00	15 500.00
Total					1 155 801.41

Nota. Lista de inversión de los suministros (Volcan Compañía Minera S.A.A, 2022).

Asimismo, la Tabla 28 muestra una inversión de \$26,500.00 en licencias de software, lo que refleja la importancia del análisis y procesamiento avanzado de datos para el proyecto.

Tabla 28

Inversión de licencia del software integrador de visualización

Ítem	Descripción	Unidad	Valor	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
1	Licencia software geotécnico integrador T4G versión Online.	global	1	13 000.00	13 000.00
2	Configuración, puesta en marcha del software y entrenamiento al personal.	global	1	4 500.00	4 500.00
3	Mantenimiento del Software. Incluye: - Actualización a última versión. - Depuración y limpieza de base de datos. - Revisión de Bugs.	anual	2	4 500.00	9 000.00
Total					26 500.00

Nota. Lista de inversión de la adquisición del software (Volcan Compañía Minera S.A.A, 2022).

Además, se contempló una inversión en mano de obra valorada en \$22,500.00 para llevar a cabo la instalación y automatización de los instrumentos geotécnicos, como se detalla en la Tabla 29.

Tabla 29

Inversión de mano de obra

Ítem	Descripción	Unidad	Valor	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
1	Trabajos de instalación y automatización de instrumentación geotécnica.	global	1	22 500.00	22 500.00
Total					22 500.00

Nota. Servicio de instalación y automatización de instrumentación geotécnica (Volcan Compañía Minera S.A.A, 2022).

Finalmente, la Tabla 30 detalla una inversión de \$54,750.00 en equipamiento para el centro de control, destacando un enfoque hacia un monitoreo centralizado y eficiente.

Tabla 30

Inversión de implementación de la sala de centro de control

Ítem	Descripción	Unidad	Valor	Precio unitario (\$)	Precio total (\$)
1	Acondicionamiento de la sala de control.	global	1	21 250.00	21 250.00
2	Monitor, marca Lenovo y modelo ThinkVision P24h-20.	unidad	1	6 500.00	6 500.00
3	PC Workstation, marca Lenovo y modelo P330 SFF.	unidad	6	4 500.00	27 000.00
Total					54 750.00

Nota. Lista de inversión de la implementación de la sala de centro de control (Volcan Compañía Minera S.A.A, 2022).

El continuo análisis, interpretación y evaluación del monitoreo geotécnico, así como la implementación y aplicación del plan de respuesta a emergencias, son liderados por la superintendencia del área de proyectos de la Unidad Minera San Cristóbal – Carahuacra, perteneciente a Volcán Compañía Minera S.A.A. El equipo de profesionales encargados de estas actividades forma parte de la planilla de la empresa, por lo que los costos asociados se consideran parte de los gastos operativos regulares de la unidad y no representan gastos adicionales para el proyecto.

Análisis de Resultados

Análisis costos - beneficio

Para mejorar la seguridad en la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel se reflejaron los resultados en la Tabla 31. Se realizó una inversión de \$2,309,551.41 en la modernización de la instrumentación geotécnica, mejorando así la detección temprana de anomalías, facilitando una respuesta rápida ante posibles riesgos y demostrando ser esencial para evitar incidentes mayores, traduciéndose en una reducción notable de los costos de mantenimiento y reparación.

Tabla 31

Costo y beneficio de la optimización de la instrumentación geotécnica

Descripción	Precio total (\$)	Beneficio
Perforación e instrumentación geotécnica, suministro de materiales y equipos, licencia de software T4G, implementación del centro de control y mano de obra.	2 309 551.41	Mejora en la seguridad, permitiendo la detección temprana de riesgos y la mitigación de problemas antes de que se vuelvan críticos, ahorrando costos por daños y reparaciones.

Nota. Elaboración propia.

Con el objetivo de aumentar la precisión, identificación de áreas críticas, asegurar una monitorización continua y detallada de la estructura de la presa. Se realizó una inversión de \$1,050,000.00 en perforación e instrumentación geotécnica, como detalla la Tabla 32.

Tabla 32

Costo y beneficio de la perforación e instrumentación geotécnica

Descripción	Precio total (\$)	Beneficio
Perforación e instrumentación geotécnica	1 050 000.00	Aumentar la precisión en la identificación de áreas problemáticas, asegurar una monitorización continua y detallada de la estructura de la presa.

Nota. Elaboración propia.

Focalizándose en la precisión de los datos geotécnicos, con una inversión de \$1,155,801.41 en el alquiler y suministro de instrumentos avanzados, se han logrado recopilar datos más precisos y fiables sobre las condiciones del terreno y la presa, un aspecto crucial para la toma de decisiones y la prevención de desastres, tal como se muestra en la Tabla 33.

Tabla 33

Costo y beneficio del alquiler y suministro de instrumentos geotécnicos

Descripción	Precio total (\$)	Beneficio
Alquiler del Radar, imágenes satelitales InSAR. Suministro de la estación robótica, instrumentación geotécnica de inclinómetro, piezómetro de casagrande, piezómetro de cuerda vibrante, acelerógrafos y puesta en funcionamiento de estación acelerográfica y gateway.	1 155 801.41	Mejora de la precisión en la recopilación de datos geotécnicos y la telemetría, llevando a una optimización de recursos y diseño más eficiente de la presa.

Nota. Elaboración propia.

Con el propósito de optimizar la gestión y el análisis de datos, se destinaron \$26,500.00 a la adquisición del software geotécnico integrador T4G. Este software, como se ilustra en la Tabla 34, facilita un análisis más detallado y en tiempo real de las condiciones geotécnicas, lo que permite una mejor adaptación y respuesta ante cambios o anomalías.

Tabla 34*Costo y beneficio de la adquisición de software*

Descripción	Precio total (\$)	Beneficio
Licencia software geotécnico integrador T4G versión Online. Configuración, puesta en marcha del software y entrenamiento al personal.	26 500.00	Cumplimiento con regulaciones y estándares geotécnicos, evitando multas y reforzando la reputación y confianza entre inversores y reguladores.

Nota. Elaboración propia.

Para garantizar una implementación y mantenimiento óptimos de la instrumentación geotécnica, se destinaron \$22,500.00 a la contratación de mano de obra especializada. Como se refleja en la Tabla 35 , este enfoque ha mejorado la eficiencia operativa y la fiabilidad de los sistemas, asegurando una gestión más efectiva y una mayor seguridad a largo plazo.

Tabla 35*Costo y beneficio de la mano de obra*

Descripción	Precio total (\$)	Beneficio
Trabajos de instalación y automatización de instrumentación geotécnica.	22 500.00	Mayor eficiencia operativa a través de un conocimiento mejorado de la estructura de la presa, resultando en una gestión más efectiva.

Nota. Elaboración propia.

Para centralizar las operaciones de monitoreo y gestión de la presa, se realizó una inversión de \$54,750.00 en la implementación de una sala de centro de control, tal como se detalla en la Tabla 36. Esta centralización mejora la coordinación entre los diferentes sistemas de monitoreo y eleva la capacidad de respuesta en situaciones de emergencia.

Tabla 36*Costo y beneficio de la implementación de la sala de centro de control*

Descripción	Precio total (\$)	Beneficio
Acondicionamiento de la sala de control. Monitor, marca Lenovo y modelo ThinkVision P24h-20. PC Workstation, marca Lenovo y modelo P330 SFF.	54 750.00	Preparación mejorada para la coordinación entre los diferentes sistemas de monitoreo, elevar la capacidad de respuesta a emergencias y contribución a la sostenibilidad ambiental, previniendo desbordamientos y filtraciones.

Nota. Elaboración propia.

Beneficios de la implementación

La optimización del monitoreo geotécnico en la presa de relaves Mahr Túnel, como se detalla en la Tabla 37, ha llevado a una significativa reducción en la frecuencia de monitoreo. Tales como, la monitorización del nivel piezométrico y la presión de poros ha disminuido en un 99.40%, mejorando la detección y respuesta rápida ante posibles inestabilidades o riesgos geotécnicos. Además, la reducción en las deformaciones internas alcanza el 99.86% y en las externas, el 99.95%. La implementación de la monitorización de aceleraciones, con una mejora del 100% respecto a la ausencia previa de este tipo de monitoreo, ha reforzado la capacidad de seguimiento en tiempo casi real, aumentando así la seguridad y estabilidad de la presa.

Tabla 37*Análisis comparativo de la frecuencia de monitoreo, antes vs después*

Tipo	Frecuencia de monitoreo		Disminución de la frecuencia
	Antes	Después	
Nivel piezométrico	7 días	1 hora	99.40%
Presión de poros	7 días	1 hora	99.40%

Deformaciones internas	1 mes	1 hora	99.86%
Deformaciones externas	15 días	10 min	99.95%
Aceleraciones	No tiene	Cada vez que pasa los 0.05g	100.00%

Nota. Elaboración propia.

Las campañas de perforaciones e instrumentación geotécnica en la presa de relaves Mahr Túnel, reflejadas en la Tabla 38, han permitido una expansión en la cantidad y diversidad de los instrumentos utilizados. Este aumento ha llevado a un incremento del 485.71% en piezómetros tipo casagrande, mejorando el monitoreo del nivel del agua y la detección de filtraciones; los piezómetros eléctricos de cuerda vibrante han experimentado un aumento del 183.33%, reforzando la precisión en la medición de la presión del agua en los poros del suelo. Además, con un aumento del 1040.00% en hitos topográficos, la capacidad de monitorear movimientos y deformaciones superficiales se ha ampliado significativamente. Los incrementos en inclinómetros y acelerógrafos han mejorado la medición de movimientos internos y la detección de vibraciones y terremotos. La introducción de radar y el uso de imágenes satelitales InSAR, con un aumento del 100.00%, han fortalecido el monitoreo remoto y la observación detallada de cambios en la presa.

Tabla 38

Análisis comparativo de la cantidad de instrumentación, antes vs después

Tipo	Cantidad		Aumento de cantidad
	Antes	Después	
Piezómetro de tubo abierto o tipo Casagrande.	7	34	485.71%
Piezómetro eléctrico de cuerda vibrante	12	22	183.33%
Hito topográfico, lecturas manuales y mediante la estación robótica.	5	52	1 040.00%

Inclinómetro.	0	9	900.00%
Acelerógrafo.	0	3	300.00%
Radar.	0	1	100.00%
Imágenes satelitales InSAR.	0	1	100.00%

Nota. Elaboración propia.

La evaluación del sistema de monitoreo geotécnico existente en la presa, ilustrada en la Tabla 39, ha sido esencial para identificar deficiencias y establecer áreas clave que necesitaban optimización. Este análisis ha revelado aspectos críticos como la frecuencia insuficiente y la limitada cobertura de las mediciones geotécnicas. El descubrimiento de estas áreas claves proporciona una base sólida para futuras mejoras, marcando el inicio de un proceso de implementación de tecnologías más avanzadas y sistemas de telemetría sofisticados.

Tabla 39

Deficiencias y áreas claves para ser optimizados antes de la optimización

Descripción	Detalle
Deficiencias de la instrumentación geotécnica.	Monitoreo esporádico e ineficaz, incapaz de detectar cambios sutiles y críticos. Ausencia de un sistema de análisis integrado y proactivo para los datos recopilados. Falta de mecanismos de alerta temprana y respuesta automática.
Áreas claves para ser optimizadas.	Zonas críticas de la presa requieren monitoreo mejorado y más frecuente. Integración de instrumentación avanzada y tecnologías de telemetría en sectores específicos. Implementación de exploración geotécnica avanzada para datos precisos. Automatización y sistemas de monitoreo centralizado en regiones clave.

Nota. Elaboración propia.

La integración de tecnologías avanzadas y nuevos instrumentos geotécnicos en la presa, destacada en la Tabla 40, ha sido fundamental para aumentar la precisión, eficacia y cobertura del monitoreo; esta iniciativa ha llevado a avances significativos, mejorando la calidad y la fiabilidad de los datos recopilados. La adopción de instrumentación de última generación, combinada con tecnologías de punta, ha permitido mediciones más precisas y detalladas, lo que mejora la confiabilidad de la información y la toma de decisiones; además, la incorporación de sistemas de telemetría ha facilitado un monitoreo continuo y en tiempo real, un cambio cualitativo en la capacidad de respuesta y la eficiencia operativa. Esta expansión en la cobertura del monitoreo permite una supervisión más exhaustiva de las condiciones geotécnicas, mejorando la capacidad de detectar y prevenir riesgos potenciales; en conjunto, la precisión mejorada, la eficiencia operativa y la cobertura ampliada han jugado un papel crucial en el fortalecimiento de la seguridad y estabilidad de la presa.

Tabla 40

Mejoras en la precisión, eficacia y cobertura del monitoreo geotécnico

Descripción	Mejoras
Precisión	Implementación de sensores de alta tecnología para mediciones precisas. Calibración y validación de datos con algoritmos avanzados.
Eficiencia	Procesos de recopilación y análisis de datos completamente automatizados. Sistemas de alerta temprana y respuesta proactiva.
Cobertura	Ampliación de la red de monitoreo a todas las áreas críticas. Monitoreo remoto con drones y satélites para áreas inaccesibles.

Nota. Elaboración propia.

El establecimiento de niveles de alerta y un sistema de monitoreo geotécnico centralizado, como se enfoca en la Tabla 41, ha marcado un avance en la eficiencia operativa y la capacidad

para detectar riesgos con antelación. Este sistema centralizado, al permitir la integración y análisis de los datos en tiempo real, ha reforzado la rapidez y eficacia en la respuesta ante situaciones potencialmente peligrosas. Al mismo tiempo, la creación de niveles de alerta específicos ha facilitado la toma de medidas proactivas y bien informadas por parte del personal, contribuyendo de manera crucial a la reducción de posibles incidentes y al fortalecimiento de la seguridad y estabilidad de la infraestructura.

Tabla 41

Mejoras en la eficiencia operativa y detección temprana de riesgos

Descripción	Mejoras
Eficiencia operativa	Implementación de un sistema centralizado para una gestión integrada. Uso de inteligencia artificial para la optimización de procesos operativos.
Detección temprana de riesgos	Modelos predictivos avanzados para identificar riesgos potenciales. Incremento en la capacidad de monitoreo proactivo para prevenir incidentes.

Nota. Elaboración propia

El desarrollo de estrategias de respuesta a emergencias en la presa de relaves Mahr Túnel, una tarea clave reflejada en la Tabla 42 , ha incluido la creación de protocolos detallados que se basan en análisis geotécnicos y de datos. Estos protocolos están diseñados para mejorar significativamente la preparación y la capacidad de reacción del equipo ante situaciones críticas. La implementación de planes de emergencia, apoyada por una capacitación exhaustiva del personal y la realización regular de simulacros, no solo ha mejorado la eficacia en la gestión de situaciones adversas, sino que también ha reforzado la seguridad y protección de la infraestructura y las comunidades cercanas.

Tabla 42*Mejoras en el control de estabilidad de la presa*

Descripción	Mejoras
	Desarrollo de protocolos de emergencia basados en simulaciones computarizadas y escenarios de riesgo.
Control de estabilidad de la presa	Implementación de un sistema eficaz de comunicación para la coordinación durante emergencias.
	Entrenamiento intensivo en gestión de crisis, mejorando la capacidad de respuesta del equipo.

Nota. Elaboración propia

Estos esfuerzos coordinados para desarrollar e implementar estrategias de emergencia han resultado en una capacidad mejorada para responder rápida y efectivamente en momentos críticos, aumentando así la resiliencia de la presa frente a potenciales riesgos geotécnicos y fortaleciendo la seguridad global.

Aportes más destacables a la institución

La optimización del monitoreo geotécnico en la presa de relaves Mahr Túnel, mediante la instrumentación y el monitoreo geotécnico avanzado, ha representado un salto cualitativo para el equipo del área de proyectos de la unidad minera de San Cristóbal - Carahuacra en Volcan Compañía Minera S.A.A. Esta iniciativa ha ido más allá de las mejoras técnicas y ha dado lugar a una evolución cultural, creando un entorno en el que la innovación, la seguridad y la sostenibilidad se han convertido en pilares de la operación diaria, fomentando un ambiente de trabajo que valora la diversidad de perspectivas y promueve la autenticidad.

El proyecto ha redefinido la cultura organizativa, creando un entorno de trabajo donde el bienestar, la conexión y la contribución de cada empleado son esenciales, fomentando una cultura en la que los empleados se sienten valorados y respetados. Las perspectivas se consideran importantes y se les anima a ser auténticos y a compartir sus ideas. Este enfoque ha reforzado el sentido de pertenencia e incentivado a los empleados a alinearse con los objetivos corporativos, resaltando la importancia de cada contribución individual.

