

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



T E S I S

**Perforación e instalación de instrumentación geotécnica para
garantizar el monitoreo estructural de un PAD de lixiviación – Unidad
minera Pucamarca – MINSUR – 2023**

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Geólogo

Autor:

Bach. Marco Antero AYALA ARANDA

Asesor:

Mg. Luis Arturo LAZO PAGAN

Cerro de Pasco - Perú – 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA GEOLÓGICA



T E S I S

**Perforación e instalación de instrumentación geotécnica para
garantizar el monitoreo estructural de un PAD de lixiviación – Unidad
minera Pucamarca – MINSUR – 2023**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

**Dr. Julio Alejandro MARCELO AMES
PRESIDENTE**

**Mg. Vidal Víctor CALCINA COLQUI
MIEMBRO**

**Mg. Eder Guido ROBLES MORALES
MIEMBRO**



**Universidad Nacional Daniel Alcides
Carrión Facultad de Ingeniería
Unidad de Investigación**

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 194-2024-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

Perforación e instalación de instrumentación geotécnica para garantizar el monitoreo estructural de un PAD de lixiviación – Unidad minera Pucamarca – MINSUR – 2023

Apellidos y nombres del tesista:

Bach. AYALA ARANDA, Marco Antero

Apellidos y nombres del Asesor:

Mg. LAZO PAGAN, Luis Arturo

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Geológica

Índice de Similitud

2 %

APROBADO

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes:

Cerro de Pasco, 4 de octubre del 2024



Firmado digitalmente por MEJA
CACERES Reynaldo FAU
20154605048-soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 04.10.2024 09:24:08 -05:00

DEDICATORIA

Este proyecto de investigación va dedicado a mis Padres Augusto Ayala y Felicitá Aranda por su apoyo incondicional en todo momento, a los Ingenieros de mi alma mater que contribuyeron en mi formación profesional, y a todas las personas que hicieron posible la realización de este proyecto

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, doy infinitamente gracias a Dios, por haberme dado fuerza y valor en el todo el tiempo y las etapas de mi vida.

A todos los profesionales que me apoyaron con experiencias compartidas en mi formación profesional, a mi asesor al MSc. Luis Arturo, LAZO PAGÁN por su apoyo incondicional.

De la misma manera a los docentes de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión de la Escuela de Formación Profesional de Ingeniería Geológica por todas sus enseñanzas a lo largo de mi etapa universitaria

RESUMEN

Este proyecto aborda la importancia de la perforación e instalación de instrumentación geotécnica para garantizar el monitoreo estructural de un PAD de lixiviación, en la Unidad minera Pucamarca considerando el contexto actual de la industria minera en 2023.

El problema de investigación es el PAD de lixiviación, crucial en la industria minera, enfrenta retos en términos de seguridad y estabilidad estructural, dentro de ello se identificaron desafíos específicos en su operación y monitoreo, y se establecieron objetivos claros para resolver estos problemas. El estudio se justifica por la necesidad de garantizar la seguridad y eficiencia en la operación de estos PADS.

Dentro del marco teórico se adjuntaron antecedentes y estudios previos relacionados con la lixiviación y la instrumentación geotécnica. En ello se discuten en detalle los fundamentos de la lixiviación, la instrumentación geotécnica, sus principios, aplicaciones, métodos de instalación, análisis de datos, regulaciones relevantes, y casos de estudio anteriores. También se presentan las normativas y métodos para garantizar la estabilidad y seguridad en los PADs.

La metodología del proyecto de investigación es de tipo aplicada, utilizando un método deductivo. Se especifica el diseño de la investigación, la población de estudio, la muestra seleccionada, y las técnicas de recolección y análisis de datos. Se aborda también el enfoque ético del estudio.

Como resultados y discusión se realiza una descripción detallada del trabajo de campo, ubicación, metodología, y procesos de perforación e instalación de instrumentación. Se presentan y analizan los resultados obtenidos de los instrumentos geotécnicos instalados y se realiza una prueba de las hipótesis planteadas al inicio del

proyecto. Los hallazgos son discutidos en relación con la literatura revisada y los antecedentes de estudio.

El estudio concluye en la relevancia y eficacia de la instrumentación geotécnica para el monitoreo estructural de los PADs de lixiviación. Las hipótesis planteadas fueron probadas y se confirmó la importancia de un sistema robusto de monitoreo para garantizar la seguridad y estabilidad de los PADs.

Las recomendaciones están basadas en los hallazgos de la investigación, priorizando la seguridad, capacitación continua, monitoreo regular, y revisión periódica de la viabilidad técnica y económica del sistema.

Así mismo se adjunta un listado como referencias bibliográficas las literaturas y estudios consultados durante la investigación.

En la parte de anexos se incluyen datos adicionales, gráficos, imágenes, y otros documentos relevantes que complementan el estudio.

Este resumen proporciona una visión general del proyecto de investigación, enfatizando la importancia del monitoreo estructural en PADs de lixiviación mediante la instrumentación geotécnica.

Palabras Clave: PAD de lixiviación, Instrumentación geotécnica, Monitoreo estructural, seguridad, estabilidad estructural.

ABSTRACT

This project addresses the importance of drilling and installation of geotechnical instrumentation to guarantee the structural monitoring of a leaching PAD, in the Pucamarca Mining Unit, considering the current context of the mining industry in 2023.

The research problem is the leaching PAD, crucial in the mining industry, facing challenges in terms of safety and structural stability. Within this, specific challenges were identified in its operation and monitoring, and clear objectives were established to solve these problems. The study is justified by the need to guarantee the safety and efficiency in the operation of these PADS.

Within the theoretical framework, background and previous studies related to leaching and geotechnical instrumentation were attached. It discusses in detail the fundamentals of leaching, geotechnical instrumentation, its principles, applications, installation methods, data analysis, relevant regulations, and previous case studies. The regulations and methods to guarantee stability and security in PADs are also presented.

The methodology of the research project is applied, using a deductive method. The research design, the study population, the selected sample, and the data collection and analysis techniques are specified. The ethical approach of the study is also addressed.

As results and discussion, a detailed description of the field work, location, methodology, and drilling processes and instrumentation installation is made. The results obtained from the installed geotechnical instruments are presented and analyzed and a test of the hypotheses raised at the beginning of the project is carried out. The findings are discussed in relation to the reviewed literature and the study background.

The study concludes on the relevance and effectiveness of geotechnical instrumentation for structural monitoring of leaching PADs. The proposed hypotheses

were tested and the importance of a robust monitoring system to guarantee the security and stability of the PADs was confirmed.

The recommendations are based on the research findings, prioritizing safety, continuous training, regular monitoring, and periodic review of the technical and economic feasibility of the system.

Likewise, a list is attached as bibliographic references of the literatures and studies consulted during the research.

Additional data, graphs, images, and other relevant documents that complement the study are included in the annexes.

This summary provides an overview of the research project, emphasizing the importance of structural monitoring in leaching PADs using geotechnical instrumentation.

Keywords: Leaching PAD, Geotechnical instrumentation, Structural monitoring, safety, structural stability.

INTRODUCCIÓN

La minería es un pilar de muchas economías y un factor clave en el desarrollo y progreso de numerosas comunidades. En este contexto, los PADs de lixiviación emergen como una parte esencial en la extracción de minerales, permitiendo que los metales sean separados del resto de materiales no deseados. Pero como todo proceso industrial, presenta riesgos.

Uno de los desafíos más prominentes al operar un PAD de lixiviación en la unidad minera Pucamarca, es garantizar que su estructura sea segura y estable en todo momento. Imagina que estás en medio de un procedimiento crítico y de repente, el suelo bajo tus pies comienza a ceder. No solo podría ser una pérdida financiera, sino también un riesgo para la seguridad humana y ambiental. Aquí radica la esencia de nuestro problema: sin una forma efectiva de monitorear la estabilidad de estos PADs, estamos en constante riesgo de enfrentar fallos catastróficos.

Múltiples factores pueden amenazar la estabilidad de un PAD de lixiviación. Desde el clima, la composición del suelo, la humedad, y por supuesto, el mismo proceso de lixiviación que, aunque esencial, puede ejercer tensiones sobre la estructura. Si no somos proactivos, estas tensiones pueden culminar en deformaciones, agrietamientos o, en el peor de los casos, un colapso completo.

Para combatir esto, este proyecto de investigación propone una solución proactiva: usar la tecnología y la ciencia para nuestro beneficio. Mediante la perforación e instalación de instrumentación geotécnica, queremos ser los "ojos y oídos" en el corazón de estos PADs. Este sistema de monitoreo estructural nos dará la capacidad de detectar y prevenir cualquier anomalía antes de que se convierta en un problema mayor.

INDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

INDICE

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. IDENTIFICACIÓN Y DETERMINACIÓN DEL PROBLEMA	1
1.2. DELIMITACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	2
1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	4
1.3.1. Problema general	4
1.3.2. Problemas específicos.....	4
1.4. FORMULACIÓN DE OBJETIVOS.....	5
1.4.1. Objetivo general	5
1.4.2. Objetivos específicos	5
1.5. JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	6
1.6. LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN.....	7

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES DE ESTUDIO.....	9
2.1.1. A nivel internacional	9

2.1.2.	A nivel nacional.....	12
2.1.3.	A nivel regional y/o local	13
2.2.	BASES TEÓRICAS – CIENTÍFICAS	15
2.2.1.	Fundamentos de la lixiviación y su importancia en la industria minera. ..	15
2.2.2.	Instrumentación geotécnica: tipos, principios físicos y aplicaciones.....	17
2.2.3.	Métodos de perforación e instalación de instrumentación geotécnica en los PADS de lixiviación.....	21
2.2.4.	Análisis de datos de instrumentación geotécnica para el monitoreo estructural de los PADS de lixiviación.....	25
2.2.5.	Seguridad en la minería y regulaciones relevantes para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica.	28
2.2.6.	Evaluación de la estabilidad física y operativa de los PADS de lixiviación mediante el análisis geotécnico.	32
2.2.7.	Casos de estudio sobre la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en los PADS de lixiviación.	35
2.2.8.	Normativas y estándares internacionales para el monitoreo estructural de los PADS de lixiviación.....	39
2.2.9.	Métodos para minimizar los riesgos de erosión y lixiviación de metales en los PADS de lixiviación.	42
2.2.10.	Monitoreo continuo y la importancia de la prevención de fallas en los PADS de lixiviación.	46
2.3.	DEFINICIÓN DE TÉRMINOS BÁSICOS	50
2.4.	FORMULACIÓN DE HIPÓTESIS.....	51
2.4.1.	Hipótesis general	51
2.4.2.	Hipótesis específicas.....	52

2.5.	IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES.....	52
2.5.1.	Variable independiente.....	52
2.5.2.	Variable Interviniente.....	53
2.6.	DEFINICIÓN OPERACIONAL DE VARIABLES E INDICADORES.....	53

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1.	TIPO DE INVESTIGACIÓN.....	56
3.2.	NIVEL DE INVESTIGACIÓN.....	57
3.3.	MÉTODOS DE INVESTIGACIÓN.....	57
3.4.	DISEÑO DE INVESTIGACIÓN.....	58
3.5.	POBLACIÓN Y MUESTRA.....	60
3.5.1.	Población.....	60
3.5.2.	Muestra.....	60
3.6.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCIÓN DE DATOS.....	60
3.7.	TÉCNICAS DE PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE DATOS.....	61
3.8.	TRATAMIENTO ESTADÍSTICO.....	61
3.9.	ORIENTACIÓN ÉTICA FILOSOFICA Y EPISTEMICA.....	62

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE CAMPO.....	64
4.1.1.	Ubicación y accesibilidad.....	64
4.1.2.	Metodología de trabajo utilizada.....	67
4.1.3.	Trabajos preliminares.....	70
4.1.4.	Perforación diamantina DDH.....	70
4.1.5.	Perforación en el punto ING/PCV-PU21-021.....	75

4.1.6.	Determinación de RQD en tramos de las muestras mayor a 50 %	78
4.1.7.	Instalación de instrumentación geotécnica en el punto ING/PCV-PU21-021.	79
4.1.8.	Perforación en el punto ING/PCV-PU21-022.....	82
4.1.9.	Instalación de instrumentación geotécnica en el punto ING/PCV-PU21-022.	85
4.1.10.	Encofrado y protección de tubería (case) inclinométrica y sensores.....	86
4.1.11.	Instalación de nodos de telemetría.....	87
4.2.	PRESENTACIÓN, ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	89
4.2.1.	Primeras lecturas de los piezómetros de cuerda vibrante y análisis de resultados.....	89
4.2.2.	Punto ING/PCV-PU21-021.....	90
4.3.	PRUEBA DE HIPÓTESIS	101
4.3.1.	Prueba de Hipótesis 1	101
4.3.2.	Prueba de Hipótesis 2	103
4.3.3.	Prueba de Hipótesis 3	105
4.3.4.	Prueba de Hipótesis 4	107
4.3.5.	Prueba de Hipótesis 5	109
4.4.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	112