Los líderes del área de proyectos han desempeñado un papel crucial en este cambio, adoptando comportamientos que refuerzan la equidad y el respeto, inspirando a sus equipos a trabajar con mayor autonomía y con un enfoque colaborativo basado en datos, con ello, fortaleciendo la cohesión y la productividad de los trabajadores.

Las relaciones interpersonales dentro del equipo del área de proyectos han experimentado una transformación positiva, creando un entorno de trabajo caracterizado por la seguridad psicológica y la confianza mutua que fomenta una colaboración eficaz.

Gracias a la aplicación de tecnología avanzada de monitoreo geotécnico, la seguridad y la eficacia operativas en la presa han alcanzado nuevos estándares y el equipo del proyecto ha

experimentado un importante desarrollo profesional, con una formación que ha mejorado sus capacidades de gestión de riesgos y ha garantizado unas operaciones más seguras.

Conclusiones

Se determinó cómo la instrumentación y el monitoreo geotécnico avanzado optimizaron el control de estabilidad de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel. Según (Vick, 1990), los sistemas de monitoreo geotécnico avanzados mejoran la capacidad para monitorear estructuras complejas como las presas de relaves, a una escala mucho mayor y con mayor resolución. Además, Cerda (2022) señala que la integración de tecnologías tanto tradicionales como modernas en la instrumentación y el monitoreo geotécnico de depósitos de relaves proporciona una comprensión más profunda del estado del depósito, facilitando así la toma de decisiones basadas en información detallada. En consecuencia, se concluye que la implementación de estas tecnologías avanzadas ha sido fundamental para aumentar la precisión en la detección y manejo de riesgos, reforzando de manera significativa la seguridad y estabilidad de la presa, evidenciándose en la inversión de \$2,309,551.41 para la modernización, que resultó en una reducción considerable de la frecuencia de monitoreo del nivel piezométrico y la presión de poros, alcanzando un 99.40%, y una disminución en las deformaciones internas y externas de 99.86% y 99.95% respectivamente. Adicionalmente, la inclusión del monitoreo de aceleraciones, anteriormente no implementado, ha incrementado en un 100% la eficacia para detectar cambios y anomalías, mejorando considerablemente la capacidad de seguimiento en tiempo real y fortaleciendo la gestión integral de la presa.

El análisis del sistema de monitoreo geotécnico existente fue fundamental porque permitió identificar deficiencias y áreas clave que necesitaban mejoras para optimizar el control de estabilidad de la presa de depósito de relaves Mahr Túnel. De acuerdo con ASCE (2018), una comprensión detallada de los datos históricos y actuales, son fundamentales para detectar variaciones significativas en las condiciones geotécnicas, llevando potencialmente a avances

sustanciales en la gestión y el control de riesgos. En la misma línea, Adamo et al. (2020) resalta la importancia de identificar las zonas más propensas a deslizarse para ubicar los instrumentos geotécnicos. En conclusión, el análisis centrado en los registros históricos de los piezómetros e hitos topográficos reveló variaciones significativas en la frecuencia de los datos y presenta desafíos notables en la interpretación de las condiciones geotécnicas, especialmente marcados por discrepancias entre los niveles piezométricos y los datos de precipitación, además de retrasos en la respuesta de los instrumentos. Estos hallazgos subrayan deficiencias en la cobertura del monitoreo en áreas de la presa con densidad insuficiente de instrumentos, resaltando la necesidad de mejoras en la correlación de datos y en la capacidad de respuesta bajo condiciones extremas. La implementación de tecnologías avanzadas y sistemas de monitoreo más sofisticados, que han mejorado la calidad y fiabilidad de los datos recopilados. Se ha vuelto crucial para la toma de decisiones efectiva y para asegurar la estabilidad y seguridad a largo plazo de la presa.

Se determinó que, la integración de tecnologías avanzadas de monitoreo geotécnico, la instalación de nuevos instrumentos geotécnicos y la adaptación a telemetría fueron clave para incrementar la precisión, eficacia y cobertura del monitoreo geotécnico de la presa de depósitos de relave Mahr Túnel. Las directrices de ANCOLD (2012) enfatizan la importancia de un monitoreo geotécnico eficiente y la adopción de tecnologías avanzadas, lo que indica los beneficios potenciales de adoptar un enfoque más integrado y tecnológicamente avanzado en el monitoreo de presas. Del mismo modo, Adamo et al. (2020) subrayan que la implementación de instrumentación avanzada en presas es crucial para garantizar su estabilidad y seguridad, lo que sugiere la necesidad de sistemas de monitoreo más sofisticados y precisos para abordar los desafíos geotécnicos complejos. En conclusión, esta integración resultó en una mejora sustancial en la calidad y fiabilidad de los datos recopilados. La inversión total de las perforaciones e instrumentación

geotécnica, suministro de materiales y equipos, licencia de software T4G y la mano de obra, abarcó el 97.63% del costo total del proyecto total con un valor de \$2,254,801.41. La utilización de tecnologías como el radar e imágenes satelitales InSAR, junto con la implementación de sensores de alta tecnología y sistemas de telemetría, facilitó un monitoreo continuo y en tiempo real. Este cambio en la capacidad de respuesta y la eficiencia operativa permitió una supervisión más exhaustiva de las condiciones geotécnicas y mejoró la capacidad para detectar y prevenir riesgos potenciales, desempeñando un papel crucial en el fortalecimiento de la seguridad y estabilidad de la presa.

Se cree que, el establecimiento de niveles de alerta y la integración de un sistema de monitoreo geotécnico centralizado fueron fundamentales para mejorar la eficiencia operativa y permitir una detección temprana de riesgos en la presa de relaves Mahr Túnel. La investigación de Fell et al. (2018) resalta la importancia de sistemas de monitoreo avanzados y centralizados en la gestión eficiente de riesgos en presas, sugiriendo que la centralización del monitoreo y el establecimiento de sistemas de alerta son críticos para mejorar la capacidad de respuesta y la gestión de riesgos. Cerda (2022) en su propuesta de monitoreo geotécnico avanzado para depósitos de relaves subraya la necesidad de adoptar tecnologías avanzadas y centralización en el monitoreo para una detección temprana efectiva de riesgos y una gestión eficiente de emergencias. El mismo, cita que la implementación es crucial para aumentar la eficiencia operativa y la capacidad de respuesta ante situaciones de riesgo. En consecuencia, se concluye que estas mejoras, que implican una inversión de \$54,750.00 en la creación de una sala de centro de control, desempeñaron un papel crucial en la coordinación efectiva de los diversos sistemas de monitoreo. Asimismo, elevó significativamente la capacidad de respuesta ante situaciones de emergencia. La implementación de este sistema centralizado permitió una integración y análisis eficiente de datos en tiempo real

que permitió una mejora notablemente de la rapidez y efectividad en la respuesta a situaciones potenciales de riesgo. Además, la creación de niveles de alerta específicos optimizó la toma de decisiones proactivas del personal- También, contribuyó esencialmente a la reducción de incidentes y al fortalecimiento de la seguridad y estabilidad de la infraestructura.

Se estableció que, la implementación de estrategias de respuesta a emergencia, apoyadas en la evaluación geotécnica y análisis de datos, resultó en un fortalecimiento significativo del control de estabilidad de la presa de relaves Mahr Túnel. De acuerdo con Lynch y Loh (2006), destacan la importancia de sistemas de monitoreo avanzados y proactivos para responder eficazmente a emergencias en infraestructuras críticas como las presas. Sugiriendo que, una estrategia de respuesta bien fundamentada que integre análisis geotécnicos y datos de monitoreo, es crucial para garantizar la seguridad y estabilidad de las presas. La investigación de Uriarte et al. (2021) sobre la automatización de sistemas de monitoreo sísmico para estructuras geotécnicas respalda la idea de que el desarrollo de protocolos de emergencia detallados, que incluyan evaluaciones geotécnicas rigurosas, es fundamental para mejorar la capacidad de reacción ante situaciones críticas, respaldando la efectividad de un enfoque integrado y bien planificado en la gestión de emergencias. En consecuencia, se concluye que el desarrollo de estos protocolos de emergencia detallados, basados en análisis geotécnicos rigurosos, mejoró significativamente la capacidad de respuesta del equipo ante situaciones críticas. El continuo análisis y evaluación del monitoreo geotécnico, liderado por la superintendencia del área de proyectos de la Unidad Minera San Cristóbal – Carahuacra, parte de Volcan Compañía Minera S.A.A., aseguró que estas actividades se incorporarán a los gastos operativos regulares sin incurrir en costos adicionales para el proyecto. La capacitación constante del personal y la realización de simulacros regulares aumentan la eficacia en la gestión de emergencias. También fortalecen la seguridad de la

infraestructura y las comunidades cercanas, contribuyendo significativamente a aumentar la resiliencia de la presa ante riesgos potenciales y mejorando de manera integral la seguridad del proyecto.

Recomendaciones

Para mejorar la optimización del control de estabilidad de la presa de depósitos de relaves Mahr Túnel, se recomienda implementar tecnologías de vanguardia, como el Building Information Modeling y sistemas de Inteligencia Artificial, que permitirán una gestión eficaz de los datos y un análisis predictivo en tiempo real. El mismo proporciona una visión más completa de la estabilidad de la presa. Además, puede explorarse la aplicación del Internet de las Cosas (IoT) para desarrollar sensores avanzados que monitorizan continuamente las condiciones geotécnicas críticas de la presa, facilitando así una toma de decisiones precisa y rápida en escenarios de alto riesgo.

Para mejorar la identificación de deficiencias y áreas clave en el control de estabilidad, se sugiere realizar ensayos geotécnicos avanzados, como la prueba de veleta, recuperación de muestra mediante el tubo shelby, penetración estática, ensayos de carga dinámica, análisis de imágenes de alta resolución, ensayos geofísicos y ensayos SCPTu. Además, se puede utilizar software avanzado de análisis de datos, como Power BI, para identificar patrones y tendencias que puedan indicar posibles problemas con la presa.

Para incrementar la precisión, eficacia y cobertura del monitoreo geotécnico de la presa de depósitos de relave Mahr Túnel, se sugiere implementar un sistema de alerta temprana basado en el análisis de Big Data, que integre los datos geotécnicos con información meteorológica y climática, así como registros históricos de sucesos sísmicos en la región. Esto permitiría identificar patrones y correlaciones significativos entre estos conjuntos de datos, permitiendo una predicción y anticipación más precisas de los riesgos geotécnicos, mejorando así la capacidad de respuesta y reduciendo el riesgo de incidentes en la presa.

Para mejorar la eficiencia operativa y lograr una detección temprana de riesgos en la presa de relaves Mahr Túnel, es recomendable integrar en el centro de control tecnologías de Inteligencia

Artificial y Machine Learning. Esto permitirá supervisar y analizar los datos en tiempo real, facilitando la toma inmediata de decisiones en caso de situaciones de riesgo.

Para fortalecer más el control de la estabilidad de la presa, se recomienda implantar un sistema de alerta temprana basado en Inteligencia Artificial y Aprendizaje Automático, para predecir riesgos potenciales y tomar medidas preventivas proactivas mediante el análisis de datos geotécnicos en tiempo real. Adicionalmente, se sugiere explorar la posibilidad de utilizar vehículos no tripulados (drones) equipados con sensores para realizar inspecciones periódicas de la presa y obtener datos precisos sobre su estado.

Referencias

- Adamo, N., Al-Ansari, N., Sissakian, V., Laue, J., & Knutsson, S. (2020). Dam Safety: Use of Instrumentation in Dams. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 145–202. <https://doi.org/10.47260/jesge/1115>
- Adamo, N., Nadhir Al-Ansari, N. A.-A., Sissakian, V., Laue, J., & Knutsson, S. (2020). Dam Safety: Use of Seismic Monitoring Instrumentation in Dams. *Journal of Earth Sciences and Geotechnical Engineering*, 203–247. <https://doi.org/10.47260/jesge/1116>
- Alva Hurtado, J., & Escalaya Advíncula, M. (2011). Instrumentación geotécnica de la presa Pillones. *2011 Pan-Am CHS geotechnical conference*. <https://www.yumpu.com/es/document/read/33542562/instrumentacion-geotecnica-de-la-presa-pillones-peru>
- ANCOLD. (2012). *Guidelines on Tailings Dams - Planning, Design, Construction, Operation and Closure - May 2012*. Australian National Committee on Large Dams Incorporated.
- ASCE. (2018). Monitoring Dam Performance. *Monitoring Dam Performance: Instrumentation and Measurements*, 1–442. <https://doi.org/10.1061/9780784414828>
- Cerda Salazar, V. I. (2022). *Propuesta de monitoreo geotécnico avanzado para depósitos de relaves* [Universidad de Chile]. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188813>
- Choquet, P., McCaedle, A., Mwape, F., & Jacquot, B. (2022). Tecnologías de vanguardia para el monitoreo de presas de agua y presas de relaves. *10° Congreso argentino de presas y aprovechamientos multipropósito*. <https://www.researchgate.net/publication/365659050>
- Clarkson, L., & Williams, D. (2021). Catalogue of real-time instrumentation and monitoring techniques for tailings dams. *Mining Technology: Transactions of the Institute of Mining and Metallurgy*, 130(1), 52–59. <https://doi.org/10.1080/25726668.2021.1874094>

- Colomina, I., & Molina, P. (2014). Unmanned aerial systems for photogrammetry and remote sensing: A review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 92, 79–97. <https://doi.org/10.1016/J.ISPRSJPRS.2014.02.013>
- Duncan, J. M. (1996). Soil slope stability analysis. *Landslides Investigation and Mitigation; Transportation Research Board, Special Report 247, December*, 129–177. <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/sr/sr247/sr247-013.pdf>
- Duncan, J. M., Wright, S. G., & Brandon, T. L. (2014). Soil strength and slope stability. *John Wiley & Sons*, 336. <https://www.wiley.com/en-us/Soil+Strength+and+Slope+Stability%2C+2nd+Edition-p-9781118651650>
- Dunnicliff, J. (1988). *Geotechnical instrumentation for monitoring field performance*.
- Engel, P., & Schweimler, B. (2016). Design and implementation of a modern automatic deformation monitoring system: Towards an open source software platform for geodetical and geotechnical measurements. *Journal of Applied Geodesy*, 10(1), 79–85. <https://doi.org/10.1515/JAG-2015-0024/MACHINEREADABLECITATION/RIS>
- Fell, R., MacGregor, P., Stapledon, P., Bell, G., & Foster, M. (2018). *Geotechnical Engineering of Embankment Dams*. CRC Press. <https://www.routledge.com/Geotechnical-Engineering-of-Dams/Fell-MacGregor-Stapledon-Bell-Foster/p/book/9781138749344>
- Fourie, A. B., & Papageorgiou, G. (2001). Defining an appropriate steady state line for Merriespruit gold tailings. *Canadian Geotechnical Journal*, 38(4), 695–706. <https://doi.org/10.1139/t00-111>
- Gabriel, A. K., Goldstein, R. M., & Zebker, H. A. (1989). Mapping small elevation changes over large areas: Differential radar interferometry. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B7), 9183–9191. <https://doi.org/10.1029/JB094IB07P09183>

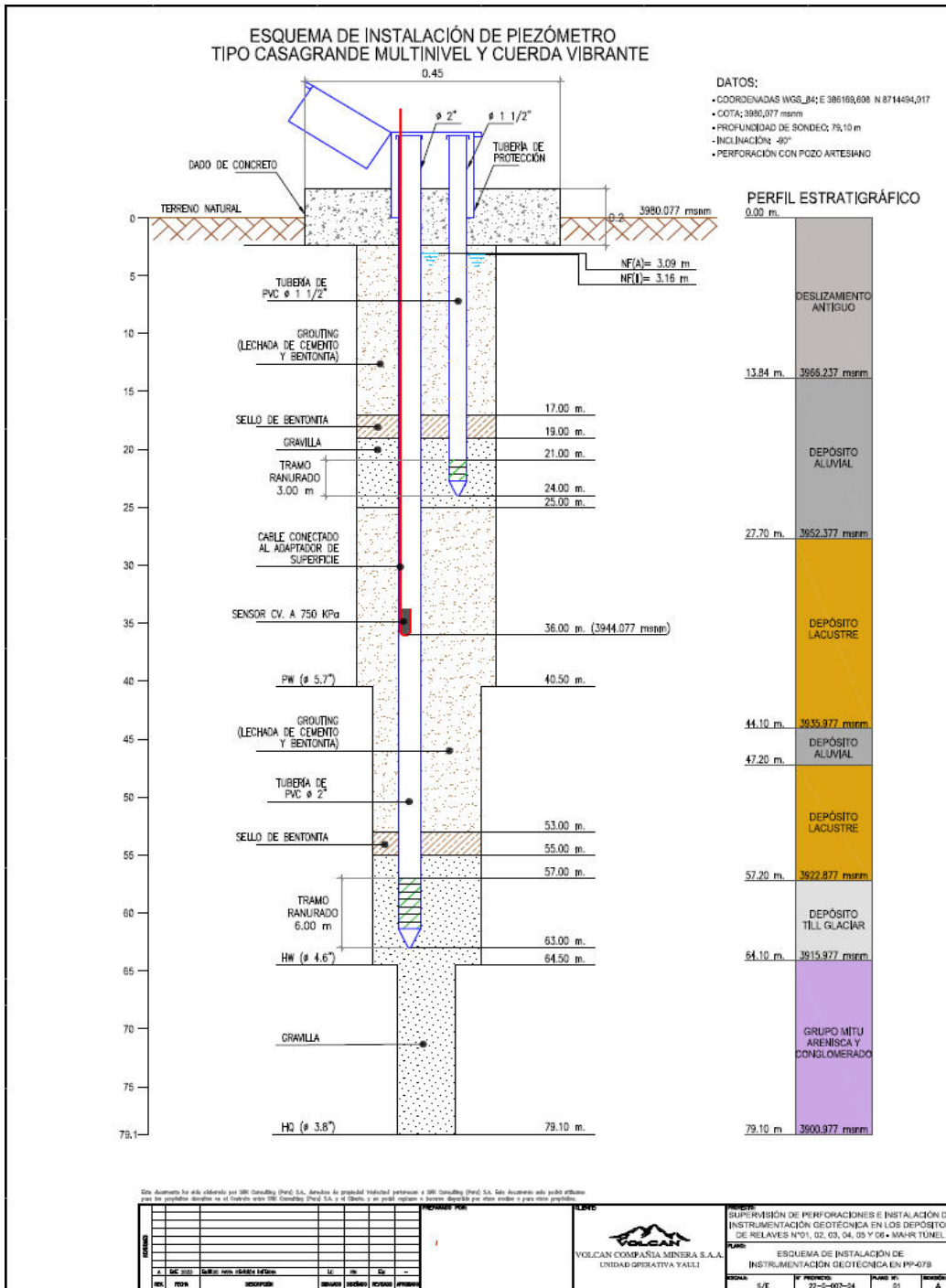
- Ghilani, C. D., & Wolf, P. R. (2012). *Elementary surveying: An introduction to geomatics*. Pearson Prentice Hall.
https://www.academia.edu/44698915/Charles_D_Ghilani_Paul_R_Wolf_Elementary_Surv_BookFi_org_pdf
- Hendry, M. T., Chalcraft, D., Zaidi, H., & Iqbal, J. (2019). Instrumentation data review and long-term trends of displacement at the oldman river dam: A case study. *Congrès annuel 2019 de l'ACB*. <https://www.researchgate.net/publication/337227627>
- ICOLD. (2019). *Bulletin 194: Consideration of the safety of dams in tailings storage facilities*.
- Kang, F., Wang, G., Li, Y., Cai, B., Li, S., Zhao, L., & Li, X. (2023). Analysis of the Dynamic Stability of Tailing Dams: An Experimental Study on the Dynamic Characteristics of Tailing Silt. *Applied Sciences* 2023, Vol. 13, Page 5250, 13(9), 5250.
<https://doi.org/10.3390/APP13095250>
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. Prentice-Hall.
<https://faculty.washington.edu/kramer/GEEbook.pdf>
- Lienhart, W. (2017). Geotechnical monitoring using total stations and laser scanners: critical aspects and solutions. *J Civil Struct Health Monit*. <https://doi.org/10.1007/s13349-017-0228-5>
- Luzi, G., Pieraccini, M., Mecatti, D., Noferini, L., Guidi, G., Moia, F., & Atzeni, C. (2004). Ground-based radar interferometry for landslides monitoring: Atmospheric and instrumental decorrelation sources on experimental data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(11), 2454–2466. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.836792>

- Lynch, P., & Loh, J. (2006). A Summary Review of Wireless Sensors and Sensor Networks for Structural Health Monitoring. *The Shock and Vibration Digest*, 38(2), 91–128. <https://doi.org/10.1177/0583102406061499>
- Mikkelsen, P. (2003). Advances in inclinometer data analysis. *Proc. 6th international symposium on field measurements in geomechanics*. <https://durhamgeo.com/pdf/papers/advances-in-data-analysis.pdf>
- Sancho Gómez-Zurdo, R., Galán Martín, D., González-Rodrigo, B., Marchamalo Sacristán, M., & Martínez Marín, R. (2021). Aplicación de la fotogrametría con drones al control deformacional de estructuras y terreno. *Informes de la Construcción*, 73. <https://doi.org/10.3989/ic.77867>
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. <https://doi.org/10.1002/9780470172766>
- Torres, A. C., Ramírez, J. L., & Fórnés, P. (2021). *Uso de imágenes satelitales InSAR y monitoreo automatizado sistema geomos para optimizar el monitoreo geotécnico, caso mina Utunsa - Apurímac - Perú*. https://www.researchgate.net/publication/356291104_USO_DE_IMAGENES_SATELITALES_INSAR_Y_MONITOREO_AUTOMATIZADO_SISTEMA_GEOMOS_PARA_OPTIMIZAR_EL_MONITOREO_GEOTECNICO_CASO_MINA_UTUNSA_-APURIMAC_-PERU
- Uriarte, R., Casas, D., & Parra, D. (2021). Automation of a seismic monitoring system for geotechnical structural in Perú: Audas platform. *17th World Conference on Earthquake Engineering, 17WCEE*. <https://www.nicee.org/wcee/search17.php>

- USACE. (2003). Engineering and design - Slope stability. *USACE Publications*.
https://www.publications.usace.army.mil/Portals/76/Publications/EngineerManuals/EM_1110-2-1902.pdf
- USBR. (2015). Design standards No. 13: Embankment dams. *Final reclamation design standards*.
- Vargas Camacho, A. (2019). Experiencias en el desarrollo de la instrumentación geotécnica y del método observacional en las grandes presas construidas para generación hidroeléctrica en México y la factibilidad de implementarse en presas de relaves mineros (residuos mineros). *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges, 1918–1928*. <https://doi.org/10.3233/STAL190250>
- Vick, S. G. (1990). *Planning, design, and analysis of tailings dams*. BiTech Publishers Ltd.
<https://doi.org/10.14288/1.0394902>
- Wang, Y., Shen, D., Chen, J., Pei, L., Li, Y., Lu, X., & Zhang, L. (2020). Research and Application of a Smart Monitoring System to Monitor the Deformation of a Dam and a Slope. *Advances in Civil Engineering, 2020*. <https://doi.org/10.1155/2020/9709417>

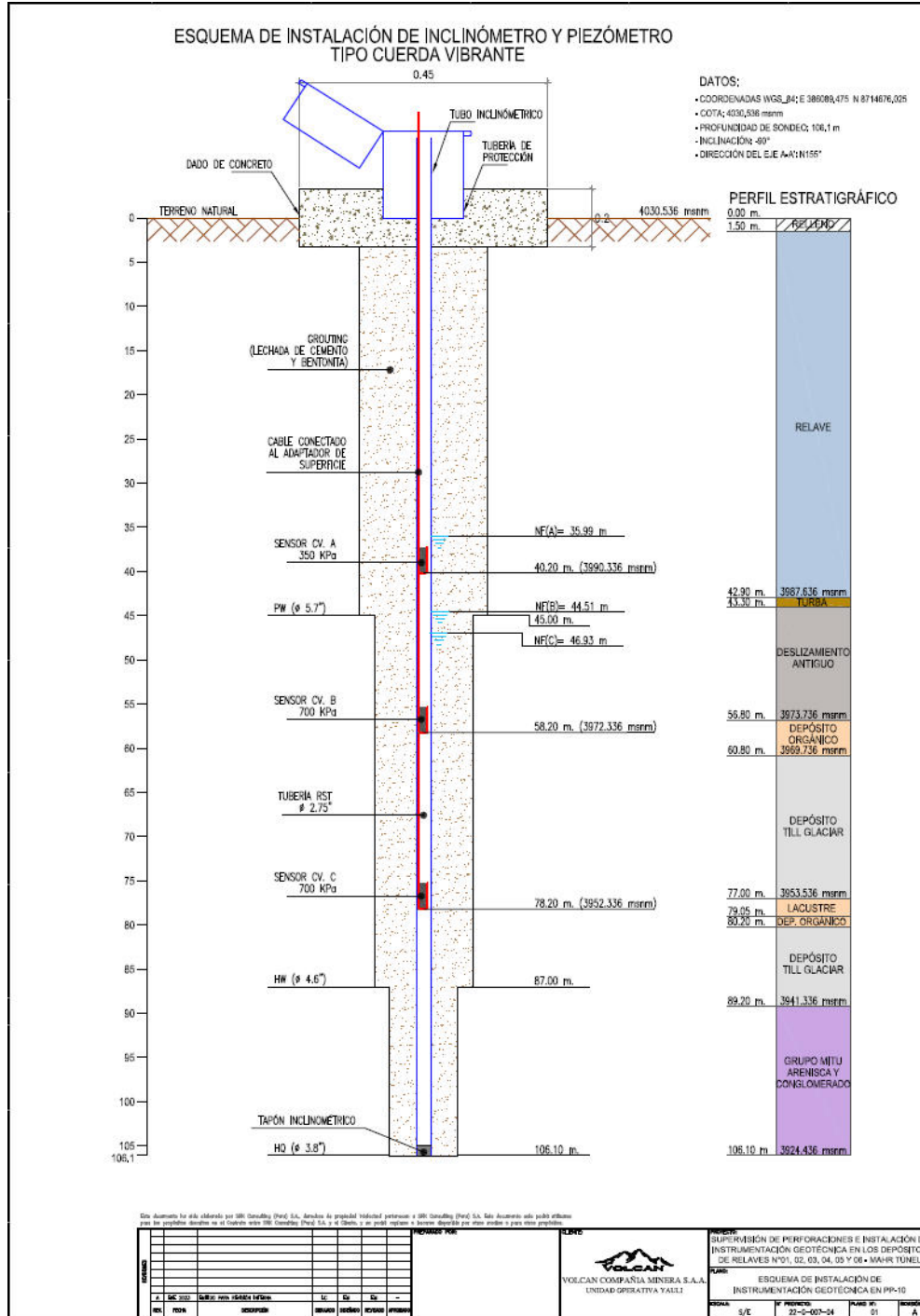
Apéndice

Apéndice A. Esquema de instalación de piezómetro tipo casagrande y cuerda vibrante



Nota. Elaboración propia.

Apéndice B. Esquema de instalación de inclinómetro y piezómetro



Nota. Elaboración propia.

Apéndice C. Hoja de calibración de los sensores de cuerda vibrante ventilado



GEOSENSE QUALITY FORM
FORM No G/QF/149
ISS. 8
DATE: Dec-18
SIG. GC

LOW PRESSURE VENTED VW PIEZOMETER LAE CALIBRATION

Model	VWP-3300	Cal date	26/05/2020	SN.	8233
Serial	351341	Baro	1001.0	Readout No.	2108
Works ID	GV3 9 21	Temp °C	20	R/O Cal. date	03/06/2019

Applied pressure		Readings [digit]			Calculated Pressure		Error % fso	
psi	kPa	1st Cycle	2nd Cycle	avg. [digit]	lin. [kPa]	polyn. [kPa]	linear	polynomial
0.000	0.000	9239.9	9240.2	9240.0	0.26	0.03	0.08%	0.01%
10.007	69.000	8671.0	8671.6	8671.3	68.88	68.93	-0.03%	-0.02%
20.015	138.000	8099.5	8099.8	8099.7	137.85	138.04	-0.04%	0.01%
30.022	207.000	7527.9	7528.4	7528.1	206.81	207.00	-0.05%	0.00%
40.029	276.000	6954.9	6955.4	6955.1	275.95	276.00	-0.01%	0.00%
50.036	345.000	6380.8	6381.2	6381.0	345.23	345.00	0.07%	0.00%

Calibration of Fluke Pressure Controller PPC4EX S/N: 8233 valid from 8th May 2019. Certificate of Calibration No 61189, Chamois Metrology UKAS No 0822

CALIBRATION FACTORS

Linear factor (k)

kPa per digit
-0.120657148

psi per digit
-0.017499

mH ₂ O per digit
-0.012304

Polynomial factors

	kPa
A	-2.16066E-07
B	-0.117281902
C	

	psi
	-3.13367E-08
	-0.017010

	mH ₂ O
	-2.2033E-08
	-0.011959

Thermal factor (T)

kPa per °C
-0.176079637

psi per °C
-0.025537293

mH ₂ O per °C
-0.017955

Note: Digits are Hz² x 10⁻³ units.

(please consult the User Manuals for conversion of alternative reading units)

Polynomial calculation [kPa] = A * (Reading)² + B * (Reading) + C + T * (Current Temp - Site Zero Temp)

C = -A*(Site Zero Reading²) - B*(Site Zero Reading)

Linear calc = k (kPa) * (Current Reading - Site Zero Reading) + T * (Current Temp - Site Zero Temp)

THIS CERTIFICATE IS VALID ONLY WHEN CARRYING THE OFFICIAL ORIGINAL STAMP OF GEOSSENSE BELOW



Nova House, Rougham Industrial Estate, Rougham, Bury St Edmunds, Suffolk, IP30 9ND, England
t +44 (0)1359 270457 f +44 (0)1359 272860 e info@geosense.co.uk www.geosense.co.uk

Geosense Ltd Registered in England 8445199

Nota. Elaboración propia.

Apéndice D. Hoja de calibración de los sensores IPIs



Nove House, Rougham Industrial Estate, Rougham, Bury St Edmunds
 Tel: +44(0)1359 270457 • Fax: +44(0)1359 272860 •
 Website: www.geosense.co.uk

GEOSENSE QUALITY FORM
 FORM No GRQF/148
 ISS. 4
 DATE : MAY 17
 SIG. GC

Calibration Record

Vertical MEMS In Place Inclinometer Digital Bus 485 Output

Serial No:	17810	Range (\pm):	15
Calibration Date:	09/11/2020	Length:	5M
Model:	IPI-V-2-485-WR	Orientation:	VERTICAL

References:	
OMT Rotary Table SN#	AT50/7/71

Calibrated By:
AARON SMITH

A-Axis

Applied Angle (Deg)	Applied Angle (Sin(x))	Output (Sin(x))	Relative Error (Sin(x))
15.00	0.25882	0.25884	-0.00003
11.25	0.19509	0.19510	-0.00002
7.50	0.13053	0.13053	-0.00001
3.75	0.06540	0.06539	0.00001
0.00	0.00000	-0.00001	0.00000
-3.75	-0.06540	-0.06541	0.00000
-7.50	-0.13053	-0.13053	-0.00001
-11.25	-0.19509	-0.19508	-0.00002
-15.00	-0.25882	-0.25883	0.00000
Max Error (Sin(x))			0.00003

B-Axis

Applied Angle (Deg)	Applied Angle (Sin(x))	Output (Sin(x))	Relative Error (Sin(x))
15.00	0.25882	0.25877	0.00004
11.25	0.19509	0.19507	0.00002
7.50	0.13053	0.13049	0.00003
3.75	0.06540	0.06539	0.00000
0.00	0.00000	-0.00001	0.00000
-3.75	-0.06540	-0.06538	-0.00003
-7.50	-0.13053	-0.13053	-0.00001
-11.25	-0.19509	-0.19512	0.00003
-15.00	-0.25882	-0.25880	-0.00003
Max Error (Sin(x))			0.00004

Calibration of OMT Rotary Table model AT50 serial No 07/71, Calibrated 12th January 2016 by Rotary Precision Instruments Ltd using equipment which provides traceability to National Standards (Certificate No CC13111)



THIS CERTIFICATE IS VALID ONLY WHEN CARRYING THE
 OFFICIAL ORIGINAL STAMP OF GEOSENSE BELOW

Nota. Elaboración propia.