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ubicación de sondajes diamantinos en PAD de lixiviación FASE 3D.	67
Tabla 2: Profundidades indicadas para recuperación de muestras.	69
Tabla 3: Profundidades finales alcanzadas en línea HQ y HW EN EL PUNTO ING/PCV- PU21-021.	76
Tabla 4: Corridas de recuperación en HQ EN EL PUNTO ING/PCV-PU21-021.	77
Tabla 5: Profundidades de instalación de sensores ING/PCV-PU21-021 (Fuente: Propio)	80
Tabla 6: Características de los sensores (piezómetros de cuerda vibrante) (Fuente: Propio)	81
Tabla 7: Profundidades finales alcanzadas en línea HQ y HW EN EL PUNTO ING/PCV- PU21-022.	82
Tabla 8: Recuperación de testigos diamantinos a partir de contacto con roca en el punto ING/PCV-PU21-022.....	83
Tabla 9: Profundidades de instalación de sensores ING/PCV-PU21-022. (Fuente: Propio)	85
Tabla 10: Descripción de sensores instalados ING/PCV-PU21-022 (Fuente: Propio) ..	86
Tabla 11: Sondajes programados vs los ejecutados (Fuente: Propio)	89
Tabla 12: Primeras lecturas de sensores instalados ING/PCV-PU21-021 (Fuente: Propio)	90
Tabla 13: Primeras lecturas para la instalación de cada uno de los sensores (PCV-PU21- 022A, PCV-PU21-022B) (Fuente: Propio).....	92
Tabla 14: Datos recolectados del análisis geotécnico del PAD de lixiviación.....	102
Tabla 15: Monitoreo de la estabilidad del PAD de lixiviación.....	104
Tabla 16: Resultados tras la implementación de procedimientos adecuados	106

Tabla 17: Resultados tras establecer un plan de monitoreo continuo y análisis de datos (Fuente: Propio)	108
Tabla 18: Comparación de costos y beneficios tras la evaluación económica y técnica del sistema de monitoreo estructural (Fuente: Propio)	110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Ubicación de Unidad Minera Pucamarca (Fuente. propio).....	65
Figura 2: PAD DE LIXIVIACION FASE 3D dentro de las instalaciones la UM Pucamarca (Fuente: Propio).....	66
Figura 3:Perfil de sondajes diamantinos en PAD de lixiviación FASE 3D (Fuente: Propio)	69
Figura 4: Saturación de piezómetros de cuerda vibrante (Fuente: Propio).....	74
Figura 5: Punto de perforación ING/PCV-PU21-021 en PAD de lixiviación FASE 3D (Fuente: Propio)	75
Figura 6: Punto de perforación ING/PCV-PU21-022 en PAD de lixiviación FASE 3D (Fuente: Propio)	82
Figura 7: Perfil final de detalle de Instalación de la instrumentación geotécnica (Fuente: Propio)	91
Figura 8: Se tiene el perfil final de detalle de Instalación de la instrumentación geotécnica (Fuente: Propio)	92
Figura 9: Vista general de datos del piezómetro de cuerda vibrante (Fuente: Propio)...	93
Figura 10: Vista general de datos del piezómetro de cuerda vibrante (Fuente: Propio).	94
Figura 11: Vista general de datos del piezómetro de cuerda vibrante PU.PCV-021-021A	95
Figura 12: Vista general de datos del piezómetro de cuerda vibrante PU.PCV-021-021B	95
Figura 13: Vista general de datos del piezómetro de cuerda vibrante PU.PCV-021-021C	96
Figura 14: Vista general de datos del piezómetro de cuerda vibrante PU.PCV-021-022A	96

Figura 15: Vista general de datos del piezómetro de cuerda vibrante PU.PCV-021-022B	97
Figura 16: Sistema inclino métrico MEMS	97
Figura 17: Orientación de la sonda dentro de la carcasa del inclinómetro	98
Figura 18: Primera lectura del casing inclinométrico (Fuente: Propio).....	99
Figura 19: Deformación lateral acumulada con la profundidad (Fuente: Propio)	100
Figura 20: Plano As-Built final de la instrumentación geotécnica instalada (Fuente: Propio)	101

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

El problema identificado en el proyecto de investigación "PERFORACIÓN E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA PARA GARANTIZAR EL MONITOREO ESTRUCTURAL DE UN PAD DE LIXIVIACIÓN – UNIDAD MINERA PUCAMARCA – MINSUR - 2023", la operación de un PAD de lixiviación puede generar tensiones y esfuerzos en la estructura del PAD, lo que puede provocar la deformación, agrietamiento o colapso del mismo. Esto puede ser causado por una variedad de factores, como la composición del suelo, la intensidad del proceso de lixiviación, el clima y la humedad, entre otros. Por lo tanto, es necesario implementar un sistema de monitoreo estructural que permita detectar cualquier cambio en la estabilidad del PAD de lixiviación y tomar medidas preventivas antes de que se produzca una falla o colapso.

El objetivo del proyecto es entonces diseñar e implementar un sistema de monitoreo estructural confiable y efectivo, mediante la perforación e instalación

de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación. Esto permitirá el monitoreo continuo de las tensiones, deformaciones y desplazamientos en la estructura del PAD, lo que permitirá detectar cualquier cambio en su estabilidad y tomar medidas preventivas para garantizar la seguridad y la continuidad de la operación minera.

La determinación del problema en el proyecto de investigación "PERFORACIÓN E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA PARA GARANTIZAR EL MONITOREO ESTRUCTURAL DE UN PAD DE LIXIVIACIÓN – UNIDAD MINERA PUCAMARCA – MINSUR - 2023" se basó en la identificación de la necesidad de garantizar la seguridad y estabilidad del PAD de lixiviación durante su operación. Para determinar el problema, se llevó a cabo un análisis de riesgos en el sitio minero, evaluando las posibles causas de fallas y colapsos en la estructura del PAD de lixiviación, tales como la presión hidráulica, la erosión, la vibración, el clima y la humedad. Se encontró que la falta de monitoreo continuo y confiable de la estabilidad del PAD de lixiviación era un problema crítico que requería una solución.

Se determinó que la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación permitiría el monitoreo continuo de las tensiones, deformaciones y desplazamientos en la estructura del PAD, lo que permitiría detectar cualquier cambio en su estabilidad y tomar medidas preventivas antes de que ocurra una falla o colapso.

1.2. Delimitación de la investigación

La delimitación de la investigación en el proyecto "PERFORACIÓN E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA PARA

GARANTIZAR EL MONITOREO ESTRUCTURAL DE UN PAD DE LIXIVIACIÓN – UNIDAD MINERA PUCAMARCA – MINSUR - 2023" se refiere a los límites y alcances del estudio, incluyendo las variables, el contexto y la temporalidad.

- En cuanto a las variables, la investigación se enfoca en la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en un PAD de lixiviación específico, y su impacto en el monitoreo estructural para garantizar la seguridad y la estabilidad de la estructura. Las variables pueden incluir la composición del suelo, la intensidad del proceso de lixiviación, la ubicación geográfica y las condiciones climáticas.
- En cuanto al contexto, la investigación se desarrolla en el ámbito minero, específicamente en una mina donde se lleva a cabo el proceso de lixiviación. El contexto incluye el equipo y la maquinaria utilizados en la perforación e instalación de instrumentación geotécnica, los procedimientos y estándares de seguridad utilizados en la mina, y los aspectos legales y regulatorios relevantes.
- En cuanto a la temporalidad, la investigación se enfoca en el año 2023, el cual es el año en que se llevará a cabo la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación específico. La temporalidad también puede incluir el período de tiempo en el que se llevará a cabo el monitoreo estructural, que puede ser a largo plazo para garantizar la seguridad y la estabilidad del PAD de lixiviación.
- En resumen, la delimitación de la investigación se enfoca en la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en un PAD de lixiviación

específico en el ámbito minero, durante el año 2023, con el objetivo de garantizar la seguridad y la estabilidad de la estructura a largo plazo.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

La formulación del problema principal en el proyecto de investigación "PERFORACIÓN E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA PARA GARANTIZAR EL MONITOREO ESTRUCTURAL DE UN PAD DE LIXIVIACIÓN – UNIDAD MINERA PUCAMARCA – MINSUR - 2023" es:

¿Cómo diseñar e implementar un sistema de monitoreo estructural confiable y efectivo mediante la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en un PAD de lixiviación para garantizar la seguridad y la estabilidad de la estructura durante su operación?

1.3.2. Problemas específicos

- ¿Cuáles son las características geotécnicas del PAD de lixiviación y su entorno que deben considerarse para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica?
- ¿Cuáles son los tipos de instrumentación geotécnica adecuados para el monitoreo estructural del PAD de lixiviación, y cuál es su ubicación óptima en la estructura?
- ¿Cuáles son los procedimientos adecuados para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación, y cómo se puede garantizar la seguridad y la eficiencia del proceso?
- ¿Cómo se debe llevar a cabo el monitoreo y análisis de datos de la instrumentación geotécnica para detectar cualquier cambio en la

estabilidad del PAD de lixiviación, y qué acciones preventivas se deben tomar en caso de detectar cambios significativos?

- ¿Cuál es el costo económico y el tiempo necesario para el diseño e implementación del sistema de monitoreo estructural mediante la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación, y cómo se puede justificar su viabilidad económica y técnica?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Implementar un sistema de monitoreo estructural confiable y efectivo mediante la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en un PAD de lixiviación para garantizar la seguridad y la estabilidad de la estructura durante su operación.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar un análisis geotécnico del PAD de lixiviación y su entorno para determinar las características relevantes para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica.
- Identificar los tipos de instrumentación geotécnica adecuados para el monitoreo estructural del PAD de lixiviación y definir su ubicación óptima en la estructura.
- Desarrollar los procedimientos adecuados para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación, asegurando la seguridad y la eficiencia del proceso.

- Establecer un plan de monitoreo continuo y análisis de datos de la instrumentación geotécnica para detectar cualquier cambio en la estabilidad del PAD de lixiviación y tomar medidas preventivas.
- Evaluar la viabilidad económica y técnica del sistema de monitoreo estructural mediante la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación.

1.5. Justificación de la investigación

La justificación de la investigación en el proyecto "PERFORACIÓN E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA PARA GARANTIZAR EL MONITOREO ESTRUCTURAL DE UN PAD DE LIXIVIACIÓN – UNIDAD MINERA PUCAMARCA – MINSUR - 2023" se basa en la necesidad de garantizar la seguridad y la estabilidad de los PADs de lixiviación en entornos mineros, y la importancia del monitoreo estructural para lograr este objetivo.

La lixiviación es un proceso ampliamente utilizado en la industria minera para la extracción de metales valiosos, y los PADs de lixiviación son una estructura clave en este proceso. Sin embargo, estos PADs están sujetos a tensiones y esfuerzos que pueden provocar deformaciones, agrietamiento o colapso, lo que puede ser peligroso para los trabajadores de la mina y las comunidades cercanas.

El monitoreo estructural continuo y confiable es esencial para garantizar la seguridad y la estabilidad de los PADs de lixiviación durante su operación, y prevenir posibles fallas o colapsos. La perforación e instalación de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación permite el monitoreo continuo de las tensiones, deformaciones y desplazamientos en la estructura, lo

que permite detectar cualquier cambio en su estabilidad y tomar medidas preventivas antes de que ocurra una falla o colapso.

Por lo tanto, la justificación de la investigación radica en la necesidad de diseñar e implementar un sistema de monitoreo estructural confiable y efectivo mediante la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación, lo que permitirá garantizar la seguridad y la estabilidad de la estructura durante su operación, y prevenir posibles fallas o colapsos que puedan poner en riesgo la seguridad de las personas y la continuidad de la operación minera. Además, los resultados del estudio pueden ser utilizados para mejorar las prácticas de monitoreo estructural y la seguridad en otros proyectos mineros similares en el futuro.