Apéndice E. Hoja de calibración del acelerógrafo

Obsidian Test and Configuration Sheet





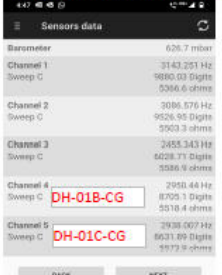

w/ Internal EpiSensor Deck

Obsidian S/N	1586	Test Date	10/01/2020
KMI Sales Order Number	400482-1	QA Date	10/11/2020
Unit passed all required performance tests		TM (Tech)	
Unit passed the final QA inspection		MLP (QA)	
RTracker P/N 300629		v1.7	

Obsidian P/N	114160-PL
JVM License#	4839
Rockhound Software	Installed
Rockhound Software Version	KMI Rockhound 3.17.1
Processor Board P/N	114060-PL
Processor Board MAC Address	70:B3:D5:CE:98:53
Processor Board Electronic S/N	1C7F434F1200009A
Processor Board Vendor S/N	1991711
Processor Board Revision	B
Processor Board FPGA Version	A
System SD Flash P/N	700535-PL
System SD Flash Mfg	Transcend
System SD Flash Size	4GB
System SD Flash Image Version	KMI Rock2 Arm filesystem 1.0
Data SD Flash P/N	700536-PL
Data SD Flash Mfg	Transcend
Data SD Flash Size	32GB
Power Supply Board P/N	114080-PL
Power Supply Board Electronic S/N	1C7D0CD810000034
Power Supply Vendor S/N	5182085
Power Supply Board Revision	E
Power Supply Application Version	6.25
Front Panel Board P/N	114035-PL
Front Panel Board Electronic S/N	1C7EE57B12000073
Front Panel Vendor S/N	1891984
Front Panel Board Revision	B
ADC Board 1 P/N	112110
ADC Board 1 Electronic S/N	1C003569130000B9
ADC Board 1 Vendor S/N	5182937
ADC Board 1 Revision	A






Nota. Elaboración propia.

Apéndice F. Protocolo de instalación de PZ VW Venteado

		PROYECTO MAHR TUNEL				
PROTOKOLO DE REGISTRO DE INSTALACION DE PIEZOMETROS VW VENTEADO						
DESCRIPCIÓN						
Empresa : VOLCAN COMPAÑIA MINERA SAA				N° de Contrato : _____		
Descripción del Sistema : PIEZOMETRO DE CUERDA VIBRANTE						
Plano de Referencia : UBICACIÓN DE SONDAJES						
Sector de los Trabajos : DH-01 RELAVERA 4-5				Fecha ejecución : 18/01/2021 al 06/02/2021		
Descripción de las Actividades						
ITEM	ACTIVIDAD	SI	NO	N/A	COMENTARIOS	
1	Revisión del piezometro	X			Inspección visual completa	
2	Toma de Lectura Antes de la instalación	X			DH-01B-CG: Ro=9079.7 Dg, To=10.9 °C DH-01C-CG: Ro=10294.28 Dg, To=10.8 °C	
3	Saturación de filtro	X			Efectiva sobre 24 hrs	
4	Preparar Piezometro	X			Preparado	
5	Instalación Piezometro	X			Profundidad de instalación de Piezómetros venteados VW en Piezómetros Casagrande DH-01B-CG=24.80 m, DH-02C=40.95 m desde collar de la tubería	
6	Grauteado	X			Realizado por empresa de perforaciones	
7	Tomar lectura del instrumento	X			Registrado con el Nodo 21486	
DESCRIPCIÓN DE INSTRUMENTACIÓN						
ITEM	Descripción / Modelo	ID	SN	Fecha de instalación	Observaciones	
1	Piezometro VW modelo VWP-3300	DH-01 B-CG	351342	25/01/2021	Pz VW Operativo	
2	Piezometro VW modelo VWP-3300	DH-01 C-CG	348608	25/01/2021	Pz VW Operativo	
DESCRIPCIÓN EQUIPO DE LECTURA						
ITEM	Descripción Instrumento	Marca	Modelo	N° de Serie		
4	Analizer VW	GEOKON	GK-408	1290		
DATALOGGER						
ITEM	Descripción Instrumento	Marca	Modelo	N° de Serie		
4	NODO GEOTECNICO	LOADSENSING	LS-G8-VW	21486		
OBSERVACIONES						
REGISTRO FOTOGRAFICO						
DH-01B-CG		DH-01C-CG		CONEXIÓN AL NODO GEOTECNICO		INSTALACION DE NODO
						
RESPONSABLE GEOSINERGIA		TOMA CONOCIMIENTO			Vº Bº VOLCAN CIA MINERA SAA	
NOMBRE : O. ESCUDERO		NOMBRE : A. BURGA			NOMBRE : O. HUAÑA	
FECHA : 25/01/2021		FECHA : 25/01/2021			FECHA : 25/01/2021	
FIRMA : _____		FIRMA : _____			FIRMA : _____	


Nota. Elaboración propia.

Apéndice G. Protocolo de instalación IPI

		PROYECTO MAHR TUNEL				
PROTOKOLO DE REGISTRO DE INSTALACION DE INCLINOMETRO IN PLACE						
DESCRIPCIÓN						
Empresa : VOLCAN COMPAÑIA MINERA SAA				N° de Contrato : _____		
Descripción del Sistema : INCLINOMETROS FIJOS-MEMS						
Plano de Referencia : UBICACIÓN DE SONDAJES						
Sector de los Trabajos : DH-03 RELAVERA 4-5				Fecha ejecución : 03/12/2020 al 16/12/2020		
Descripción de las Actividades						
ITEM	ACTIVIDAD	SI	NO	N/A	COMENTARIOS	
1	Revisión de Inclínómetros	X			Inspección visual completa	
2	Toma de medidas	X				
3	Armado del sistema	X			Preparado	
4	Montaje de Nodo (Datalogger)	X			Prueba de operación efectiva, 15/12/2020	
5	Prueba de operación antes del montaje	X				
6	Montaje de IPIs en tubería	X				
7	Conexión IPIs a Nodo	X			Nodo serie: 29510 Efectuada. IPIs conectados y operativos.	
DESCRIPCIÓN DE INSTRUMENTACIÓN						
ITEM	Descripción	N° de Serie	Adress	Profundidad de Instalación		
1	Ch 1	17819	17819	30 m desde collar de tubería inclinométrica		
2	Ch 2	17818	17818	20 m desde collar de tubería inclinométrica		
3	Ch 3	17810	17810	5 m desde collar de tubería inclinométrica		
OBSERVACIONES						
REGISTRO FOTOGRAFICO						
INSTALACION DE SENSORES 		CONEXIÓN AL NODO GEOTECNICO 			INSTALACION DE NODO 	
RESPONSABLE GEOSINERGIA		TOMA CONOCIMIENTO			Vº Bº VOLCAN CIA MINERA SAA	
NOMBRE : O. ESCUDERO		NOMBRE : A. BURGA			NOMBRE : O. HUAÑA	
FECHA : 15/12/2020		FECHA : 15/12/2020			FECHA : 15/12/2020	
FIRMA :		FIRMA :			FIRMA :	

Nota. Elaboración propia.

Apéndice H. Acta de asistencia de la capacitación del T4G

 GEOSINERGIA	VOLCAN		Código:	REG-VOL-GLO-07-01		
	Acta de Asistencia		Revisión:	02		
			Área:	SSO		
			Páginas:	1		
N° Corr.						
DATOS DEL EMPLEADOR						
Razón Social: <i>Geosinergia Sore de Ing. Puntac</i>		RUC: <i>206055044</i>	Actividad Económica:			
Unidad Operativa: <i>Sección Operativa</i>		Servicios de Ingeniería				
N° de Trabajadores en el Centro Laboral: <i>2</i>						
Domicilio: <i>Av. Caserio Villa 296</i>		Provincia: <i>Huanc</i>	Distrito: <i>Huanc</i>	Departamento: <i>Lima</i>		
DATOS DEL EVENTO						
Tema: <i>Uso del T4G, Capacitación Personal Proyecto</i>		Fecha: <i>18/07/2023</i>		<input type="checkbox"/> Inducción		
Lugar: <i>Oficina Cicore</i>		Interna <input type="checkbox"/>		<input checked="" type="checkbox"/> Capacitación		
Capacitador (es): <i>Henry Garay</i>		Externa <input checked="" type="checkbox"/>		<input type="checkbox"/> Simulacros		
				<input type="checkbox"/> Entrenamiento		
				<input type="checkbox"/> Reunión		
H.I.: <i>10:00</i>		HF: <i>13:00</i>	DURACIÓN: <i>3 horas</i>			
No.	EMPRESA	APELLIDOS Y NOMBRES (Completo con letra impresa)	DNI	FIRMA	AREA	U. PRODUCCION
1	<i>Volcan</i>	<i>Frescos Chugapana Yasset Refanilo</i>	<i>70378116</i>	<i>[Firma]</i>	<i>Proyectos</i>	<i>Multifuncional</i>
2						
3						
4						
5						
6						
7						
8						
9						
10						
11						
12						
13						
14						
15						
16						
17						
18						
19						
20						
21						
22						
23						
24						
25						
26						
27						
28						
29						
30						
N° DE PARTICIPANTES (A):		DURACIÓN (B):		HH DE CAPACITACIÓN (Ax B):		
CAPACITADOR:			RESPONSABLE DEL REGISTRO			
NOMBRES: <i>Henry Garay</i>			NOMBRES:			
CARGO: <i>Supervisor de Calidad</i>			CARGO:			
FIRMA: <i>[Firma]</i>			FIRMA:			
			FECHA:			

Nota. Elaboración propia.

Apéndice I. TARP's

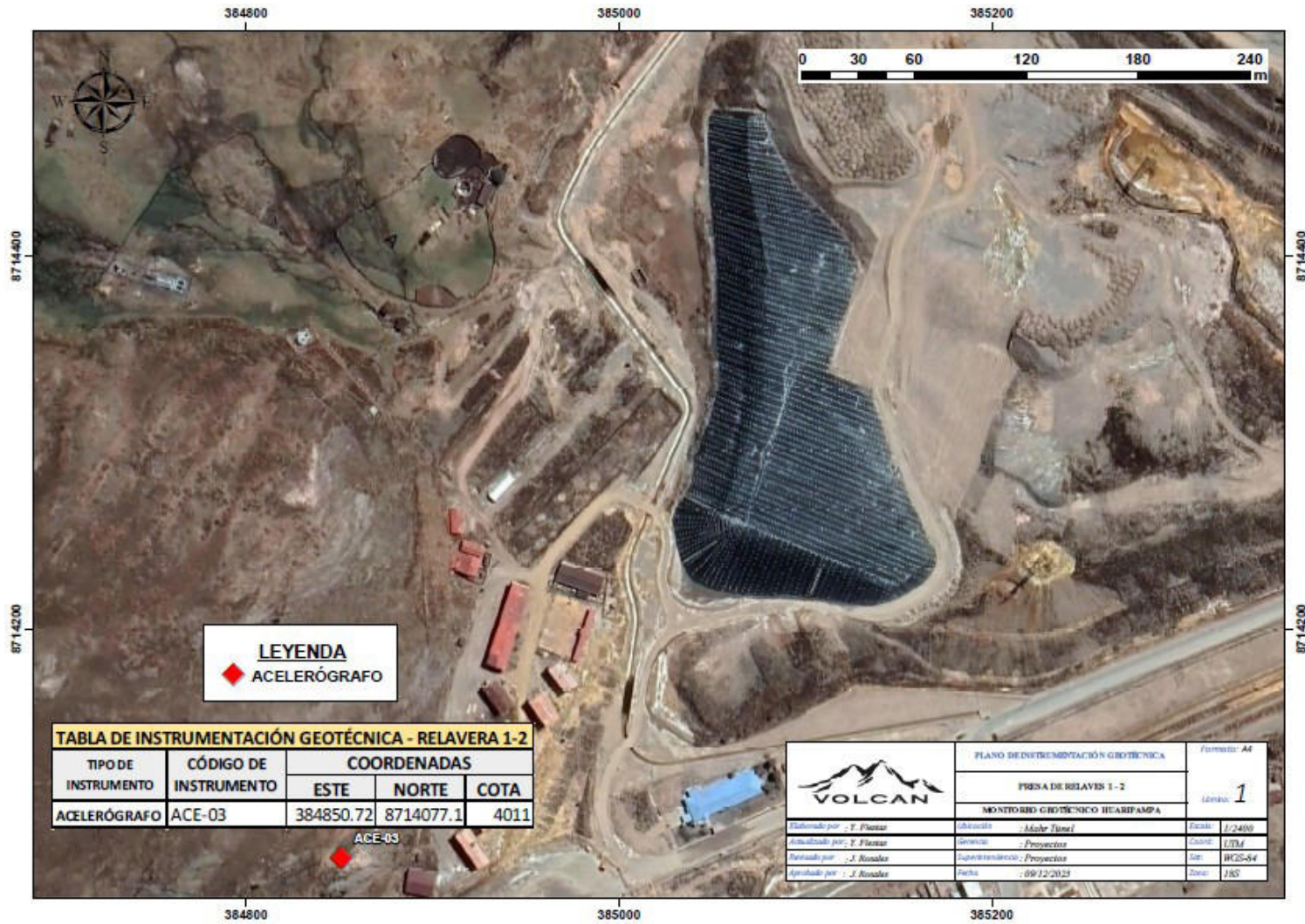
Peligro: Fallo en el dique de la presa de relaves (corona, talud o pie) Número TARP: 01 Propietario de TARP:
 Fecha de finalización del TARP: 09/2028 Siguiete revisión FECHA de TARP: 09/2024
 Documentos asociados: Manual de operaciones, Plan de Respuesta a Emergencias.

Nota: Un TARP está diseñado para brindar orientación sobre los niveles de respuesta cuando las condiciones operativas normales comienzan a cambiar y cuando estos cambios pueden generar impactos no deseados o indeseables en las personas, la planta y el equipo o en los objetivos estratégicos o HSEC del negocio. A medida que las condiciones se deterioran, el TARP proporciona la información requerida para la escalada de la respuesta requerida y aquellos que deben ser notificados e involucrados en el proceso de toma de decisiones y los pasos específicos a seguir.

	Normal	Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3
Acción desencadenante	<ul style="list-style-type: none"> Estructuras estables Sin fisuras ni deformaciones en la cresta o talud Piezómetros de cuerda vibrante (VW) y Casagrande (CG) operando por debajo de los niveles de activación. TSF 3: Anexo I TSF 4 y 5: Anexo I TSF 6: Anexo I Aceleraciones registradas por acelerómetros en roca: $Ac < 0.05g$ Sin tendencia anómala en los datos del prisma topográfico 	<ul style="list-style-type: none"> Pequeñas fisuras longitudinales o transversales identificadas (menos de 5 mm de ancho) en la corona, talud o pie de la presa durante la operación normal, las actividades de construcción o inspecciones. Piezómetros de cuerda vibrante (VW) y Casagrande (CG) operando: TSF 3: Anexo I TSF 4 y 5: Anexo I TSF 6: Anexo I Aceleraciones registradas por acelerómetros: $0.05g < Ac < 0.1g$ Tendencia en los datos del prisma topográfico, con un movimiento de hasta 5 mm con respecto al trimestre anterior Aumento de la tasa de agrietamiento de la presa, basado en el monitoreo de grietas establecidas. Aumento del asentamiento u otra evidencia de movimiento en el cuerpo de la presa, basado en el monitoreo de zonas establecidas 	<ul style="list-style-type: none"> Grandes grietas longitudinales o transversales identificadas (más de 5 mm de ancho) durante la operación normal, las actividades de construcción o inspecciones. Cualquier VW y CG operando según: TSF 3: Anexo I TSF 4 y 5: Anexo I TSF 6: Anexo I Aceleraciones registradas por acelerómetros: $0.1g < Ac < 0.3g$ Movimiento del prisma topográfico > 5 mm con respecto al trimestre anterior Hundimiento, deslizamientos locales o abultamiento en el cuerpo de la presa (corona, taludes, pie) o terreno natural adyacente. Incremento rápido, inexplicable, de gran orden de magnitud en la tasa de deformación de zonas establecidas. 	<ul style="list-style-type: none"> Lecturas de monitoreo de asentamientos, desplazamientos, y velocidades de movimiento de instrumentos geotécnicos (hitos topográficos), exceden los límites del umbral Nivel 2. TSF 3: Anexo I TSF 4 y 5: Anexo I TSF 6: Anexo I Aceleraciones registradas por acelerómetros: $0.3g < Ac$ Deslizamiento del talud superior a 0.2 m / falla inminente
Operador de la presa de relaves / Jefe de guardia de la planta	<ul style="list-style-type: none"> Llevar a cabo inspecciones e informes de rutina 	<ul style="list-style-type: none"> Comunicar al ingeniero de registro Comunicar al comité SIGDERE Llevar a cabo una vigilancia continua de la afección según las instrucciones del comité SIGDERE. 	<ul style="list-style-type: none"> Comunicar al ingeniero de registro Comunicar al comité SIGDERE Supervisar las reparaciones correctivas según las instrucciones. Aislar y barricar/bloquear el área según sea necesario Mantener un seguimiento diario 	<ul style="list-style-type: none"> Notificar al ingeniero de registro Adoptar las medidas de emergencia prescritas
Ingeniero de registro	<ul style="list-style-type: none"> Asegúrese de que las inspecciones de la presa se realicen dentro de los plazos programados. 	<ul style="list-style-type: none"> Notificar al gerente de operaciones Buscar asesoramiento especializado, evaluar el riesgo y determinar el estado de la presa Determinar si las reparaciones correctivas son prácticas Especificar requisitos de monitoreo adicionales Establecer disponibilidad de maquinaria y recursos materiales para reparaciones. 	<ul style="list-style-type: none"> Notificar al gerente de operaciones Buscar el asesoramiento de un especialista, evaluar el riesgo y determinar si es probable que haya una falla o si está en curso Proporcionar orientación sobre trabajos de rehabilitación / estabilización. Especificar requisitos de monitoreo adicionales Continuar monitoreando y evaluando riesgos 	<ul style="list-style-type: none"> Proporcionar orientación sobre trabajos de rehabilitación / estabilización. Mantener la vigilancia de la presa
Superintendente de planta			<ul style="list-style-type: none"> Evaluar si es necesario bombear agua de la presa para reducir el nivel del agua 	<ul style="list-style-type: none"> Evaluar si es necesario instalar bombas adicionales para eliminar el agua de la presa
Gerente de Operaciones	<ul style="list-style-type: none"> Proporcionar recursos humanos y financieros adecuados para la inspección y el mantenimiento continuos 	<ul style="list-style-type: none"> Servir de enlace con el ingeniero de registro para evaluar el riesgo y los controles para determinar qué acción se requiere 	<ul style="list-style-type: none"> Notificar al Vicepresidente de Operaciones Servir de enlace con el superintendente de planta Notificar al Departamento de Medio Ambiente Evacuar al personal no esencial de la zona de inundación aguas abajo de la presa Mobilizar recursos para realizar obras de rehabilitación. 	<ul style="list-style-type: none"> Activar el plan de acción de emergencia de la presa Servir de enlace con el superintendente de planta Notificar al Departamento de Medio Ambiente Evacuar la zona de inundación aguas abajo de la presa
Vicepresidente de Operaciones	<ul style="list-style-type: none"> Aprobar presupuestos financieros y de recursos 	<ul style="list-style-type: none"> Aprobar presupuestos financieros y de recursos 	<ul style="list-style-type: none"> Mantener la comunicación sobre el tema en desarrollo Proporcionar recursos financieros y humanos para trabajos de reparación. 	<ul style="list-style-type: none"> Activar el plan de gestión de crisis

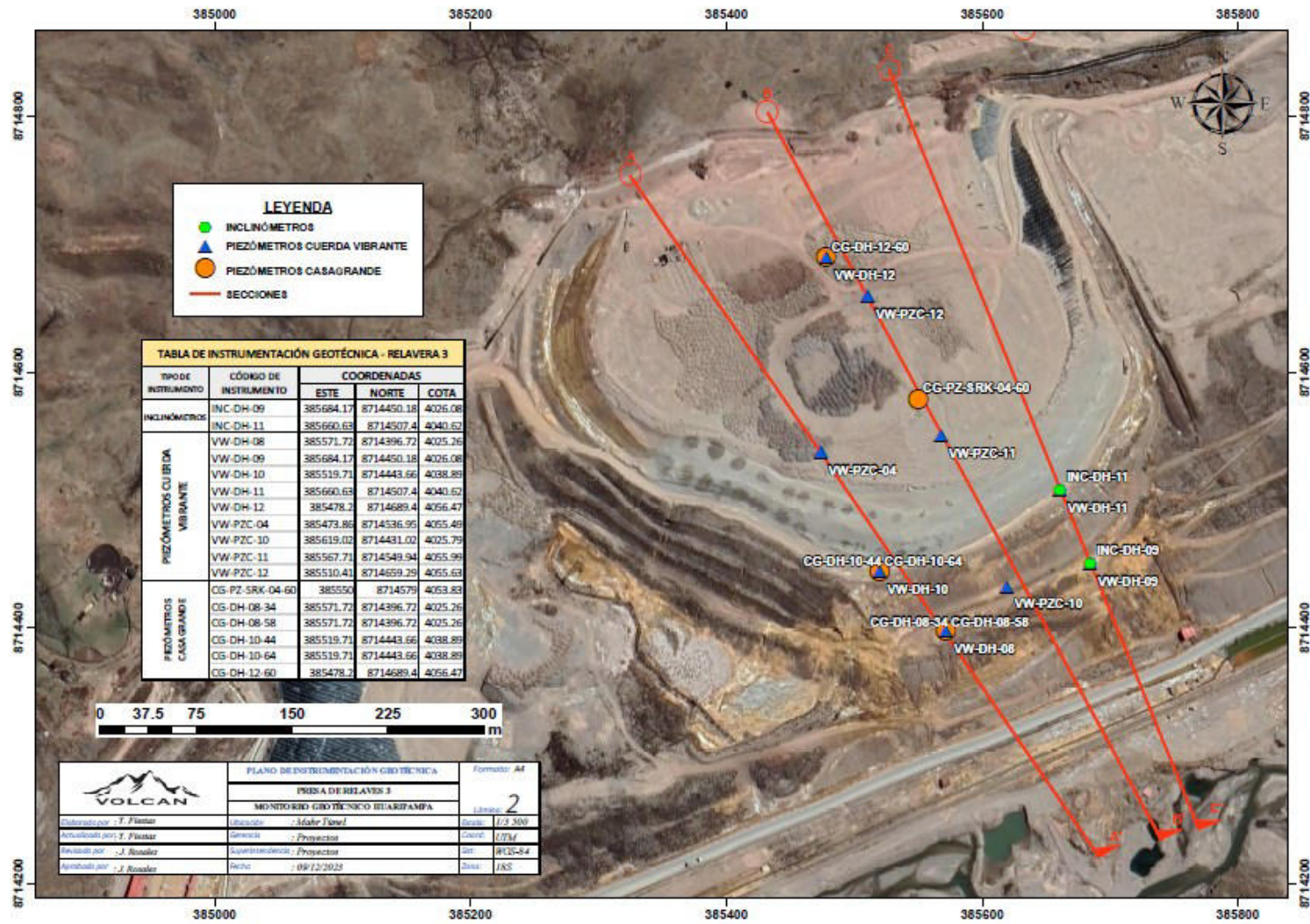
Nota. Elaboración propia.

Apéndice J. Plano de instrumentación, relavera 1 y 2 - Planta



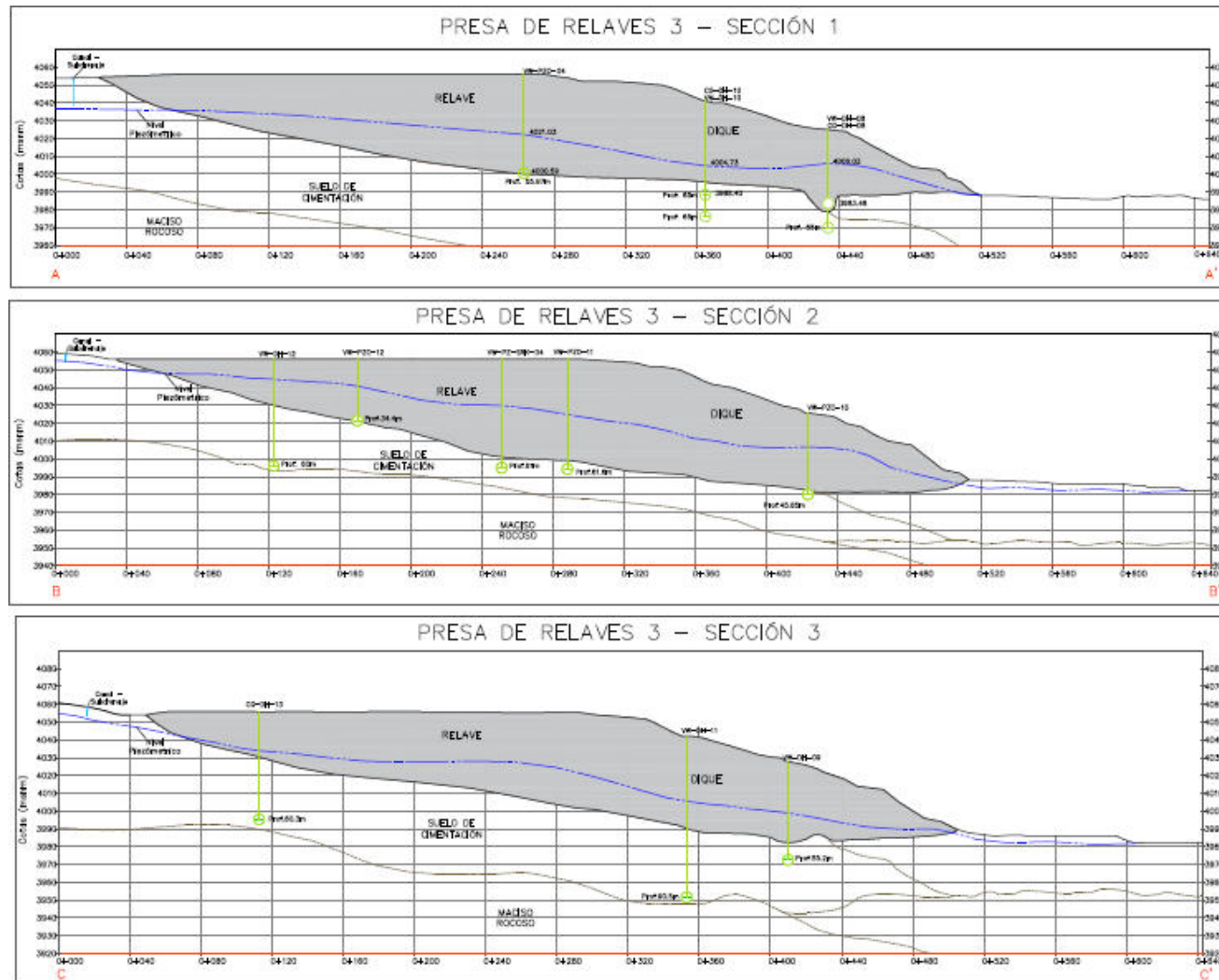
Nota. Elaboración propia.

Apéndice K. Plano de instrumentación, relavera 3 - Planta



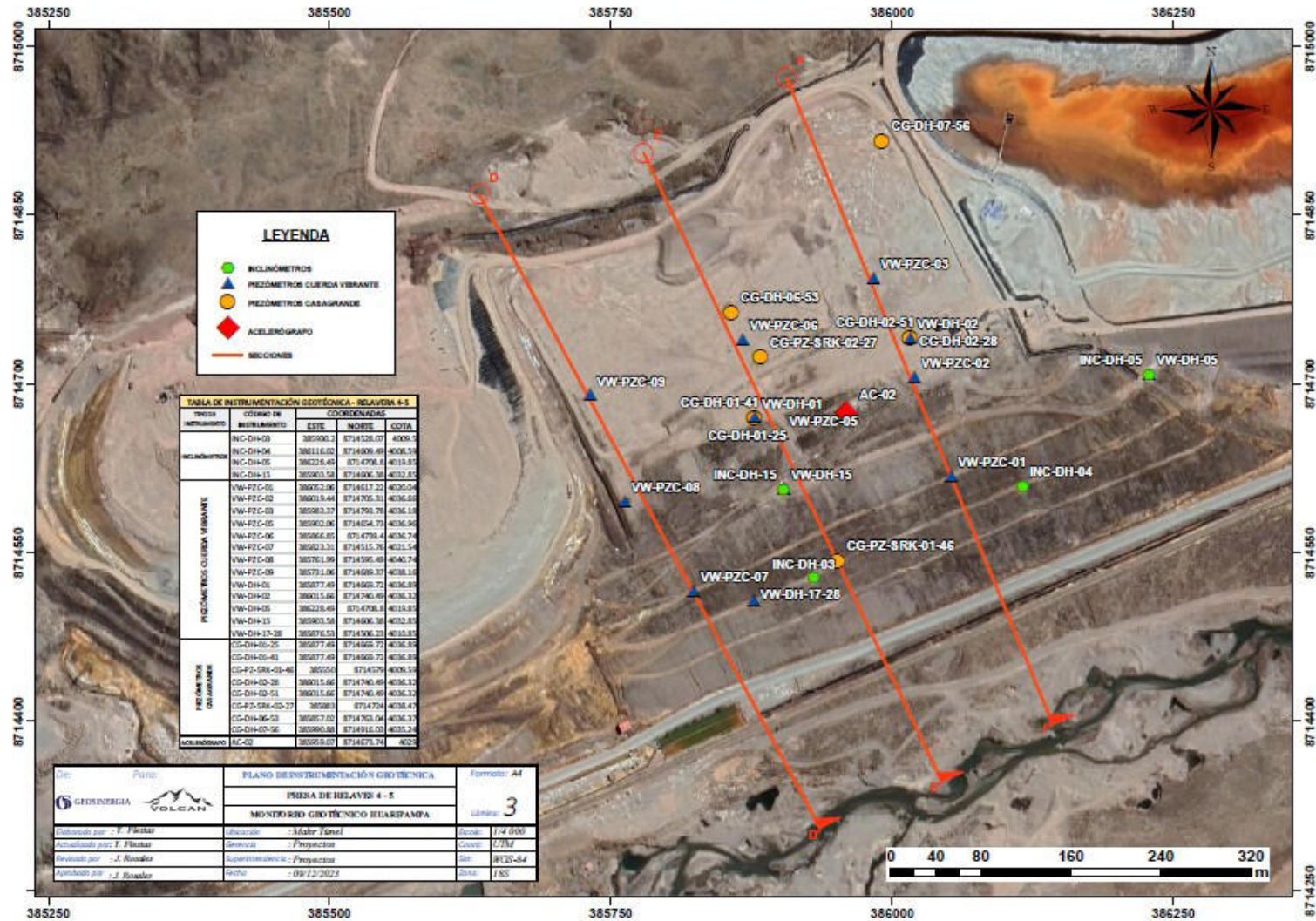
Nota. Elaboración propia.

Apéndice L. Plano de instrumentación, relavera 3 - Secciones



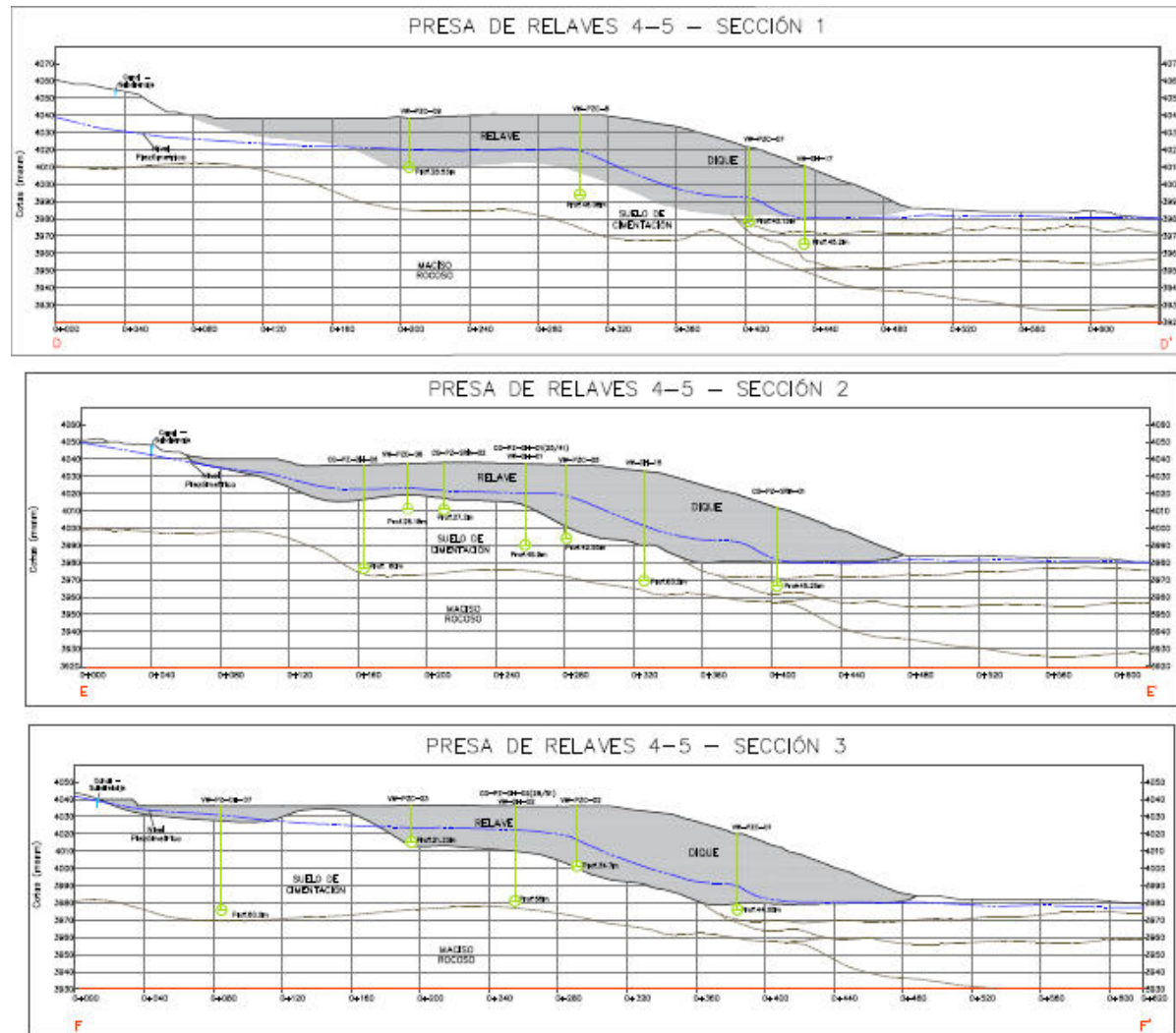
Nota. Elaboración propia.