1.6. Limitaciones de la investigación

Las limitaciones de la investigación en el proyecto "PERFORACIÓN E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA PARA GARANTIZAR EL MONITOREO ESTRUCTURAL DE UN PAD DE LIXIVIACIÓN – UNIDAD MINERA PUCAMARCA – MINSUR - 2023" son:

- Limitaciones en la disponibilidad de datos: La investigación depende de la disponibilidad de datos geotécnicos y operativos del PAD de lixiviación, y la falta de datos relevantes puede limitar la precisión y validez de los resultados.
- Limitaciones en el acceso al sitio: El acceso al sitio minero puede ser limitado debido a restricciones de seguridad, lo que puede restringir la capacidad de llevar a cabo la perforación e instalación de instrumentación geotécnica y el monitoreo estructural.

- Limitaciones en el tiempo: La investigación se centra en el año 2023 y puede haber limitaciones en el tiempo disponible para llevar a cabo la perforación e instalación de instrumentación geotécnica y el monitoreo estructural.
- Limitaciones en el presupuesto: La perforación e instalación de instrumentación geotécnica puede ser un proceso costoso y limitaciones en el presupuesto pueden restringir la cantidad y calidad de la instrumentación geotécnica instalada, lo que puede afectar la precisión y validez de los resultados.
- Limitaciones en la generalización: La investigación se enfoca en un PAD de lixiviación específico en un contexto minero particular, y los resultados pueden no ser generalizables a otros entornos mineros con características geotécnicas diferentes.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

2.1.1. A nivel internacional

Nowak, Samuel et al. (2024), en su tesis Doctoral: “NOVEL USES OF DISTRIBUTED OPTICAL FIBER SENSING FOR GEOMECHANICAL MONITORING”, con el objetivo de monitorear la masa rocosa en las excavaciones subterráneas es crucial para garantizar la seguridad y la eficiencia en el lugar de trabajo. A medida que las minas se vuelven más profundas y complejas, la necesidad de monitorear mayores volúmenes de roca durante la minería se vuelve poco práctica con los instrumentos existentes debido a los altos costos. La detección de fibra óptica distribuida (DOFS) es una tecnología poderosa con ventajas como la longitud del sensor largo, las capacidades de medición en tiempo real, la facilidad de instalación, el bajo costo y la medición distribuida. Sin embargo, su aplicación en el monitoreo de macizos rocosos es limitada, especialmente en la industria minera. Este estudio aborda una brecha importante en la tecnología DOFS, específicamente la incapacidad de los

sensores de deformación de fibra óptica distribuida de largo alcance para detectar grietas en medios frágiles. Para superar esto, se desarrolló un cable de fibra óptica híbrido (HOFC) especializado, que permite el autoanclaje en espacios confinados como pozos con lechada. Las pruebas a escala de laboratorio demostraron la precisión del HOFC para la detección de deformación distribuida en medios frágiles. A continuación, el HOFC se utilizó en un estudio de monitoreo a escala de campo en una mina subterránea activa durante una operación de remoción de salas y pilares. Los resultados del monitoreo permitieron identificar la deformación del macizo rocoso y evaluar los daños a la infraestructura crítica de la mina. Se desarrolló un modelo numérico a escala de mina basado en pruebas de laboratorio, interpretaciones geológicas y análisis de ingeniería, lo que permitió una comparación directa entre los resultados del modelo y las mediciones de campo"

Daramola, S. O., Hingston, E. D. C., y Demlie, M. (2024). Una revisión de los suelos lateríticos y su uso como revestimientos de vertederos. No se puede exagerar el papel de un revestimiento de vertedero en el proceso de gestión de residuos. Por lo general, están hechos de suelos arcillosos o materiales geosintéticos, o ambos, con el único propósito de controlar la migración de lixiviados hacia los acuíferos y suelos subyacentes, evitando así la contaminación. La limitada disponibilidad de suelos arcillosos y el alto costo de los geosintéticos han requerido la búsqueda y el uso de diferentes materiales disponibles localmente. Los suelos lateríticos son uno de los materiales más utilizados para los revestimientos de vertederos en las zonas tropicales, donde se encuentran comúnmente. Sin embargo, no se ha informado de una revisión exhaustiva de la literatura sobre la utilización de suelos lateríticos como

revestimientos de vertederos. La realización de una revisión sistemática de los suelos lateríticos para aplicaciones de revestimiento de vertederos permite una mejor comprensión de sus características inherentes y su idoneidad. Esto, a su vez, proporciona información vital para el diseño y la construcción de sistemas de contención de residuos eficaces y económicamente sostenibles. Por lo tanto, este artículo revisa la naturaleza y las características de los suelos lateríticos y evalúa su idoneidad para aplicaciones de revestimiento de vertederos a través de una evaluación exhaustiva de las propiedades geotécnicas, geológicas y geoquímicas deseables basadas en la literatura y los datos disponibles. Los datos sobre el índice y las características geotécnicas de los suelos lateríticos en doscientas setenta y ocho localidades de diferentes países se recopilaron de la bibliografía y se evaluaron en función de las especificaciones estándar para los revestimientos de los vertederos. Además, se presentan sus características de atenuación de lixiviados y la mejora de su idoneidad para los revestimientos de vertederos a través de modificaciones de la propiedad. Los resultados de la revisión indican que los suelos lateríticos poseen propiedades de ingeniería adecuadas con algunas composiciones mineralógicas arcillosas interesantes para aplicaciones de revestimiento. Además, las propiedades geotécnicas deseables de los suelos lateríticos también pueden mejorarse mezclándolos con bentonita, cenizas volantes, aserrín y relaves mineros. Aunque las transformaciones mineralógicas ocurren después de la permeación con lixiviados de vertedero, los suelos lateríticos poseen características de atenuación de contaminantes como baja difusión, buena sorción y propiedades de intercambio catiónico que son necesarias para aplicaciones de revestimiento de vertederos.

2.1.2. A nivel nacional

Pérez et al. (2019), en su investigación "Evaluación de la estabilidad física y operativa del PAD de Lixiviación en la Mina de Yanacocha", tuvo como objetivo evaluar la estabilidad física y operativa del PAD de Lixiviación en la Mina de Yanacocha, en Perú. Para ello, se llevaron a cabo inspecciones visuales, análisis geotécnicos y modelamiento numérico para determinar la estabilidad del PAD en términos de deformaciones, tensiones y esfuerzos. Los resultados del estudio indican que la estabilidad física del PAD es adecuada, pero existen áreas con riesgo de deformaciones y colapsos debido a la alta humedad del suelo. Además, se identificaron oportunidades para mejorar la eficiencia operativa del PAD y reducir el tiempo y los costos de producción.

Concluye destacando la importancia del monitoreo continuo y el análisis geotécnico en la evaluación de la estabilidad de los PADs de lixiviación. Además, el estudio enfatiza la necesidad de considerar tanto la estabilidad física como la eficiencia operativa en la evaluación de los PADs de lixiviación. Los resultados del estudio pueden ser utilizados para mejorar las prácticas de monitoreo y gestión de los PADs de lixiviación en la industria minera en Perú y en otros países.

Flores et al. (2018), en su tesis: "Análisis de la estabilidad física y química del PAD de Lixiviación en la Mina Antapaccay", tuvo como objetivo analizar la estabilidad física y química del PAD de Lixiviación en la Mina Antapaccay, en Perú. Se llevaron a cabo pruebas geotécnicas y análisis químicos para determinar la estabilidad del PAD en términos de deformaciones, erosión y lixiviación de metales en el suelo. Los resultados del estudio indican que el PAD de lixiviación es estable en términos físicos y químicos, aunque se identificaron algunas áreas con riesgo de erosión y lixiviación de metales. Además, el estudio sugiere la

necesidad de implementar medidas preventivas para minimizar los riesgos de erosión y lixiviación de metales en el PAD de lixiviación.

Concluye destacando la importancia de considerar tanto la estabilidad física como la química en la evaluación de los PADs de lixiviación. Además, el estudio enfatiza la necesidad de implementar medidas preventivas para minimizar los riesgos de erosión y lixiviación de metales en los PADs de lixiviación. Los resultados del estudio pueden ser utilizados para mejorar las prácticas de monitoreo y gestión de los PADs de lixiviación en la industria minera en Perú y en otros países.

2.1.3. A nivel regional y/o local

Cacho, Maria et al (2022), en su investigación “Aplicación de la metodología BIM en el diseño del Pad de Lixiviación de la Unidad Minera Pucamarca – Tacna”, con el objetivo de identificar las acciones requeridas para cumplirlos con éxito, por lo tanto, la primera acción primordial que debemos tomar como responsables de la planificación y gestión de un proyecto es asegurarnos que el proyecto se encuentre verificado en todos sus niveles: Diseño de ingeniería, Presupuesto y Especificaciones Técnica.

Siendo la metodología BIM una herramienta que optimiza el desarrollo del diseño de los proyectos de construcción es importante promover su uso e implementación, sobre todo en proyectos donde se tienen grandes volúmenes de materiales y diferentes especialidades que intervienen en su ejecución como es el caso de la construcción de los PAD de lixiviación, los cuales cuentan con un sistema de tuberías que recogen la solución disuelta del mineral extraído (solución rica) y la trasladan hasta las plantas de procesos para obtener los productos finales: oro, plata, cobre, etc.

Gambeta, Michell, Figueroa Italo, Prado Luz et al. (2019), en su trabajo de investigación: “Lecciones aprendidas de la Gestión de los Riesgos de Permisos aplicado al proyecto construcción del Pad Fase 3B y depósito de desmonte Norte, ubicado en una unidad minera, Tacna”, se realizó una evaluación y análisis al gerenciamiento de un proyecto de infraestructura minera, específicamente a la etapa de la gestión de los permisos, antes y durante la construcción, asimismo se analizaron los resultados que se obtuvieron, y en base a ello presentaremos una propuesta de valor que consiste en una serie de lecciones aprendidas para mejorar estos resultados en proyectos futuros de construcción en el rubro minero. El caso práctico en donde se aplicará la propuesta de mejora es en el proyecto ya ejecutado “Construcción del Pad Fase 3B y Depósito de Desmonte Norte” en la Unidad Minera Pucamarca, en el departamento de Tacna, en el cual se tuvieron impactos principalmente en tiempo y costo, debido a riesgos referidos a permisos que no fueron identificados, a pesar de contar con un procedimiento para la gestión del cambio, gestión de proyectos y para la gestión de riesgos, los cuales finalmente causaron impactos durante la etapa de ejecución del proyecto. Luego de analizar y cuantificar estos riesgos suscitados durante la construcción, se demostró con la propuesta de valor que estos impactos pueden ser controlados y minimizados con un adecuado seguimiento al cumplimiento de los procedimientos con los que ya cuenta la Unidad Minera Pucamarca, en donde la importancia del control de las revisiones y aprobaciones deben ser realizados en cada una de las fases del proyecto y en cada una de las áreas involucradas del proyecto, de tal forma que se realicen diseños acordes a los parámetros y normativa aplicable en el rubro minero, y de esta forma asegurar el éxito del proyecto.

2.2. Bases teóricas – científicas

2.2.1. Fundamentos de la lixiviación y su importancia en la industria minera.

La lixiviación es un proceso ampliamente utilizado en la industria minera para la extracción de metales valiosos a partir de minerales de baja ley o de minerales refractarios que no pueden ser procesados por otros medios convencionales. El proceso de lixiviación se basa en la disolución selectiva de los metales de interés en una solución acuosa mediante el uso de un agente lixivante, como el ácido sulfúrico, el ácido clorhídrico, el cianuro de sodio o el cloruro férrico, entre otros.

La lixiviación es una técnica eficaz para la recuperación de metales valiosos, como el oro, la plata, el cobre, el uranio y otros metales, y se utiliza en diferentes tipos de minas, incluyendo minas a cielo abierto y minas subterráneas. El proceso de lixiviación también puede ser utilizado en la recuperación de metales de desechos electrónicos y otros residuos, lo que lo convierte en un proceso importante para la industria de la recuperación de metales.

La importancia de la lixiviación en la industria minera radica en su capacidad para procesar minerales de baja ley o minerales refractarios que no pueden ser procesados por otros medios convencionales. Además, la lixiviación es un proceso eficiente y rentable para la recuperación de metales valiosos, lo que lo convierte en una técnica esencial para la industria minera.

Los fundamentos de la lixiviación se basan en la cinética de la disolución de los metales en la solución lixivante y la termodinámica de la reacción de disolución. La cinética de la disolución se refiere a la velocidad de disolución de los metales en la solución lixivante y puede ser influenciada por diferentes

factores, como la concentración del agente lixivante, la temperatura, el tamaño de partícula del mineral, el contenido mineralógico y otros factores.

La termodinámica de la reacción de disolución se refiere a la energía requerida para disolver los metales en la solución lixivante y puede ser influenciada por la acidez de la solución, la presencia de otros iones en la solución y otros factores. La disolución de los metales puede ser influenciada por diferentes factores, como la concentración del agente lixivante, la temperatura, el tamaño de partícula del mineral, el contenido mineralógico y otros factores.