Apéndice M. Plano de instrumentación, relavera 4 y 5 - Planta



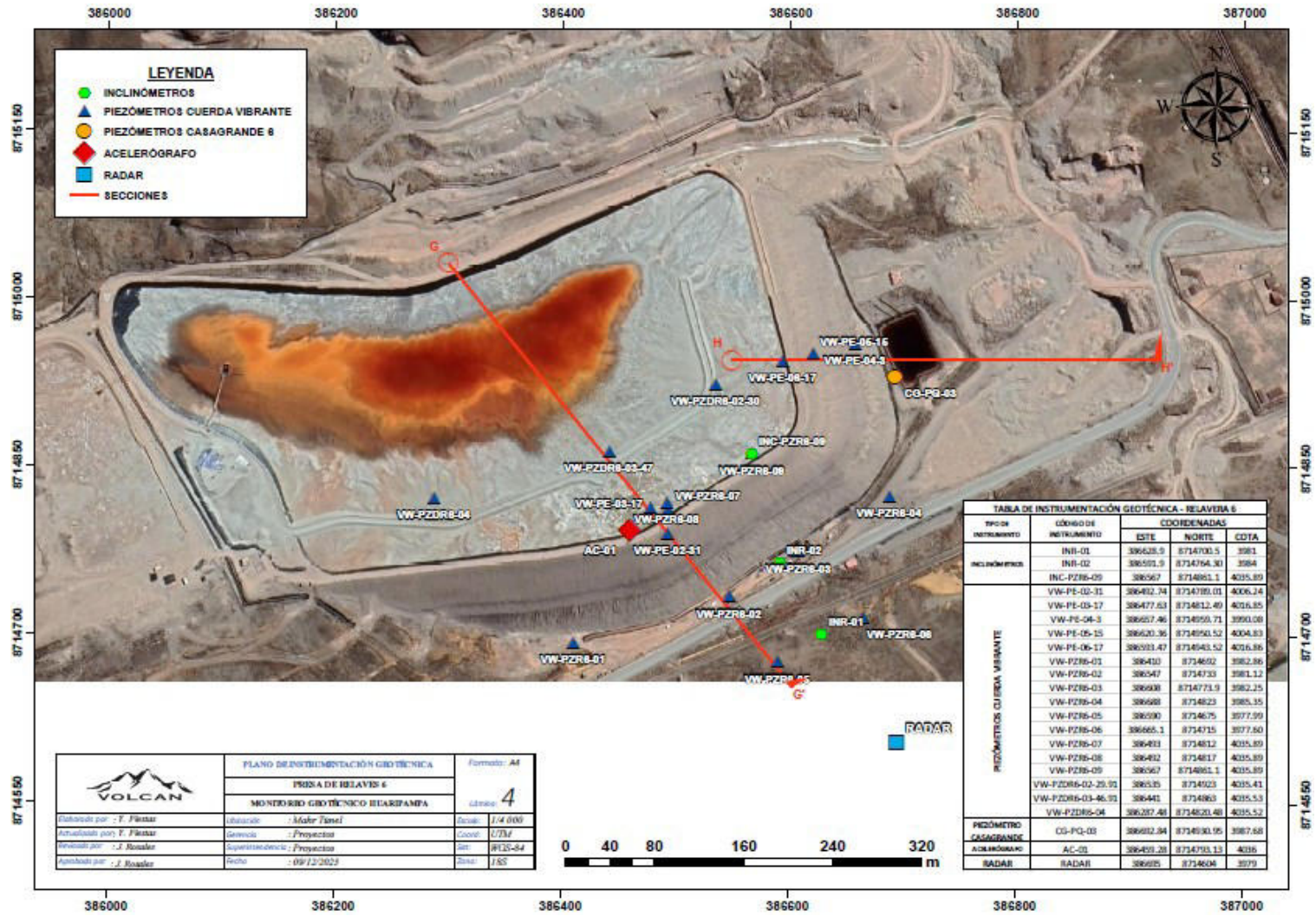
Nota. Elaboración propia.

Apéndice N. Plano de instrumentación, relavera 4 y 5 - Secciones



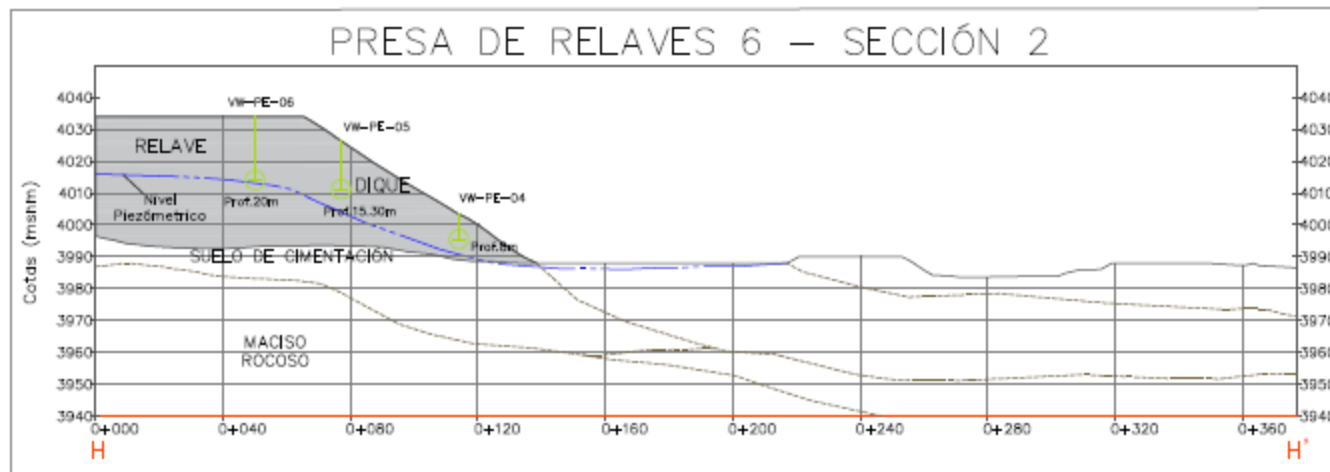
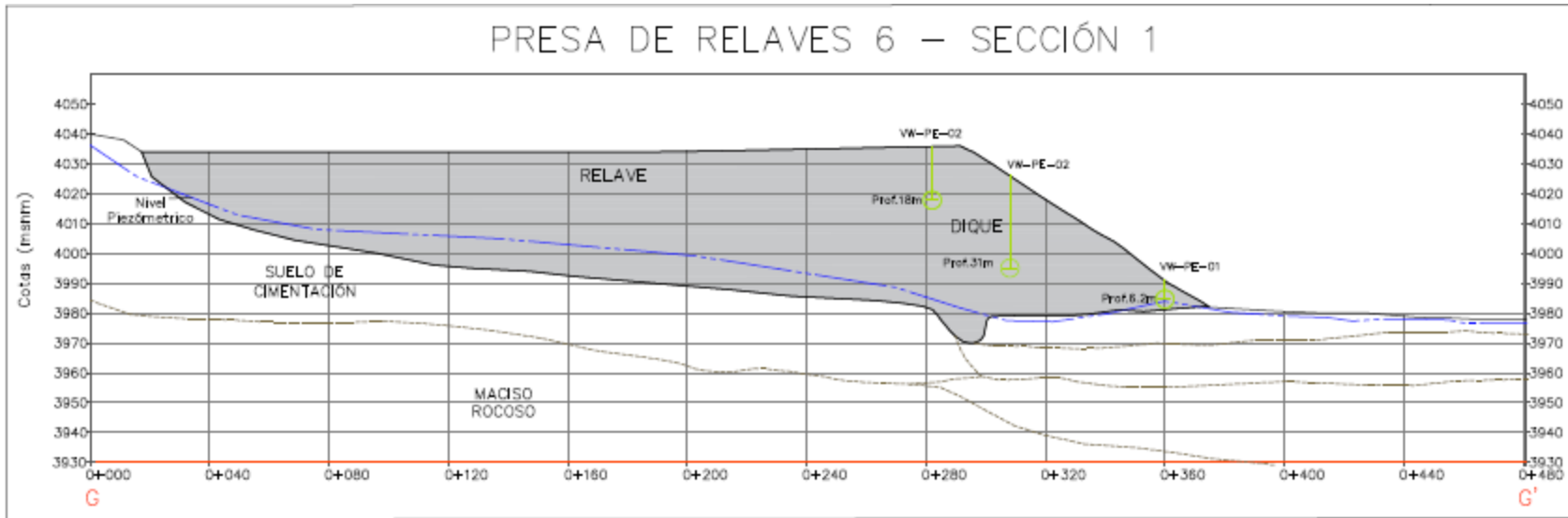
Nota. Elaboración propia.

Apéndice O. Plano de instrumentación, relavera 6 - Planta



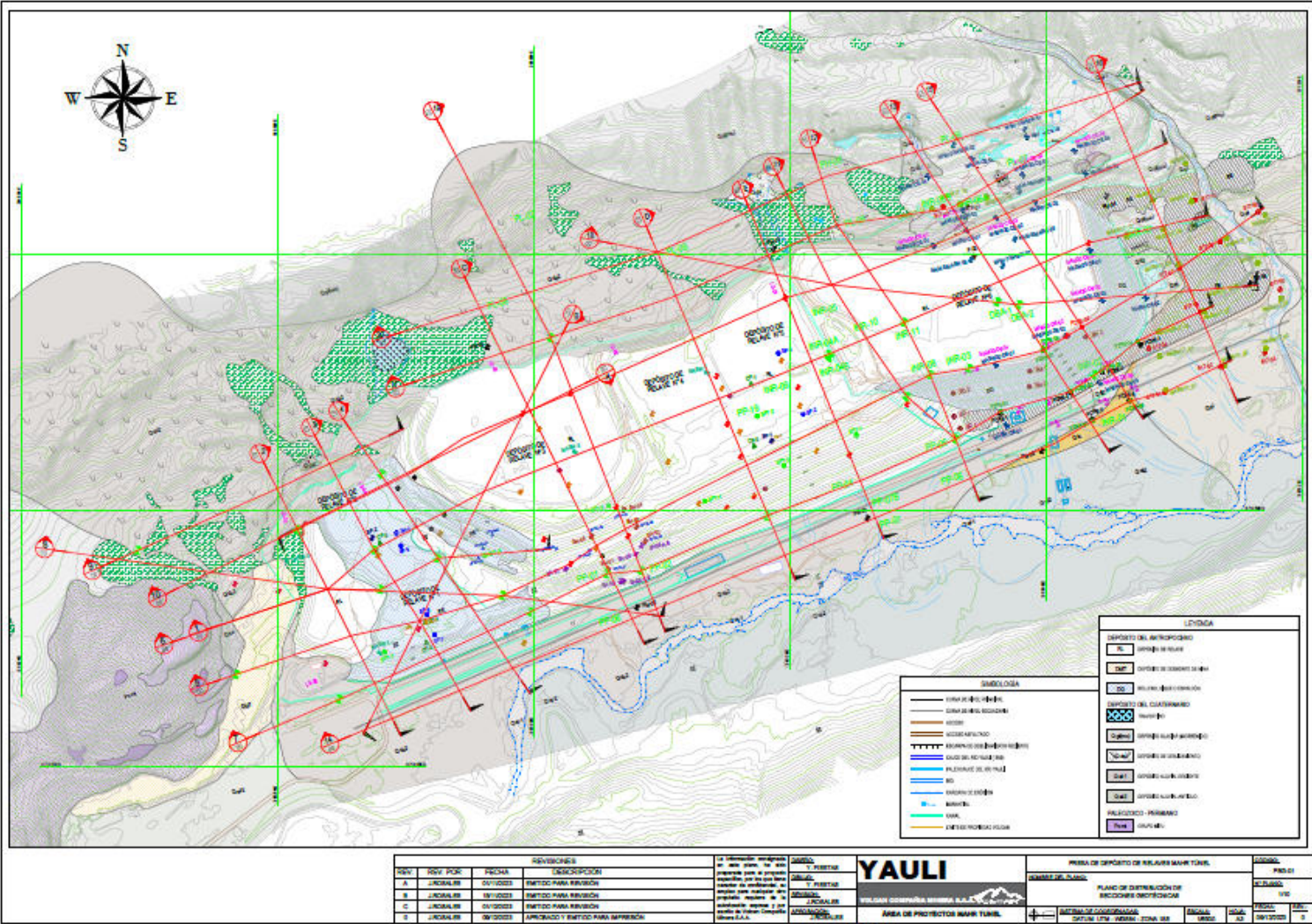
Nota. Elaboración propia.

Apéndice P. Plano de instrumentación, relavera 6 - Secciones



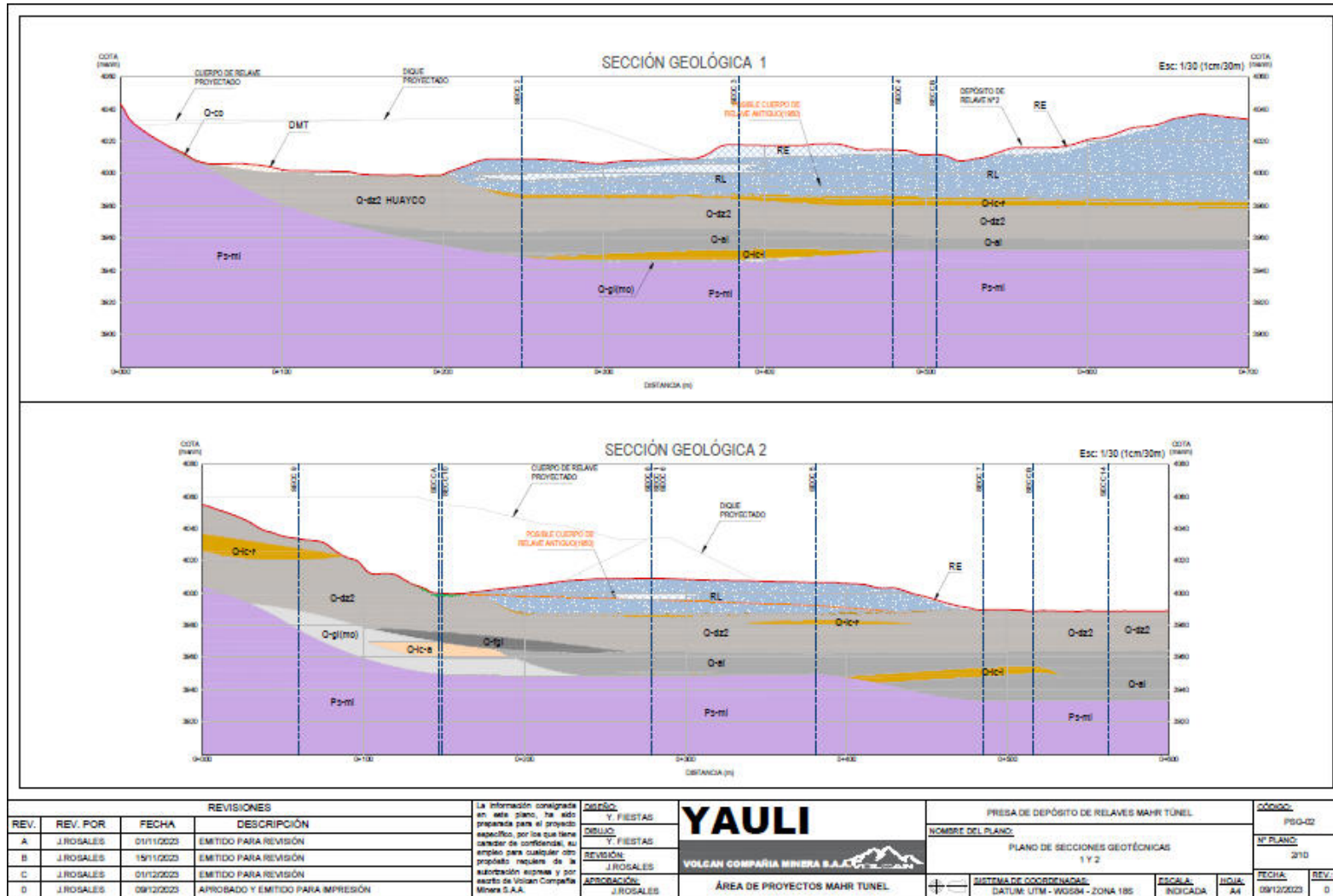
Nota. Elaboración propia.