La eficacia de la lixiviación depende de diferentes factores, incluyendo el tipo de mineral, el tipo de agente lixivante utilizado, la concentración del agente lixivante, la temperatura, la presencia de otros iones en la solución, el tamaño de partícula del mineral y otros factores. Además, la eficacia de la lixiviación también puede ser influenciada por factores ambientales, como la humedad, la calidad del agua, la topografía y otros factores.

Para mejorar la eficacia de la lixiviación y reducir los costos de producción, se han desarrollado diferentes técnicas y tecnologías, incluyendo la lixiviación en pilas, la lixiviación en tanques y la lixiviación

La lixiviación es uno de los procesos más esenciales y antiguos en la industria minera. Se refiere a la extracción de componentes solubles de un mineral a través de un disolvente, generalmente una solución acuosa. Este procedimiento implica la disolución de los componentes metálicos de interés en el disolvente, lo que facilita su posterior separación y purificación.

Históricamente, la lixiviación ha sido utilizada en la minería principalmente para la extracción de metales como el oro, la plata y el cobre. Estos metales se encuentran, a menudo, en forma de óxidos, sulfuros o

carbonatos, y el proceso de lixiviación permite separar el metal del resto de las impurezas, lo que no sería posible con técnicas convencionales de fundición o mecánicas.

La importancia de la lixiviación en la industria minera es incuestionable. Primero, permite la obtención de metales a partir de minerales de baja ley, lo que hace económicamente viable el procesamiento de depósitos minerales que de otro modo serían descartados. En segundo lugar, comparado con métodos tradicionales como la fundición, la lixiviación puede ser menos dañina para el medio ambiente, ya que se pueden emplear soluciones más benignas y generar menos emisiones.

Además, con el auge de la tecnología y la innovación, el proceso de lixiviación ha evolucionado. Hoy en día, se utilizan diferentes agentes lixiviantes y técnicas mejoradas, como la lixiviación en pilas, en bateas o in situ, dependiendo de la naturaleza del mineral y de las condiciones del yacimiento.

El desarrollo y perfeccionamiento constante de las técnicas de lixiviación reflejan la creciente demanda mundial de metales y la necesidad de procesar minerales de manera eficiente y sostenible. En este sentido, la lixiviación juega un papel crucial, permitiendo que la industria minera se adapte a los desafíos actuales y garantice un suministro constante de recursos esenciales para la sociedad moderna.

2.2.2. Instrumentación geotécnica: tipos, principios físicos y aplicaciones.

La instrumentación geotécnica es un conjunto de técnicas y herramientas utilizadas para medir y monitorear los parámetros geotécnicos, como tensiones, deformaciones, presiones y desplazamientos, en diferentes estructuras geotécnicas, como presas, puentes, túneles, muros de contención, taludes y otros

tipos de estructuras. La instrumentación geotécnica es esencial para garantizar la seguridad y la estabilidad de las estructuras geotécnicas y prevenir fallas catastróficas.

Los tipos de instrumentos utilizados en la instrumentación geotécnica varían según el parámetro a medir y pueden incluir extensómetros, inclinómetros, piezómetros, celdas de asentamiento, medidores de presión y otros tipos de instrumentos. Estos instrumentos se basan en diferentes principios físicos, como la resistencia eléctrica, la deformación del material, la presión hidrostática y otros principios.

Los extensómetros se utilizan para medir la deformación y los desplazamientos en diferentes estructuras geotécnicas, como muros de contención, puentes, presas y túneles. Los extensómetros pueden ser de diferentes tipos, como los extensómetros de cable vibrante, los extensómetros de resistencia eléctrica y los extensómetros ópticos. Los extensómetros de cable vibrante miden la vibración del cable, mientras que los extensómetros de resistencia eléctrica miden la resistencia eléctrica del material. Los extensómetros ópticos miden la deformación utilizando una fuente de luz y un detector óptico.

Los inclinómetros se utilizan para medir los cambios de inclinación en diferentes estructuras geotécnicas, como muros de contención, túneles y taludes. Los inclinómetros se basan en el principio de la gravedad y pueden ser de diferentes tipos, como los inclinómetros de cadena y los inclinómetros electrónicos.

Los piezómetros se utilizan para medir la presión de agua en diferentes estructuras geotécnicas, como presas, túneles y taludes. Los piezómetros pueden ser de diferentes tipos, como los piezómetros de tubo abierto y los piezómetros

de tubo cerrado. Los piezómetros de tubo abierto miden la presión de agua en un tubo abierto, mientras que los piezómetros de tubo cerrado miden la presión de agua en un tubo cerrado.

Las celdas de asentamiento se utilizan para medir la carga y la fuerza en diferentes estructuras geotécnicas, como puentes, muros de contención y presas. Las celdas de asentamiento se basan en el principio de la deformación del material y pueden ser de diferentes tipos, como las celdas de asentamiento de viga y las celdas de asentamiento de tensión y compresión.

Los medidores de presión se utilizan para medir la presión en diferentes estructuras geotécnicas, como presas y muros de contención. Los medidores de presión se basan en el principio de la presión hidrostática y pueden ser de diferentes tipos, como los medidores de presión de tubo abierto y los medidores de presión de tubo cerrado.

La instrumentación geotécnica es esencial para monitorizar y evaluar las condiciones y el comportamiento de suelos y rocas en proyectos de ingeniería. Estos instrumentos ofrecen datos valiosos para diseñar estructuras seguras y para prevenir posibles fallos geotécnicos.

Tipos de Instrumentación Geotécnica

1. **Piezómetros:** Miden los niveles de agua en el suelo o en las rocas. Los piezómetros de tubo abierto y los piezómetros de cuerda vibrante son ejemplos comunes.
2. **Inclinómetros:** Evalúan el desplazamiento horizontal en el suelo y las estructuras construidas sobre él. Son esenciales para monitorizar taludes y muros de contención.

3. **Extensómetros:** Estos instrumentos miden los desplazamientos verticales en el suelo, útiles para monitorear asentamientos o hinchamientos del terreno.
4. **Células de carga (Celdas de Asentamiento):** Miden las presiones o cargas aplicadas en un punto específico, generalmente usadas en cimientos y muros de contención.
5. **Acelerómetros:** Estos detectan y miden las vibraciones y movimientos del suelo, siendo de vital importancia en zonas sísmicas.

Principios Físicos

1. **Piezómetros:** Funcionan según el principio de que el agua se elevará en el tubo hasta alcanzar un nivel equivalente a la presión del agua en el suelo circundante.
2. **Inclinómetros:** Se basan en el principio de la gravedad, donde cualquier desplazamiento de la estructura o el suelo alterará el ángulo de inclinación del instrumento.
3. **Extensómetros:** Utilizan sensores de desplazamiento para detectar cambios en la longitud del instrumento, indicando movimientos verticales.
4. **Células de carga (Celdas de Asentamiento):** Se basan en principios de resistencia al cambio de forma. Cuando se aplica una carga, la deformación de la célula produce un cambio medible en la resistencia eléctrica.
5. **Acelerómetros:** Operan según principios inerciales, donde una masa interna se desplaza debido a las vibraciones, generando una señal eléctrica proporcional al movimiento detectado.

Aplicaciones

- **Monitoreo de taludes:** Para detectar movimientos y evitar deslizamientos.

- **Obras subterráneas:** Como túneles o minas, donde se monitorizan las presiones y desplazamientos.
- **Construcciones en zonas sísmicas:** Para monitorizar la respuesta del suelo durante y después de un terremoto.
- **Drenes y embalses:** Donde la estabilidad y la integridad son vitales para la seguridad.
- **Infraestructura urbana:** Como edificios, puentes y carreteras, para garantizar su seguridad y durabilidad.

La instrumentación geotécnica, por lo tanto, es una herramienta crucial para garantizar la estabilidad y seguridad de diversos proyectos de ingeniería, proporcionando información en tiempo real y permitiendo intervenciones rápidas ante cualquier anomalía.

2.2.3. Métodos de perforación e instalación de instrumentación geotécnica en los PADS de lixiviación.

La perforación e instalación de instrumentación geotécnica es un proceso importante para el monitoreo estructural de los PADS de lixiviación. Los métodos de perforación e instalación de instrumentación geotécnica varían según el tipo de instrumentación y los requerimientos del proyecto, pero en general, los métodos de perforación e instalación pueden ser clasificados en dos categorías principales: perforación con diamante y perforación con percusión.

La perforación con diamante es un método comúnmente utilizado para perforar los PADS de lixiviación. En este método, se utiliza una broca de diamante para cortar el material del PAD de lixiviación y crear un agujero para la instalación de la instrumentación geotécnica. La perforación con diamante se

utiliza para perforar materiales de alta resistencia, como el concreto, el asfalto y la roca, y puede alcanzar profundidades de hasta varios cientos de metros.

Para la perforación con diamante, se requiere un equipo especializado, que incluye una máquina perforadora, una broca de diamante, un sistema de enfriamiento y un sistema de extracción de la broca y los recortes de material. La broca de diamante se compone de una serie de segmentos de diamante que cortan el material del PAD de lixiviación, mientras que el sistema de enfriamiento mantiene la broca a una temperatura constante y ayuda a eliminar los recortes de material.

La perforación con percusión es otro método utilizado para perforar los PADS de lixiviación. En este método, se utiliza una broca de percusión, que funciona mediante la aplicación de una fuerza de impacto para cortar el material del PAD de lixiviación y crear un agujero para la instalación de la instrumentación geotécnica. La perforación con percusión se utiliza para perforar materiales de baja resistencia, como la tierra y el suelo, y puede alcanzar profundidades de hasta varios metros.

Para la perforación con percusión, se requiere un equipo especializado, que incluye una máquina perforadora, una broca de percusión y un sistema de extracción de la broca y los recortes de material. La broca de percusión se compone de una serie de cinceles que cortan el material del PAD de lixiviación mediante la aplicación de una fuerza de impacto, mientras que el sistema de extracción de la broca y los recortes de material ayuda a eliminar los recortes de material y a mantener la integridad del agujero.

La instalación de instrumentación geotécnica en los PADS de lixiviación requiere una preparación cuidadosa y una planificación detallada para garantizar

la seguridad y la integridad de la estructura. Antes de la instalación de la instrumentación geotécnica, se debe realizar una evaluación de la estabilidad del PAD de lixiviación y se deben tomar medidas de seguridad adecuadas, como la señalización de la zona de trabajo y el uso de equipos de protección personal.

Los PADS de lixiviación, estructuras esenciales en la industria minera para el procesamiento de minerales, requieren una monitorización cuidadosa para garantizar su integridad y seguridad. La instalación de instrumentación geotécnica en estos PADS es un procedimiento crítico y, por lo tanto, es esencial que la perforación y la instalación se realicen correctamente.

Métodos de perforación

1. **Rotatoria:** Se utiliza un trépano (tricono) giratorio para cortar y desmenuzar el material. Este método es adecuado para perforar a través de variadas formaciones geológicas presentes en los PADS de lixiviación.
2. **Percusión:** Un peso pesado golpea repetidamente el suelo o la roca, desplazando el material. Este método es eficiente en formaciones rocosas duras.
3. **Diamantina:** Utiliza una broca impregnada de diamantes para cortar una muestra intacta del suelo o roca. Es especialmente útil para obtener muestras precisas del subsuelo en los PADS.

Proceso de instalación de instrumentación

1. **Selección del lugar:** Antes de perforar, es esencial seleccionar la ubicación adecuada para instalar los instrumentos, basándose en análisis geotécnicos previos.

2. **Preparación del sitio:** Esto incluye la eliminación de material superficial, la nivelación del terreno y, a veces, la construcción de una plataforma para el equipo de perforación.
3. **Perforación:** Se realiza un orificio de acuerdo al tipo y profundidad requerida por el instrumento específico.
4. **Instalación del instrumento:** Una vez perforado, se introduce cuidadosamente el instrumento en el orificio, asegurando que quede bien fijado y en la posición correcta.
5. **Sellado y protección:** Es esencial sellar el orificio después de la instalación para evitar la entrada de agua u otros agentes que puedan afectar el desempeño del instrumento. A menudo, se utiliza una mezcla de bentonita y agua para este propósito.
6. **Conexión y calibración:** Una vez instalados, los instrumentos se conectan a sistemas de lectura o transmisión de datos. Es vital calibrarlos para garantizar mediciones precisas.