Apéndice Q. Plano de distribución de secciones geotécnicas



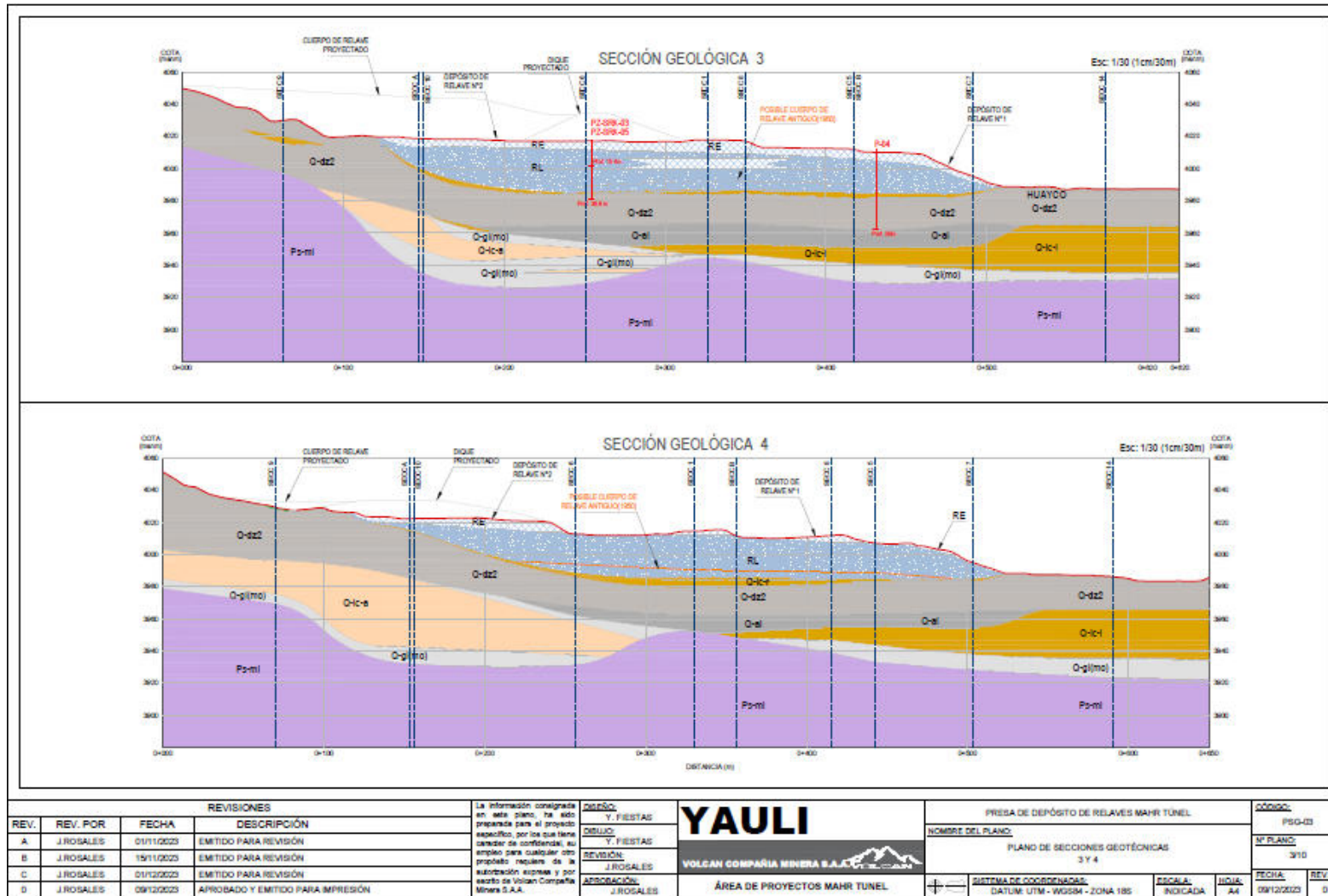
Nota. Elaboración propia.

Apéndice R. Plano de secciones geotécnicas 1 y 2



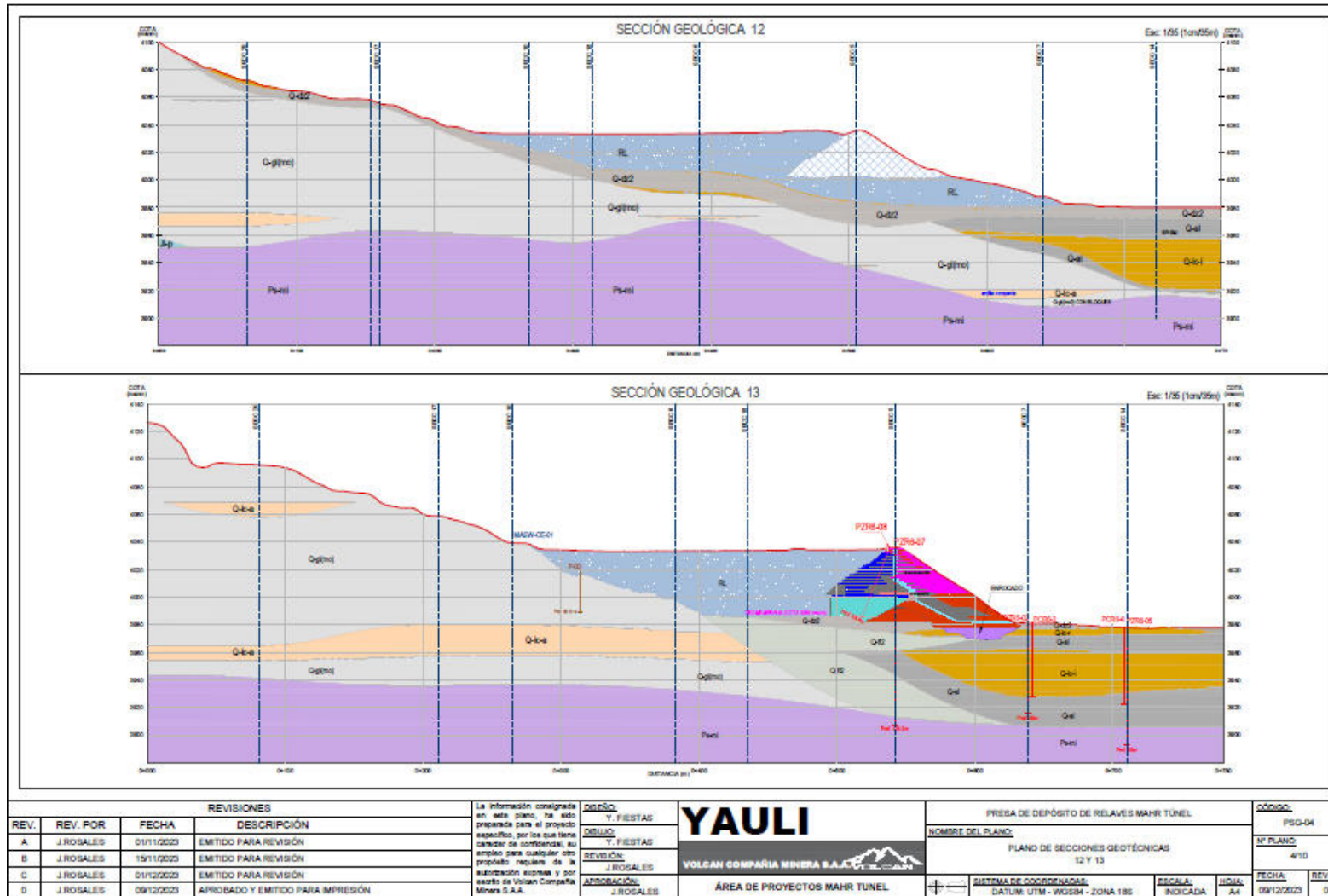
Nota. Elaboración propia.

Apéndice S. Plano de secciones geotécnicas 3 y 4



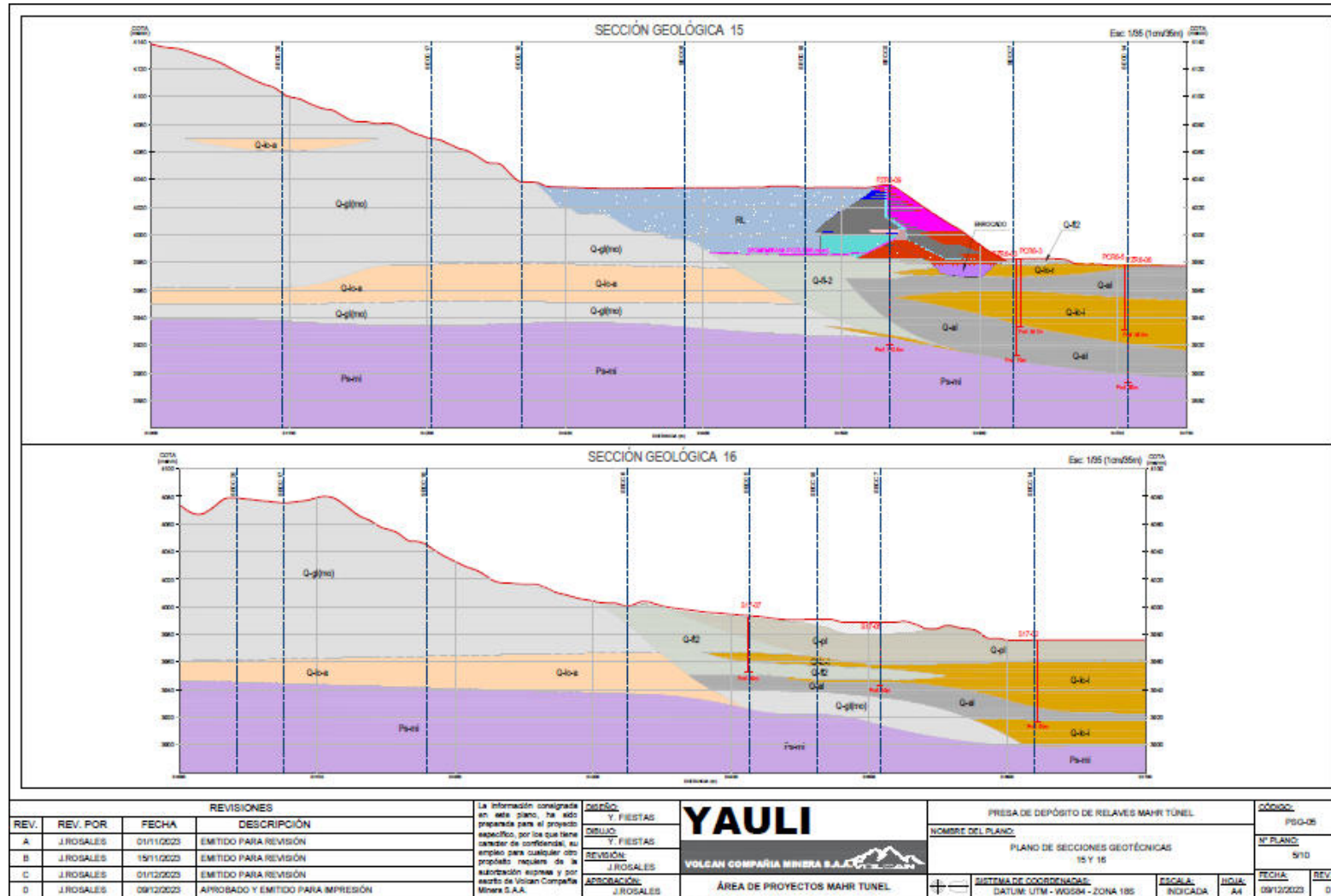
Nota. Elaboración propia.

Apéndice T. Plano de secciones geotécnicas 12 y 13



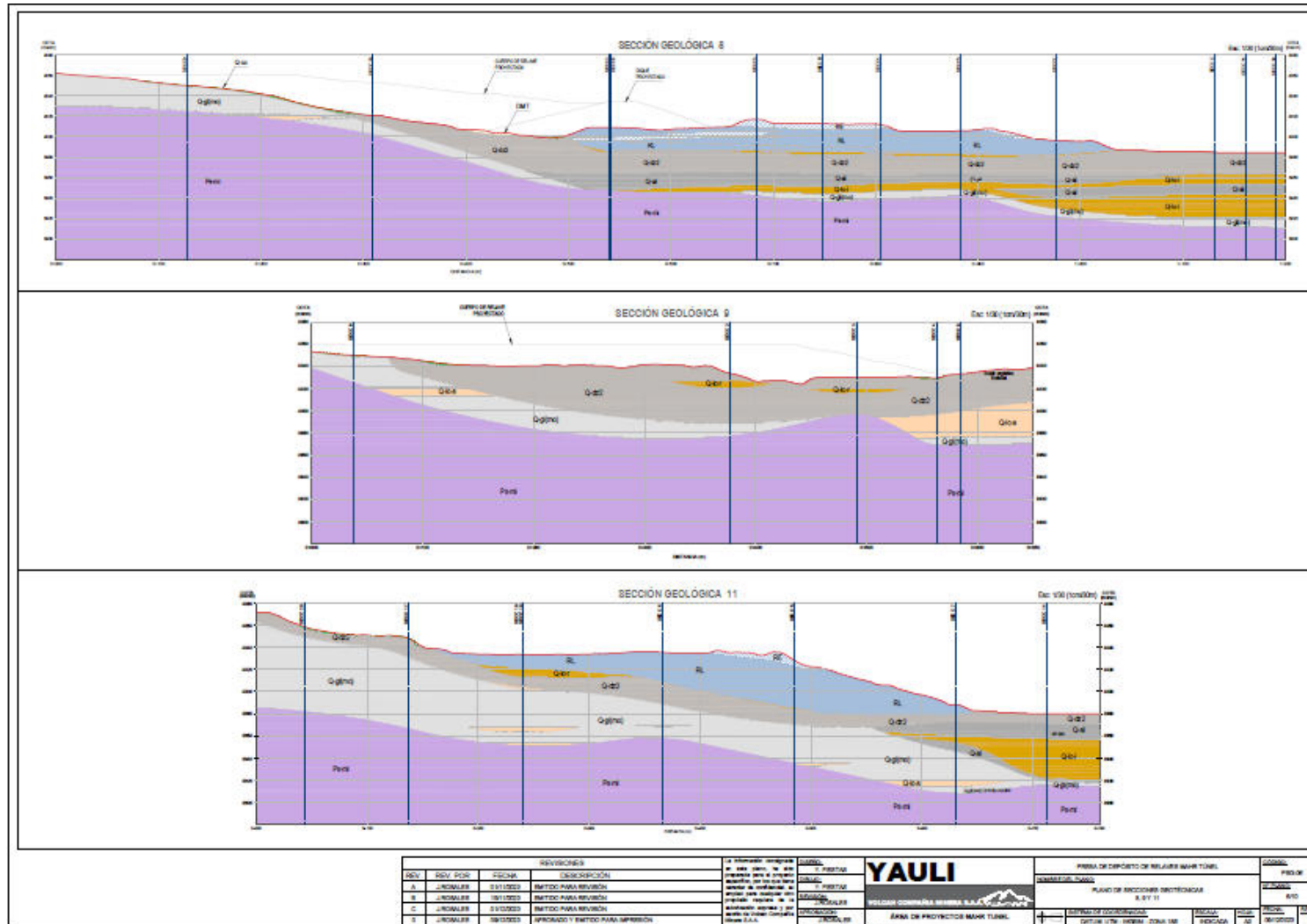
Nota. Elaboración propia.