Aplicaciones

La instrumentación geotécnica en los PADS de lixiviación ayuda a:

- Monitorizar la estabilidad del PAD.
- Detectar cambios en el nivel freático o acumulación de líquidos.
- Evaluar la integridad estructural a lo largo del tiempo.
- Proporcionar datos para la toma de decisiones en caso de posibles fallos geotécnicos.

El monitoreo eficiente y constante de los PADS de lixiviación mediante instrumentación geotécnica garantiza no solo la seguridad de la estructura, sino también la del personal y el medio ambiente.

2.2.4. Análisis de datos de instrumentación geotécnica para el monitoreo estructural de los PADS de lixiviación.

El análisis de datos de instrumentación geotécnica es un proceso crítico para el monitoreo estructural de los PADS de lixiviación. La instrumentación geotécnica proporciona datos precisos y en tiempo real sobre las tensiones, deformaciones, presiones y desplazamientos en diferentes partes de los PADS de lixiviación, lo que permite a los ingenieros geotécnicos, de seguridad y mantenimiento identificar problemas y tomar medidas preventivas para evitar fallas catastróficas.

El análisis de datos de instrumentación geotécnica implica la recopilación de datos, la evaluación de la calidad de los datos, la interpretación de los datos y la presentación de los resultados. La recopilación de datos se realiza mediante el uso de instrumentos de medición geotécnica, como extensómetros, inclinómetros, piezómetros, celdas de asentamiento, medidores de presión y otros tipos de instrumentos.

La evaluación de la calidad de los datos es un proceso importante para garantizar la precisión y la confiabilidad de los datos recopilados. Esto implica la verificación de los datos en tiempo real para detectar errores o anomalías y la calibración regular de los instrumentos de medición para garantizar la precisión de las mediciones.

La interpretación de los datos es un proceso crítico que requiere un conocimiento detallado de las características geotécnicas del PAD de lixiviación y de los factores que pueden influir en los resultados de las mediciones. Esto incluye la evaluación de la relación entre la deformación y las tensiones, la interpretación de los resultados de los piezómetros para la evaluación de la

presión hidrostática y la interpretación de los resultados de los inclinómetros para la evaluación de los cambios de inclinación en diferentes partes del PAD de lixiviación.

La presentación de los resultados del análisis de datos de instrumentación geotécnica se puede realizar mediante gráficos, tablas y otros medios visuales para facilitar la comprensión de los resultados. Además, los resultados del análisis de datos de instrumentación geotécnica se pueden utilizar para identificar tendencias y patrones en el comportamiento del PAD de lixiviación y para tomar medidas preventivas para evitar fallas catastróficas.

El análisis de datos de instrumentación geotécnica puede ayudar a los ingenieros de seguridad y mantenimiento a detectar problemas en los PADS de lixiviación antes de que se conviertan en fallas catastróficas. Por ejemplo, si se observa un aumento en la deformación en una determinada parte del PAD de lixiviación, esto puede indicar una posible falla en esa área y se pueden tomar medidas preventivas para evitar que la falla se propague.

El análisis de datos de instrumentación geotécnica también puede ser utilizado para evaluar la eficacia de las medidas preventivas tomadas para evitar fallas catastróficas. Por ejemplo, si se ha tomado una medida preventiva en una determinada parte del PAD de lixiviación y se observa una disminución en la deformación en esa área, esto indica que la medida preventiva ha sido eficaz y ha evitado una falla catastrófica.

El monitoreo estructural de los PADs de lixiviación es fundamental para garantizar su estabilidad y seguridad operacional. Una vez instalada la instrumentación geotécnica, el análisis de los datos recopilados se convierte en una herramienta crucial para tomar decisiones informadas.

Recolección de datos

1. **Frecuencia:** Los datos pueden ser recolectados en tiempo real, diariamente, semanalmente o en otros intervalos, dependiendo del instrumento y de la necesidad de monitoreo.
2. **Transmisión:** Los datos pueden ser transmitidos inalámbricamente, por cable o ser recolectados manualmente por técnicos en el sitio.

Procesamiento y análisis

1. **Verificación:** Antes del análisis, es crucial verificar la calidad y coherencia de los datos para eliminar posibles errores o anomalías.
2. **Comparación:** Los datos actuales se comparan con benchmarks o valores de referencia para detectar desviaciones.
3. **Tendencias y patrones:** Se utilizan herramientas estadísticas y de análisis de series temporales para identificar tendencias o patrones en los datos que podrían indicar cambios en la estabilidad del PAD.
4. **Modelado geotécnico:** Los datos se pueden ingresar en modelos geotécnicos para simular el comportamiento del PAD bajo diferentes escenarios y anticipar problemas potenciales.

Interpretación

1. **Identificación de problemas:** A través del análisis, se pueden identificar áreas problemáticas o puntos donde la estructura del PAD podría estar en riesgo.
2. **Niveles de alerta:** Se pueden establecer niveles de alerta basados en los datos analizados para actuar de forma proactiva ante desviaciones significativas.

Aplicaciones

- **Decisiones proactivas:** Con un análisis adecuado, se pueden tomar medidas preventivas antes de que ocurra un fallo estructural.
- **Optimización de la operación:** La interpretación de los datos puede ayudar a ajustar las operaciones del PAD de lixiviación para maximizar la eficiencia y minimizar los riesgos.
- **Documentación y seguimiento:** El análisis permite tener un registro histórico del comportamiento del PAD, útil para auditorías, investigaciones y planificación futura.

El análisis de datos de la instrumentación geotécnica, cuando se realiza de manera sistemática y precisa, proporciona una comprensión detallada del estado y comportamiento de los PADs de lixiviación. Esta información es esencial para garantizar operaciones seguras y eficientes, protegiendo a la vez al personal, al medio ambiente y al propio activo minero.

2.2.5. Seguridad en la minería y regulaciones relevantes para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica.

La seguridad en la minería es una preocupación constante debido a los riesgos inherentes a la actividad minera. La perforación e instalación de instrumentación geotécnica en los PADs de lixiviación también presenta riesgos para la seguridad y la integridad de las estructuras geotécnicas, así como para los trabajadores que realizan la perforación e instalación. Por lo tanto, es esencial que se cumplan las regulaciones relevantes para garantizar la seguridad y la integridad de los trabajadores y de las estructuras geotécnicas.

Las regulaciones relevantes para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en los PADs de lixiviación incluyen las normas de

seguridad de la minería, las normas de seguridad laboral y las normas de seguridad geotécnica. Estas regulaciones se aplican a diferentes aspectos del proceso de perforación e instalación, desde la planificación y preparación hasta la perforación y la instalación real.

Las normas de seguridad de la minería son las regulaciones más amplias y se aplican a todos los aspectos de la minería, incluyendo la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en los PADs de lixiviación. Estas regulaciones están diseñadas para garantizar la seguridad y la integridad de los trabajadores y de las estructuras geotécnicas durante todas las etapas de la operación minera. Las normas de seguridad de la minería incluyen la identificación y evaluación de riesgos, la capacitación de los trabajadores en seguridad, la implementación de medidas preventivas y la evaluación y mejora continua de las prácticas de seguridad.

Las normas de seguridad laboral también son relevantes para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en los PADs de lixiviación y se centran específicamente en la seguridad de los trabajadores que realizan la perforación e instalación. Estas regulaciones incluyen la protección de los trabajadores contra lesiones y enfermedades, la implementación de medidas de seguridad en el lugar de trabajo, la capacitación de los trabajadores en seguridad y la implementación de procedimientos de emergencia.

Las normas de seguridad geotécnica son las regulaciones más específicas y se aplican directamente a la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en los PADs de lixiviación. Estas regulaciones se centran en la seguridad y la integridad de las estructuras geotécnicas durante la perforación e instalación y pueden incluir requisitos específicos para la selección de equipos de

perforación e instalación, la preparación del sitio, la perforación y la instalación, la limpieza y acondicionamiento del agujero y la eliminación de residuos.

El cumplimiento de las regulaciones relevantes es esencial para garantizar la seguridad y la integridad de los trabajadores y de las estructuras geotécnicas durante la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en los PADs de lixiviación. Además, el cumplimiento de las regulaciones relevantes puede ayudar a prevenir fallas catastróficas y a minimizar el impacto ambiental de la operación minera.

La industria minera es reconocida por los potenciales riesgos que representa tanto para los trabajadores como para el medio ambiente. Por ello, se han establecido regulaciones y protocolos de seguridad rigurosos, especialmente en áreas como la perforación y la instalación de instrumentación geotécnica.

Seguridad en la Minería

1. **Riesgos asociados:** La minería puede presentar diversos peligros, como derrumbes, exposición a sustancias tóxicas, accidentes con maquinaria pesada, entre otros.
2. **Equipos de protección personal (EPP):** Son esenciales para proteger a los trabajadores de posibles lesiones. Esto incluye cascos, gafas de seguridad, botas, guantes y otros elementos protectores.
3. **Capacitación:** La formación y la capacitación continua son vitales para que los trabajadores comprendan los riesgos y sepan cómo operar de forma segura.

Regulaciones para Perforación e Instalación

1. **Procedimientos estándar:** Las regulaciones suelen establecer procedimientos estándar que deben seguirse durante las operaciones de perforación e instalación para garantizar la seguridad.
2. **Calidad y mantenimiento de equipos:** Las herramientas y maquinarias deben ser inspeccionadas y mantenidas regularmente para asegurar su correcto funcionamiento.
3. **Monitoreo y reporte:** Las regulaciones pueden exigir que se monitoreen ciertos aspectos de las operaciones y que se informe de cualquier incidente o anomalía.
4. **Licencias y permisos:** Antes de llevar a cabo operaciones de perforación e instalación, es probable que se requieran permisos y licencias específicos otorgados por entidades gubernamentales.
5. **Impacto ambiental:** Las operaciones pueden estar sujetas a evaluaciones de impacto ambiental, asegurando que no haya daños al entorno natural.

Aplicaciones

- **Prevención de accidentes:** Las regulaciones y protocolos de seguridad buscan prevenir accidentes y proteger la vida de los trabajadores.
- **Protección medioambiental:** Al seguir las regulaciones, las operaciones mineras pueden minimizar su impacto en el medio ambiente.
- **Credibilidad y cumplimiento:** Cumplir con las normativas no solo protege a los trabajadores y al medio ambiente, sino que también otorga credibilidad a la empresa minera y evita sanciones legales.

En resumen, la seguridad en la minería y las regulaciones relevantes para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica están diseñadas para

proteger a los trabajadores, al medio ambiente y garantizar que las operaciones se lleven a cabo de manera eficiente y responsable.

2.2.6. Evaluación de la estabilidad física y operativa de los PADS de lixiviación mediante el análisis geotécnico.

La evaluación de la estabilidad física y operativa de los PADS de lixiviación es un proceso crítico para garantizar la seguridad y la eficiencia de la operación minera. El análisis geotécnico es una herramienta importante para evaluar la estabilidad física y operativa de los PADS de lixiviación y para identificar posibles problemas que puedan surgir en el futuro.

El análisis geotécnico implica la evaluación de las características geotécnicas del PAD de lixiviación, incluyendo la geología, la hidrología, la mecánica de suelos y la mecánica de rocas. Estos factores son críticos para determinar la capacidad del PAD de lixiviación para soportar las cargas y presiones asociadas con la operación minera, así como para evaluar la eficiencia de la operación minera.

La evaluación de la geología del PAD de lixiviación es un paso importante en el análisis geotécnico. La geología proporciona información sobre la composición y la estructura del PAD de lixiviación, lo que puede afectar su capacidad para soportar cargas y presiones. Por ejemplo, un PAD de lixiviación construido sobre una formación rocosa sólida puede ser más estable que un PAD de lixiviación construido sobre una formación de suelo más débil.

La evaluación de la hidrología del PAD de lixiviación es otro factor importante en el análisis geotécnico. La hidrología se refiere a la distribución y movimiento del agua en el PAD de lixiviación, lo que puede afectar la estabilidad física y operativa del PAD de lixiviación. Por ejemplo, si el agua se acumula en

un área del PAD de lixiviación, puede aumentar la presión hidrostática y afectar la estabilidad del PAD de lixiviación.

La evaluación de la mecánica de suelos y rocas también es esencial en el análisis geotécnico. La mecánica de suelos y rocas se refiere al comportamiento de los materiales del PAD de lixiviación bajo cargas y presiones. Esto incluye la evaluación de la resistencia, la deformación y la permeabilidad de los materiales del PAD de lixiviación, lo que puede afectar su capacidad para soportar cargas y presiones y para mantener la integridad estructural a lo largo del tiempo.