Apéndice U. Plano de secciones geotécnicas 15 y 16



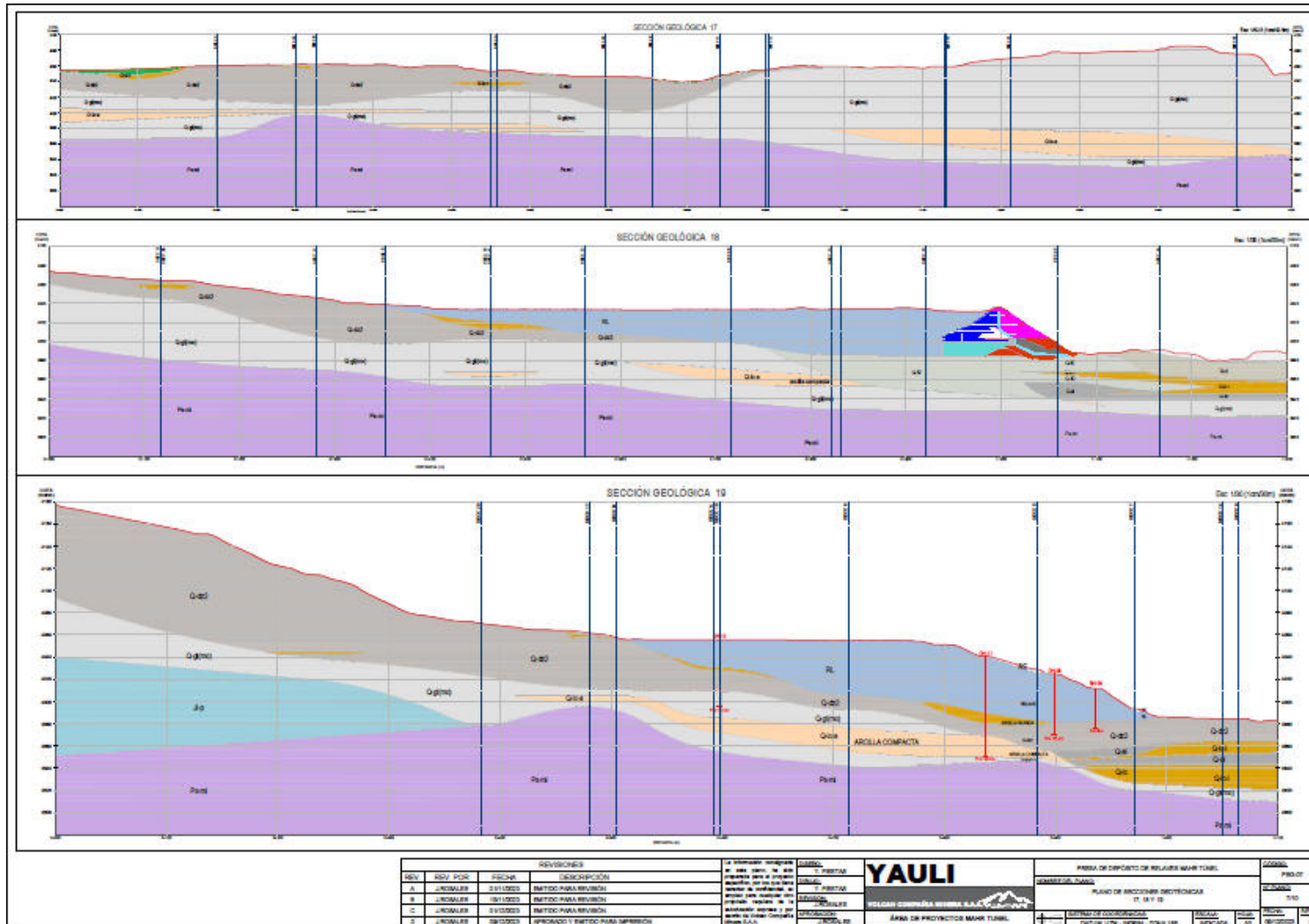
Nota. Elaboración propia.

Apéndice V. Plano de secciones geotécnicas 8, 9 y 11



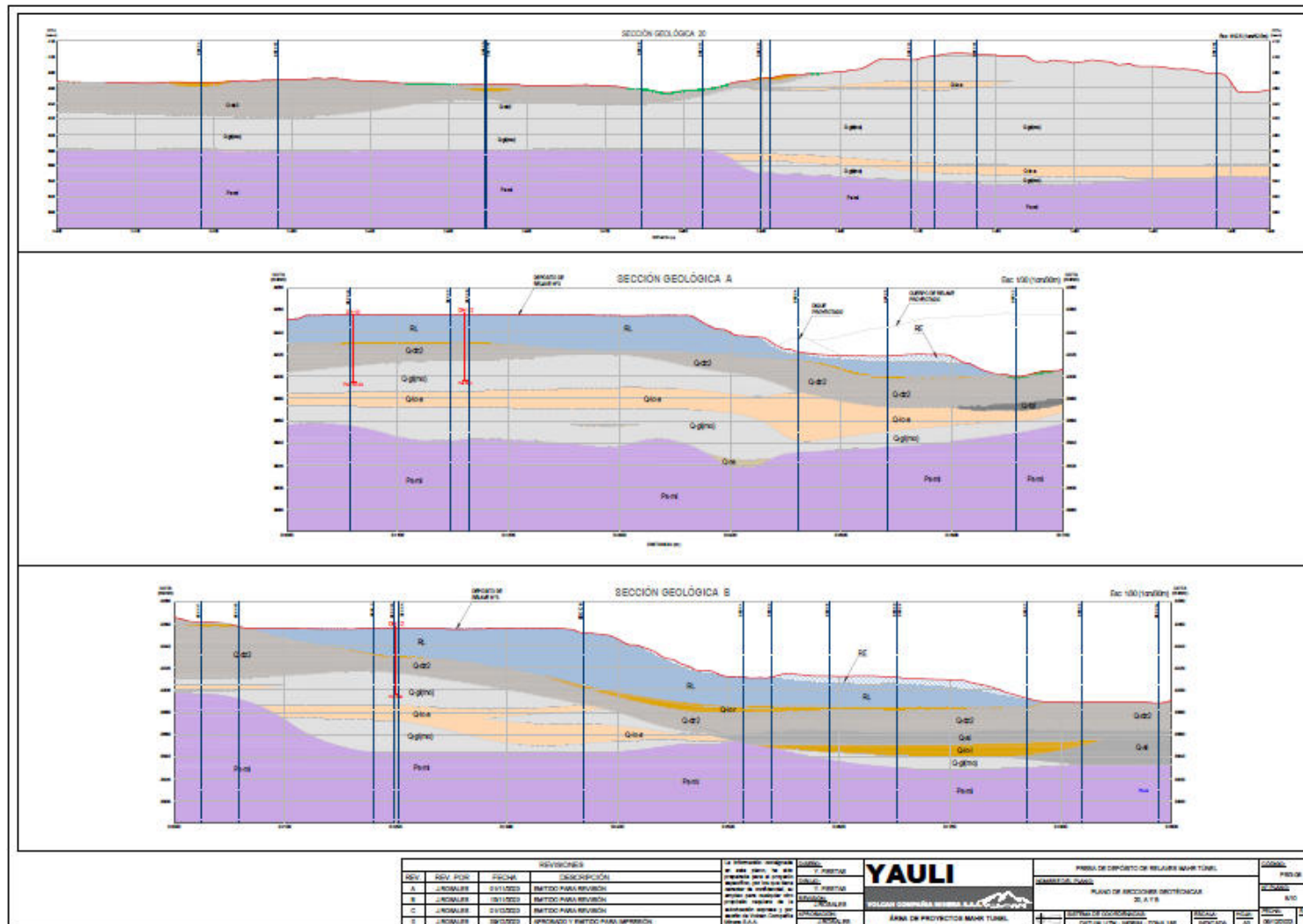
Nota. Elaboración propia.

Apéndice W. Plano de secciones geotécnicas 17, 18 y 19



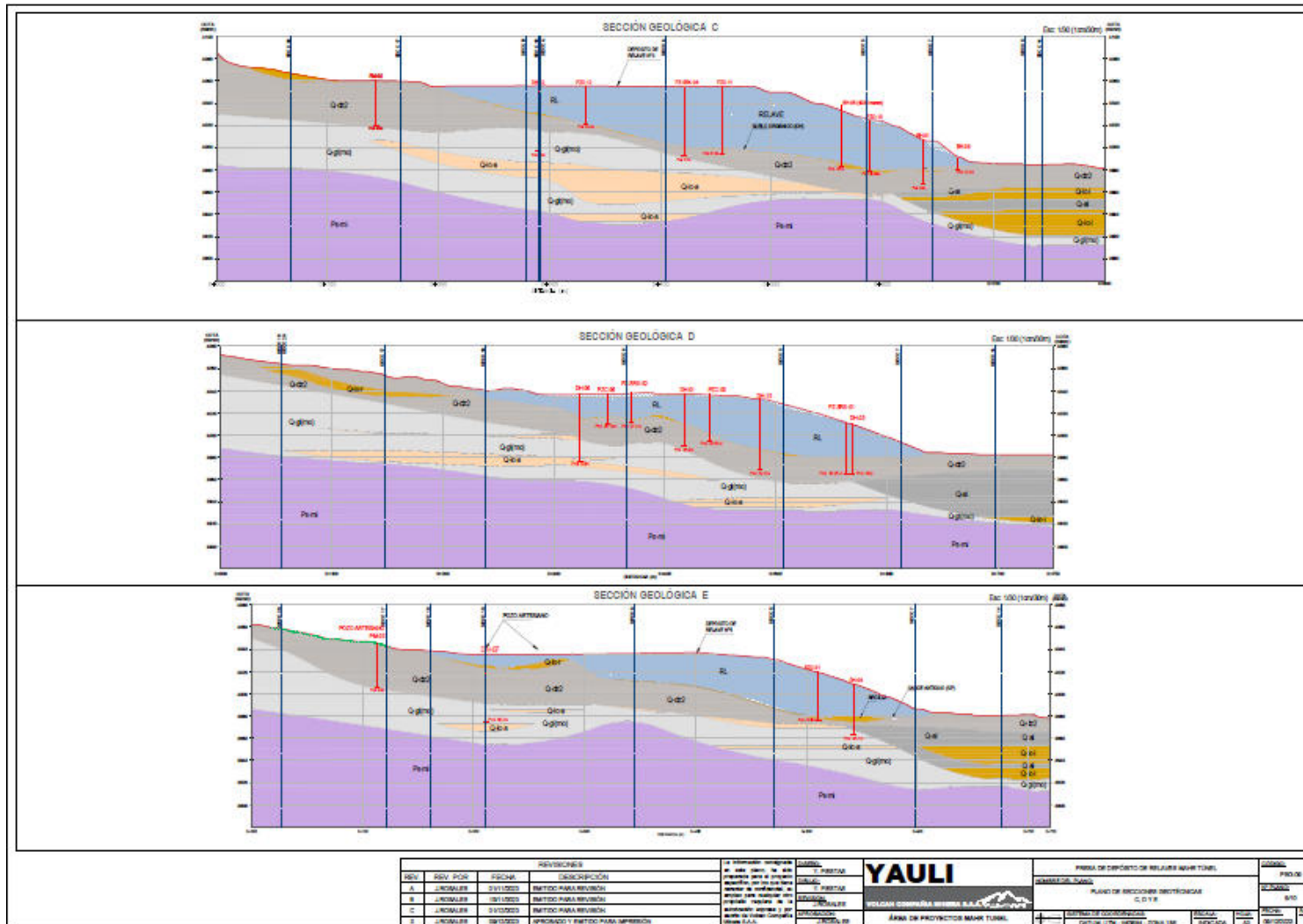
Nota. Elaboración propia.

Apéndice X. Plano de secciones geotécnicas 20, A y B



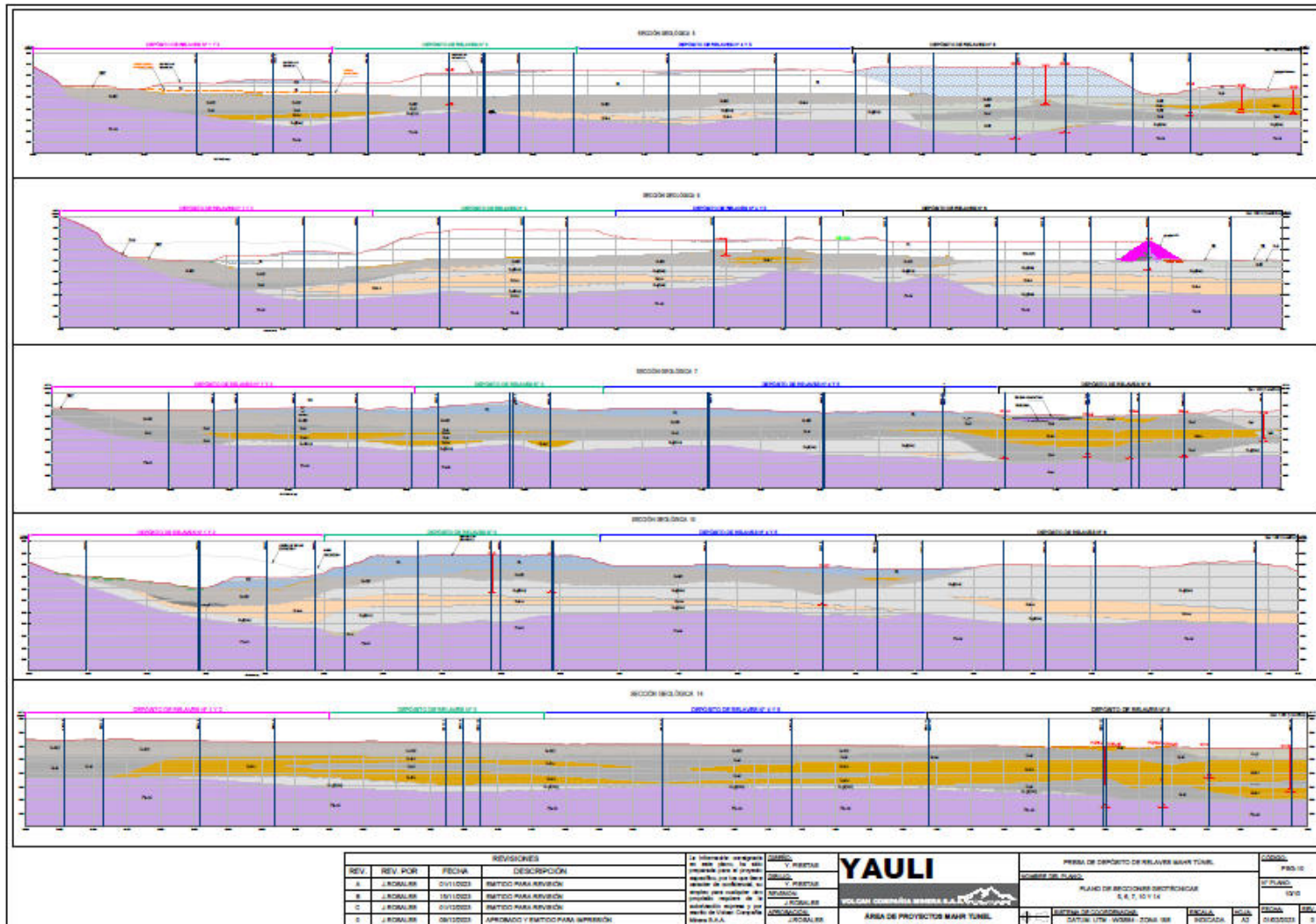
Nota. Elaboración propia.

Apéndice Y. Plano de secciones geotécnicas C, D y E



Nota. Elaboración propia.

Apéndice Z. Plano de secciones geotécnicas 5, 6, 7, 10 y 14



Nota. Elaboración propia.