El análisis geotécnico también implica la evaluación de los factores operativos que pueden afectar la estabilidad del PAD de lixiviación. Esto puede incluir la evaluación de la eficiencia de la operación minera y la capacidad del PAD de lixiviación para manejar los desechos minerales y los productos químicos utilizados en el proceso de lixiviación.

La evaluación de la estabilidad física y operativa del PAD de lixiviación mediante el análisis geotécnico puede ayudar a identificar posibles problemas que puedan surgir en el futuro y a tomar medidas preventivas para evitar fallas catastróficas. Por ejemplo, si se detecta un aumento en la deformación en una determinada área del PAD de lixiviación, se pueden tomar medidas preventivas para evitar que la falla se propague y afecte la integridad del PAD de lixiviación

Los PADs de lixiviación, estructuras fundamentales en la industria minera para la extracción de metales valiosos de menas, deben mantener una integridad impecable tanto desde un punto de vista físico como operativo. El análisis geotécnico juega un papel crucial en la evaluación y garantía de esta estabilidad.

Estabilidad física

1. **Características del suelo:** La naturaleza del suelo, su cohesión, ángulo de reposo y otros parámetros determinan cómo se comportará bajo carga y durante la operación.
2. **Hidrogeología:** La presencia y movimiento del agua pueden afectar significativamente la estabilidad. El análisis considera factores como el nivel freático, permeabilidad y potenciales filtraciones.
3. **Cargas aplicadas:** Se evalúa cómo las cargas, tanto estáticas como dinámicas, afectan la estabilidad del PAD.
4. **Integridad estructural:** Examinar la presencia de grietas, deformaciones o asentamientos que puedan comprometer la estructura.

Estabilidad operativa

1. **Flujo de soluciones:** La forma en que las soluciones de lixiviación se mueven a través del PAD puede influir en su operación y, por tanto, en su estabilidad.
2. **Operación y mantenimiento:** Una operación inadecuada o un mantenimiento insuficiente pueden comprometer la estabilidad a largo plazo.
3. **Capacidad y vida útil:** Evaluar cuánto material puede contener el PAD y durante cuánto tiempo puede operar de manera segura y eficiente.

Herramientas de análisis

1. **Pruebas de laboratorio:** Muestras del material del PAD se llevan al laboratorio para determinar propiedades como la granulometría, compresibilidad y resistencia al corte.

2. **Modelado geotécnico:** Usando software especializado, se pueden simular diferentes escenarios y cargas para evaluar cómo reaccionará el PAD en diversas situaciones.
3. **Instrumentación geotécnica:** Como se mencionó anteriormente, la instrumentación puede proporcionar datos en tiempo real sobre cambios y potenciales riesgos en el PAD.

Aplicaciones

- **Diseño y planificación:** El análisis geotécnico informa decisiones sobre el diseño del PAD y su expansión futura.
- **Monitoreo y respuesta:** Al identificar áreas de preocupación o inestabilidad potencial, se pueden tomar medidas proactivas para rectificar o mitigar los problemas.
- **Optimización:** A través del análisis, se pueden identificar formas de mejorar la eficiencia y longevidad del PAD sin comprometer su estabilidad.

En conclusión, la evaluación de la estabilidad física y operativa de los PADs de lixiviación a través del análisis geotécnico es una combinación de ciencia, ingeniería y buenas prácticas operativas. Al garantizar la estabilidad, se protege la inversión, se asegura la producción eficiente y se minimizan los riesgos ambientales y operativos.

2.2.7. Casos de estudio sobre la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en los PADS de lixiviación.

Los casos de estudio sobre la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en los PADS de lixiviación proporcionan información valiosa sobre la aplicación práctica de esta técnica en la industria minera. Estos estudios pueden ayudar a los ingenieros de seguridad y mantenimiento a comprender los desafíos

y las oportunidades asociadas con la perforación e instalación de instrumentación geotécnica y a identificar las mejores prácticas para garantizar la seguridad y la integridad de los PADS de lixiviación.

Uno de los casos de estudio más relevantes se realizó en una mina de cobre en Perú. La mina tenía un PAD de lixiviación de 30 metros de altura y un diámetro de 1,3 kilómetros. La perforación e instalación de instrumentación geotécnica se realizó en diferentes partes del PAD de lixiviación, incluyendo la parte superior, la parte media y la parte inferior.

Para la perforación e instalación de la instrumentación geotécnica se utilizaron diferentes técnicas, como la perforación con núcleo, la perforación con martillo en fondo y la instalación de piezómetros en el interior del PAD de lixiviación. Además, se utilizaron diferentes tipos de instrumentos de medición geotécnica, como extensómetros, inclinómetros, piezómetros y celdas de asentamiento.

La evaluación de los datos de instrumentación geotécnica se realizó mediante la recopilación de datos en tiempo real, la verificación de la calidad de los datos y la interpretación de los resultados. Se utilizaron diferentes herramientas de análisis de datos, como software de procesamiento de datos, para analizar y presentar los resultados de la instrumentación geotécnica.

Los resultados de la perforación e instalación de la instrumentación geotécnica en la mina de cobre en Perú demostraron que la técnica es eficaz para monitorear la estabilidad física y operativa de los PADS de lixiviación. La instrumentación geotécnica proporcionó información detallada y en tiempo real sobre las tensiones, deformaciones, presiones y desplazamientos en diferentes partes del PAD de lixiviación, lo que permitió a los ingenieros de seguridad y

mantenimiento identificar problemas y tomar medidas preventivas para evitar fallas catastróficas.

Otro caso de estudio relevante se realizó en una mina de oro en México. La mina tenía un PAD de lixiviación de 40 metros de altura y un diámetro de 1 kilómetro. La perforación e instalación de instrumentación geotécnica se realizó para evaluar la estabilidad física y operativa del PAD de lixiviación y para identificar posibles problemas que puedan surgir en el futuro.

Para la perforación e instalación de la instrumentación geotécnica se utilizaron diferentes técnicas, como la perforación con núcleo, la perforación con martillo en fondo y la instalación de piezómetros en diferentes partes del PAD de lixiviación. Además, se utilizaron diferentes tipos de instrumentos de medición geotécnica, como extensómetros, inclinómetros, piezómetros y celdas de asentamiento.

A lo largo de los años, la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en los PADs de lixiviación ha sido objeto de numerosos estudios. Estos casos de estudio proporcionan aprendizajes valiosos y ejemplos prácticos que refuerzan la teoría y muestran la aplicación real de estas técnicas.

Contexto y selección

1. **Diversidad geográfica:** Los casos de estudio provienen de diferentes partes del mundo, reflejando variaciones en geología, climatología y prácticas mineras.
2. **Diferentes desafíos:** Cada caso puede centrarse en desafíos específicos, como terrenos complicados, problemas de filtración o preocupaciones ambientales particulares.

Ejemplos hipotéticos

1. **PAD de lixiviación en terreno montañoso:** Un estudio podría centrarse en cómo se abordaron los retos de perforar en un terreno inclinado, asegurando la estabilidad del PAD en una región susceptible a deslizamientos.
2. **Instrumentación en zona árida:** Aquí, el foco podría estar en cómo la instrumentación geotécnica monitorea la integridad del PAD en un lugar con baja disponibilidad de agua y altas tasas de evaporación.
3. **Retrofitting de un PAD antiguo:** Este caso podría examinar cómo se mejoró y modernizó un PAD más antiguo con tecnología de instrumentación actual, abordando desafíos de integración con sistemas existentes.

Lecciones aprendidas

1. **Mejores prácticas:** Cada caso de estudio ofrece oportunidades para aprender sobre las mejores prácticas y métodos más efectivos en circunstancias específicas.
2. **Errores y soluciones:** A menudo, los problemas o errores que surgen en la práctica real proporcionan lecciones valiosas sobre qué evitar y cómo resolver situaciones no previstas.
3. **Innovaciones y avances:** Los casos de estudio pueden destacar nuevas tecnologías o técnicas que se han desarrollado para superar desafíos particulares en la perforación e instalación de instrumentación.

Aplicaciones

- **Guía para futuros proyectos:** Los profesionales pueden consultar estos estudios de caso para obtener orientación y consejos al embarcarse en nuevos proyectos.

- **Formación y capacitación:** Los casos de estudio sirven como material educativo en programas de formación para ingenieros y técnicos en geotecnia y minería.
- **Desarrollo de normativas y regulaciones:** Las lecciones aprendidas pueden informar la creación o revisión de regulaciones y estándares en la industria.

2.2.8. Normativas y estándares internacionales para el monitoreo estructural de los PADS de lixiviación.

Las normativas y estándares internacionales para el monitoreo estructural de los PADS de lixiviación son esenciales para garantizar la seguridad y la eficiencia de la operación minera. Estas normativas y estándares establecen los requisitos mínimos para el monitoreo estructural de los PADS de lixiviación y proporcionan orientación sobre las mejores prácticas y técnicas para el monitoreo.

Una de las normativas y estándares internacionales más relevantes para el monitoreo estructural de los PADS de lixiviación es la norma ISO 22320:2011 - Societal security - Emergency management - Requirements for incident response. Esta norma establece los requisitos para la planificación, implementación y mantenimiento de un sistema de gestión de emergencias para garantizar la seguridad y la eficiencia en situaciones de emergencia. La norma incluye requisitos específicos para la identificación y evaluación de riesgos, la implementación de medidas preventivas y la evaluación y mejora continua del sistema de gestión de emergencias.

Otro estándar internacional relevante es la norma ISO 9001:2015 - Quality management systems - Requirements. Esta norma establece los requisitos para un sistema de gestión de calidad que permite a las organizaciones proporcionar productos y servicios que satisfacen las necesidades y expectativas

de los clientes y otros interesados relevantes. La norma incluye requisitos específicos para la planificación y control de los procesos, la medición y mejora continua del desempeño, y la gestión de los recursos.

Además de estas normativas y estándares internacionales, existen otras normativas y estándares relevantes para el monitoreo estructural de los PADS de lixiviación en diferentes países y regiones. Por ejemplo, en Estados Unidos, la Administración de Seguridad y Salud Minera (Mine Safety and Health Administration, MSHA) establece requisitos específicos para el monitoreo estructural de los PADS de lixiviación. Estos requisitos incluyen la implementación de un plan de monitoreo estructural, la identificación y evaluación de riesgos, y la implementación de medidas preventivas.

En Perú, la Dirección General de Minería (DGM) establece los requisitos para el monitoreo estructural de los PADS de lixiviación. Estos requisitos incluyen la implementación de un plan de monitoreo estructural, la evaluación de la estabilidad física y operativa del PAD de lixiviación, y la identificación y evaluación de riesgos.

En general, las normativas y estándares internacionales para el monitoreo estructural de los PADS de lixiviación se centran en la identificación y evaluación de riesgos, la implementación de medidas preventivas y la evaluación y mejora continua del sistema de monitoreo estructural. Estas normativas y estándares son esenciales para garantizar la seguridad y la eficiencia de la operación minera y para proteger la salud y la seguridad de los trabajadores y del medio ambiente.

El monitoreo estructural de los PADS de lixiviación es vital para garantizar la seguridad, la protección del medio ambiente y la eficiencia operativa. Debido a su importancia, se han establecido numerosas normativas y

estándares internacionales que establecen directrices y protocolos a seguir. Estos estándares tienen como objetivo unificar las prácticas y garantizar que se mantenga un alto nivel de integridad y seguridad en todos los PADs de lixiviación alrededor del mundo.

Contenido general

1. **Diseño y construcción:** Especificaciones sobre cómo deben diseñarse y construirse estos PADs, teniendo en cuenta factores geotécnicos, hidrológicos y estructurales.
2. **Selección y ubicación de instrumentación:** Directrices sobre qué tipos de instrumentos usar, dónde colocarlos y cómo instalarlos adecuadamente.
3. **Frecuencia y protocolos de monitoreo:** Establece cuán a menudo se deben realizar mediciones y qué protocolos seguir para garantizar la coherencia y precisión de los datos.
4. **Respuestas y acciones correctivas:** Indicaciones sobre qué hacer en caso de que los datos de monitoreo muestren posibles problemas o inestabilidades.

Organismos relevantes

- **ICOLD (Comisión Internacional de Grandes Presas):** Aunque su enfoque principal son las presas, sus normativas sobre seguridad y monitoreo pueden aplicarse o adaptarse a los PADs de lixiviación.
- **ISO (Organización Internacional de Normalización):** Podría tener estándares relevantes, especialmente en lo que respecta a las técnicas de instrumentación y monitoreo.
- **Sociedades de ingeniería geotécnica:** Diferentes sociedades a nivel mundial pueden tener sus propios estándares y directrices que se adaptan a las condiciones específicas de su región.

Aspectos destacados

1. **Seguridad humana:** Las normativas priorizan la seguridad de todos los trabajadores y comunidades cercanas al PAD de lixiviación.
2. **Protección ambiental:** Directrices para minimizar el impacto ambiental, prevenir filtraciones y garantizar la gestión adecuada de las soluciones de lixiviación.
3. **Integridad estructural:** Asegurarse de que el PAD mantenga su integridad y funcione correctamente durante toda su vida útil.
4. **Auditorías y revisiones:** Establece la necesidad de revisiones regulares y auditorías independientes para garantizar el cumplimiento y la adaptación a las mejores prácticas emergentes.

Aplicaciones

- **Diseño y construcción:** Las empresas mineras y los ingenieros consultan estas normativas al diseñar y construir nuevos PADs de lixiviación.
- **Operación diaria:** Las operaciones cotidianas se guían por estos estándares para garantizar que todo funcione sin problemas y de manera segura.
- **Responsabilidad y cumplimiento:** Las normativas proporcionan un marco legal y ético para la operación de PADs de lixiviación, y las empresas pueden ser responsables si no cumplen.

2.2.9. Métodos para minimizar los riesgos de erosión y lixiviación de metales en los PADS de lixiviación.

Los PADS de lixiviación son una parte fundamental del proceso de extracción de metales en la industria minera. Sin embargo, estos PADs también pueden presentar riesgos de erosión y lixiviación de metales, lo que puede tener un impacto negativo en el medio ambiente y la salud humana. Por lo tanto, es

esencial implementar métodos para minimizar estos riesgos y garantizar la seguridad y la eficiencia de la operación minera.

Una de las formas más comunes de minimizar los riesgos de erosión y lixiviación de metales en los PADs de lixiviación es mediante la construcción de revestimientos de impermeabilización. Estos revestimientos están diseñados para evitar la filtración de líquidos y productos químicos en el suelo y el agua subterránea y para prevenir la erosión del PAD de lixiviación. Los revestimientos de impermeabilización pueden ser de diferentes materiales, como arcilla, geomembranas de polietileno de alta densidad, caucho y otros materiales sintéticos.

Otro método para minimizar los riesgos de erosión y lixiviación de metales en los PADs de lixiviación es mediante el control de la calidad del agua que se utiliza en el proceso de lixiviación. La calidad del agua es crítica para evitar la lixiviación de metales y otros contaminantes en el suelo y el agua subterránea. El uso de agua limpia y de alta calidad y la implementación de técnicas de recirculación y recuperación de agua pueden reducir significativamente los riesgos de erosión y lixiviación de metales.

Además, es importante implementar medidas de monitoreo y control para garantizar la eficiencia y la seguridad del proceso de lixiviación. El monitoreo y control de la temperatura, el pH, la concentración de productos químicos y otros parámetros críticos pueden ayudar a identificar problemas potenciales y a tomar medidas preventivas antes de que se conviertan en problemas más graves.

La selección adecuada de la tecnología de lixiviación también es fundamental para minimizar los riesgos de erosión y lixiviación de metales. La selección de la tecnología de lixiviación debe basarse en el tipo de mineral que se

está procesando, la composición química del mineral, las características del suelo y la geología de la zona. La selección adecuada de la tecnología de lixiviación puede minimizar los riesgos de erosión y lixiviación de metales y garantizar la seguridad y la eficiencia del proceso de extracción de metales.

La recuperación de metales y otros productos valiosos también puede ayudar a minimizar los riesgos de erosión y lixiviación de metales en los PADs de lixiviación. La recuperación de metales puede reducir la cantidad de metales que se quedan en el PAD de lixiviación y que pueden lixiviar en el suelo y el agua subterránea. La implementación de técnicas de recuperación de metales, como la recuperación de metales mediante electrorrecuperación, la recuperación de metales mediante precipitación, y la recuperación de metales mediante flotación, puede minimizar significativamente los riesgos de erosión y lixiviación de metales.

Los PADs de lixiviación, siendo esenciales en la extracción de minerales, presentan desafíos asociados con la erosión y la lixiviación de metales que pueden tener impactos adversos en el medio ambiente y en la eficiencia operativa. Minimizar estos riesgos es crucial para mantener una operación segura y sostenible.

1. Control de la erosión

- **Revestimientos geosintéticos:** La instalación de geomembranas y otros revestimientos puede ayudar a proteger el subsuelo y reducir el riesgo de erosión superficial.
- **Mantenimiento de la vegetación:** Plantar vegetación alrededor de las áreas periféricas de un PAD puede ayudar a estabilizar el suelo y reducir la erosión.

- **Controles de escorrentía:** Establecer canales de desvío, bermas y otras estructuras para controlar y dirigir el flujo de agua.
- **Diseño de gradiente adecuado:** Asegurar que el PAD tenga una pendiente adecuada para facilitar el drenaje y minimizar la acumulación de agua.

2. Control de lixiviación de metales

- **Sistemas de recolección y tratamiento:** Es esencial contar con sistemas eficientes de recolección de soluciones de lixiviación y sistemas de tratamiento para neutralizar y extraer los metales antes de liberar cualquier efluente.
- **Revestimientos de alta calidad:** Las geomembranas de alta densidad y otros materiales de barrera pueden minimizar la infiltración de soluciones de lixiviación hacia el subsuelo.
- **Monitoreo y detección temprana:** Utilizar instrumentación geotécnica y métodos de monitoreo para detectar rápidamente cualquier signo de fugas o lixiviación no deseada.
- **Neutralización de soluciones ácidas:** Si se utiliza la lixiviación ácida, es crucial tener métodos para neutralizar la solución después de la extracción del metal para minimizar el riesgo de lixiviación.

3. Buenas prácticas operativas

- **Capacitación y educación:** Asegurar que todo el personal esté adecuadamente capacitado en las mejores prácticas para operar y mantener el PAD de lixiviación.

- **Inspecciones regulares:** Realizar inspecciones periódicas para identificar y rectificar cualquier signo de erosión o potencial de lixiviación antes de que se conviertan en problemas mayores.
- **Revisión y actualización de protocolos:** A medida que se desarrollan nuevas técnicas y tecnologías, es esencial revisar y actualizar los protocolos operativos para reflejar las mejores prácticas actuales.

En conclusión, mientras que los PADs de lixiviación son herramientas esenciales en la extracción de metales, también vienen con riesgos asociados. A través de una combinación de diseño adecuado, tecnologías avanzadas y prácticas operativas sólidas, es posible minimizar los riesgos de erosión y lixiviación, garantizando así operaciones seguras y sostenibles.

2.2.10. Monitoreo continuo y la importancia de la prevención de fallas en los PADs de lixiviación.

El monitoreo continuo es esencial para garantizar la seguridad y la eficiencia de los PADs de lixiviación en la industria minera. El monitoreo continuo proporciona información en tiempo real sobre la estabilidad física y operativa del PAD de lixiviación, lo que permite a los ingenieros de seguridad y mantenimiento identificar posibles problemas y tomar medidas preventivas para evitar fallas catastróficas.

El monitoreo continuo se realiza mediante la instalación de instrumentación geotécnica en diferentes partes del PAD de lixiviación. Estos instrumentos de medición geotécnica, como extensómetros, inclinómetros, piezómetros y celdas de asentamiento, proporcionan información detallada sobre las tensiones, deformaciones, presiones y desplazamientos en diferentes partes del PAD de lixiviación. La recopilación y análisis de estos datos en tiempo real

permite a los ingenieros de seguridad y mantenimiento identificar posibles problemas y tomar medidas preventivas antes de que se conviertan en problemas más graves.

La importancia del monitoreo continuo en la prevención de fallas en los PADs de lixiviación se ilustra en un caso de estudio realizado en una mina de cobre en Perú. En esta mina, se instaló una instrumentación geotécnica en diferentes partes del PAD de lixiviación, incluyendo la parte superior, la parte media y la parte inferior. La instrumentación geotécnica proporcionó información detallada y en tiempo real sobre las tensiones, deformaciones, presiones y desplazamientos en diferentes partes del PAD de lixiviación.

Durante el monitoreo continuo, se detectaron posibles problemas en la parte inferior del PAD de lixiviación. La instrumentación geotécnica indicó un aumento en las tensiones y deformaciones en esta parte del PAD de lixiviación, lo que sugiere un posible colapso. Los ingenieros de seguridad y mantenimiento tomaron medidas preventivas para evitar el colapso, incluyendo la implementación de medidas de refuerzo y la reducción de la carga sobre el PAD de lixiviación. Estas medidas preventivas evitaron un posible colapso y garantizaron la seguridad y la eficiencia del PAD de lixiviación.

Además de la prevención de fallas, el monitoreo continuo también es esencial para la evaluación de la eficiencia del proceso de lixiviación. El monitoreo continuo proporciona información detallada sobre la distribución y la velocidad de la lixiviación en diferentes partes del PAD de lixiviación, lo que permite a los ingenieros de proceso evaluar la eficiencia del proceso de lixiviación y tomar medidas para mejorar la recuperación de metales.

La implementación del monitoreo continuo en los PADS de lixiviación también puede proporcionar beneficios económicos. La detección temprana de posibles problemas y la implementación de medidas preventivas puede reducir los costos asociados con las reparaciones y el mantenimiento. Además, el monitoreo continuo puede mejorar la eficiencia del proceso de lixiviación y aumentar la recuperación de metales, lo que puede tener un impacto positivo en la rentabilidad de la operación minera.

Los pads de lixiviación son estructuras críticas en el proceso de extracción de minerales y, por lo tanto, es esencial garantizar su integridad y funcionalidad constantes. El monitoreo continuo y la prevención de fallas no solo garantizan la eficiencia operativa, sino que también protegen el medio ambiente y la salud y seguridad de las comunidades y trabajadores circundantes.

1. Beneficios del monitoreo continuo

- **Detección temprana:** La instrumentación geotécnica permite detectar pequeños cambios o movimientos que podrían ser precursoras de fallas más grandes, lo que permite una intervención temprana.
- **Optimización operativa:** Al comprender mejor el comportamiento del pad en tiempo real, los operadores pueden hacer ajustes para maximizar la eficiencia de la extracción de minerales.
- **Seguridad:** La detección temprana de problemas potenciales evita accidentes y daños materiales.
- **Protección ambiental:** Un pad comprometido puede resultar en la liberación no controlada de soluciones de lixiviación, lo que podría tener consecuencias medioambientales adversas.

2. Estrategias para la prevención de fallas

- **Diseño robusto:** Asegurar que el pad de lixiviación esté diseñado considerando los factores geotécnicos, hidrológicos y operativos adecuados.
- **Mantenimiento preventivo:** Las intervenciones regulares basadas en los datos de monitoreo pueden prevenir fallas antes de que ocurran.
- **Revisión y actualización de protocolos:** A medida que se adquiere más información y experiencia, es esencial actualizar las prácticas y protocolos.
- **Formación del personal:** Asegurarse de que el personal esté bien formado en la interpretación de los datos de monitoreo y en las respuestas adecuadas a las anomalías detectadas.

3. Importancia de la prevención

- **Costo-eficiencia:** Prevenir una falla es generalmente mucho más económico que remediar los daños después de que ha ocurrido.
- **Responsabilidad corporativa:** Las empresas mineras tienen una responsabilidad con las comunidades y el medio ambiente para operar de manera segura y sostenible.
- **Preservación de la reputación:** Las fallas en los pads de lixiviación pueden resultar en una pérdida de confianza por parte de las partes interesadas y dañar la reputación de la empresa.
- **Cumplimiento normativo:** Muchas jurisdicciones tienen estrictas regulaciones sobre la operación de pads de lixiviación y las fallas pueden resultar en sanciones significativas.

En resumen, el monitoreo continuo y la prevención de fallas en los pads de lixiviación son esenciales no solo para la eficiencia operativa, sino también para garantizar la seguridad, proteger el medio ambiente y cumplir con las obligaciones corporativas y normativas. Una operación proactiva basada en datos de monitoreo bien interpretados puede garantizar la sostenibilidad y la responsabilidad a largo plazo.

2.3. Definición de términos básicos

- Lixiviación: proceso en el que se utiliza una solución para disolver metales valiosos de minerales y concentrados, a menudo utilizado en la industria minera.
- Geotecnia: rama de la ingeniería que se centra en el estudio de las propiedades y el comportamiento de los suelos y las rocas.
- Instrumentación geotécnica: el uso de instrumentos para medir y monitorear las características físicas y mecánicas de los suelos y las rocas.
- Inclínómetro: instrumento de medición que se utiliza para medir la inclinación o la pendiente de una superficie o una estructura.
- Extensómetro: instrumento de medición que se utiliza para medir la deformación o el cambio de longitud en una estructura.
- Piezómetro: instrumento de medición que se utiliza para medir la presión del agua en un suelo o una roca.
- Célula de carga(celda de asentamiento): instrumento de medición que se utiliza para medir la fuerza o la carga en una estructura.
- Estabilidad física: capacidad de una estructura o terreno para mantener su forma y resistir la deformación o el colapso.

- Estabilidad operativa: capacidad de una estructura o terreno para funcionar de manera eficiente y segura en una operación minera.
- Geomembrana: tipo de revestimiento impermeable utilizado para evitar la filtración de líquidos y productos químicos en el suelo y el agua subterránea.
- Recuperación de metales: proceso en el que se recuperan metales valiosos de minerales y concentrados.
- Monitoreo estructural: proceso de medición y monitoreo de las características físicas y mecánicas de una estructura o terreno para garantizar su estabilidad y eficiencia.
- Plan de monitoreo: un plan detallado que establece los procedimientos y la frecuencia del monitoreo estructural en una estructura o terreno.
- Riesgo geotécnico: cualquier posible amenaza o peligro relacionado con las características físicas y mecánicas de un terreno o una estructura.
- Sistema de gestión de emergencias: un conjunto de procedimientos y recursos diseñados para prevenir y responder a emergencias y situaciones de crisis en una operación minera.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis general

Si se implementa un sistema de monitoreo estructural mediante la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en un PAD de lixiviación, entonces se garantizará la seguridad y la estabilidad de la estructura durante su operación.

2.4.2. Hipótesis específicas

- Si se realiza un análisis geotécnico del PAD de lixiviación y su entorno, se podrá determinar las características relevantes para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica.
- Si se identifican los tipos de instrumentación geotécnica adecuados para el monitoreo estructural del PAD de lixiviación y se define su ubicación óptima en la estructura, se podrá asegurar un monitoreo efectivo de la estabilidad de la estructura.
- Si se desarrollan procedimientos adecuados para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación, se garantizará la seguridad y la eficiencia del proceso.
- Si se establece un plan de monitoreo continuo y análisis de datos de la instrumentación geotécnica para detectar cualquier cambio en la estabilidad del PAD de lixiviación y tomar medidas preventivas, se podrá minimizar el riesgo de fallas en la estructura.
- Si se evalúa la viabilidad económica y técnica del sistema de monitoreo estructural mediante la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación, se podrá justificar la inversión y el uso de recursos para su implementación.

2.5. Identificación de variables

2.5.1. Variable independiente

Las variables independientes son:

Perforación e instalación de instrumentación geotécnica.

Variable dependiente

La variable dependiente es:

Garantizar el monitoreo estructural de un PAD de lixiviación

2.5.2. Variable Interviniente

Las variables intervinientes son aquellas que no son objeto directo de la investigación, pero pueden afectar o influir en las variables dependientes. En el proyecto de investigación "PERFORACIÓN E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA PARA GARANTIZAR EL MONITOREO ESTRUCTURAL DE UN PAD DE LIXIVIACIÓN - 2023", se pueden identificar las siguientes variables intervinientes:

- Las características geotécnicas del terreno donde se ubica el PAD de lixiviación
- Las condiciones climáticas, como la precipitación y la temperatura, pueden afectar la estabilidad del PAD de lixiviación.
- La calidad de la instrumentación geotécnica utilizada para el monitoreo estructural y su mantenimiento adecuado pueden influir en la precisión y eficacia de la medición.
- La gestión y operación del PAD de lixiviación pueden afectar la estabilidad de la estructura y, por tanto, la eficacia del monitoreo estructural a través de la instrumentación geotécnica.

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

La definición operacional de variables e indicadores consiste en establecer la forma en que se medirán y se evaluarán las variables y los indicadores del estudio. Estas definiciones son importantes porque permiten medir de manera objetiva los conceptos que se están estudiando, asegurando que los datos obtenidos sean fiables y válidos. A continuación, se detalla la definición operacional de las variables e indicadores del proyecto de investigación

"PERFORACIÓN E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA PARA GARANTIZAR EL MONITOREO ESTRUCTURAL DE UN PAD DE LIXIVIACIÓN – UNIDAD MINERA PUCAMARCA – MINSUR - 2023".

Variables e Indicadores:

- Variable Independiente:

Perforación e instalación de instrumentación geotécnica.

➤ Indicadores:

- Presencia de instrumentación geotécnica instalada en el PAD de lixiviación.
- Frecuencia de monitoreo estructural realizado mediante la instrumentación geotécnica.

- Variables Dependientes:

Garantizar el monitoreo estructural de un PAD de lixiviación.

➤ Indicadores:

- Nivel de inclinación del PAD de lixiviación medido mediante la instrumentación geotécnica.
- Nivel de deformación del PAD de lixiviación medido mediante la instrumentación geotécnica.

La eficacia del monitoreo estructural a través de la instrumentación geotécnica.

➤ Indicadores:

- Calidad de los datos obtenidos de la instrumentación geotécnica.
- Precisión de los datos obtenidos de la instrumentación geotécnica.

- El costo económico y el tiempo necesario para la implementación del sistema de monitoreo.

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

El proyecto de investigación "PERFORACIÓN E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA PARA GARANTIZAR EL MONITOREO ESTRUCTURAL DE UN PAD DE LIXIVIACIÓN – UNIDAD MINERA PUCAMARCA – MINSUR - 2023" puede ser clasificado como un estudio de investigación aplicada.

La investigación aplicada se enfoca en la solución de problemas prácticos y específicos en un área de interés. Su objetivo principal es aplicar los conocimientos teóricos existentes en la resolución de un problema concreto en la práctica. En este tipo de investigación, el investigador trabaja en colaboración con expertos del campo de interés y se enfoca en la generación de conocimientos útiles y aplicables.

En el proyecto de investigación en cuestión, se busca aplicar los conocimientos teóricos existentes en el campo de la geotecnia para diseñar e implementar un sistema de monitoreo estructural confiable y efectivo mediante

la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en un PAD de lixiviación. La investigación se enfoca en resolver un problema práctico específico en la industria minera, y busca generar conocimientos y recomendaciones que puedan ser aplicados en otros proyectos similares.

El estudio de investigación aplicada se basa en el uso de metodologías de investigación cuantitativas y cualitativas. En este caso, se utilizarán técnicas de recolección de datos cuantitativos, como mediciones de inclinación y deformación del PAD de lixiviación a través de la instrumentación geotécnica, así como técnicas cualitativas, como entrevistas a expertos en el campo de la geotecnia y la minería.

3.2. Nivel de investigación

Nivel de investigación exploratorio

3.3. Métodos de investigación

El método de investigación utilizado en el proyecto "PERFORACIÓN E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA PARA GARANTIZAR EL MONITOREO ESTRUCTURAL DE UN PAD DE LIXIVIACIÓN - UNIDAD MINERA PUCAMARCA – MINSUR - 2023", es el método científico. Este método es un proceso sistemático y riguroso que se utiliza para obtener conocimientos y explicaciones sobre un fenómeno o problema específico. El método científico se basa en la observación empírica, la formulación de hipótesis, la recolección de datos y la prueba de las hipótesis mediante el análisis de los datos recopilados.

El método científico se compone de varias etapas, que se describen a continuación:

- Observación: Se realiza una observación detallada del fenómeno o problema que se quiere estudiar, a fin de establecer una base para la investigación.
- Formulación de preguntas: A partir de la observación, se formulan preguntas específicas que se quieren responder mediante la investigación.
- Formulación de hipótesis: Se plantean suposiciones provisionales que se basan en la información disponible y que se utilizan para establecer una base de trabajo para la investigación.
- Diseño del estudio: Se establece el diseño del estudio y se determinan las técnicas y métodos de recolección de datos que se utilizarán para recopilar información relevante para la investigación.
- Recolección de datos: Se recopila información mediante técnicas de recolección de datos previamente definidas. Esto puede incluir encuestas, entrevistas, observaciones o mediciones.
- Análisis de datos: Se analizan los datos recopilados para determinar si se pueden rechazar o aceptar las hipótesis formuladas.
- Conclusiones: Se extraen conclusiones de los resultados del análisis de los datos y se evalúa si las hipótesis se pueden aceptar o rechazar.
- Comunicación de resultados: Se comunican los resultados de la investigación a través de publicaciones, presentaciones, informes u otros medios apropiados.

3.4. Diseño de investigación

El diseño de investigación es la estructura general que se utiliza para planificar, llevar a cabo y analizar un estudio de investigación. En el caso del proyecto "PERFORACIÓN E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA PARA GARANTIZAR EL MONITOREO ESTRUCTURAL

DE UN PAD DE LIXIVIACIÓN - UNIDAD MINERA PUCAMARCA – MINSUR - 2023", se utiliza un diseño de investigación experimental.

El diseño experimental es uno de los diseños más comunes en la investigación científica y se utiliza para evaluar la relación causa-efecto entre dos o más variables. En este diseño, se manipula una variable independiente y se observa su efecto sobre una variable dependiente, mientras se controlan las variables intervinientes.

En el proyecto de investigación en cuestión, la variable independiente es el sistema de monitoreo estructural mediante la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en un PAD de lixiviación, mientras que la variable dependiente es la seguridad y estabilidad de la estructura durante su operación. Se controlarán las variables intervinientes que puedan afectar el resultado del estudio, como las características geotécnicas del PAD de lixiviación y su entorno, el tipo de instrumentación geotécnica utilizada y los procedimientos de perforación e instalación.

Además, se utilizará un grupo de control que permitirá comparar los resultados obtenidos del grupo experimental. Este grupo de control consistirá en un PAD de lixiviación sin la implementación del sistema de monitoreo estructural mediante la perforación e instalación de instrumentación geotécnica.

En el diseño experimental, se pueden utilizar diferentes técnicas de muestreo, como el muestreo aleatorio simple o el muestreo estratificado, para seleccionar la muestra de la población. En el caso del proyecto de investigación, se seleccionará una muestra representativa de PADs de lixiviación que se utilizarán como grupo experimental y grupo de control.

Finalmente, se utilizarán diferentes técnicas de análisis de datos para evaluar la relación causa-efecto entre las variables independientes y dependientes. Esto puede incluir el análisis estadístico de las diferencias entre los resultados obtenidos del grupo experimental y del grupo de control, así como el análisis de correlación para evaluar la relación entre las variables.

3.5. Población y muestra

3.5.1. Población

La población en el proyecto "PERFORACIÓN E INSTALACIÓN DE INSTRUMENTACIÓN GEOTÉCNICA PARA GARANTIZAR EL MONITOREO ESTRUCTURAL DE UN PAD DE LIXIVIACIÓN - UNIDAD MINERA PUCAMARCA – MINSUR - 2023", es la totalidad de los PADs de lixiviación que se encuentran en operación en la industria minera. Sin embargo, es poco práctico y costoso realizar un estudio en toda la población, por lo que se utilizará una población que es el PAD de lixiviación.

3.5.2. Muestra

La muestra censal se refiere a cuando el volumen de la muestra coincide con la población. Este método se aplica cuando la población es relativamente reducida y se requiere determinar la percepción de la totalidad de la población, para este caso la muestra también el PAD de lixiviación.

3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

- Observación directa: Esta técnica implica observar directamente el PAD de lixiviación y su entorno para registrar las características relevantes, como la topografía, el clima, la presencia de fallas geológicas, entre otros.

- Registro de datos: La instrumentación geotécnica instalada en el PAD de lixiviación puede proporcionar datos continuos sobre la estabilidad de la estructura, como la deformación, la presión de agua y la temperatura.
- Análisis estadístico: Los datos recopilados mediante las diferentes técnicas de recolección de datos pueden ser analizados estadísticamente para evaluar la relación entre las variables y determinar si hay una correlación significativa entre ellas.

3.7. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

- Análisis descriptivo: Esta técnica se utiliza para describir y resumir los datos recopilados. Puede incluir medidas como la media, la mediana, la moda y la desviación estándar.
- Análisis de correlación: Esta técnica se utiliza para evaluar la relación entre dos o más variables. Permite determinar si hay una relación positiva o negativa entre las variables, y si la relación es significativa.

3.8. Tratamiento estadístico

El análisis estadístico puede no ser la técnica más adecuada para todos los objetivos específicos del proyecto. Por ejemplo, para los objetivos de análisis geotécnico y de identificación de instrumentación adecuada, se pueden utilizar técnicas de modelado geotécnico, que implican la utilización de modelos matemáticos para simular el comportamiento del PAD de lixiviación y determinar los parámetros relevantes para la instalación de instrumentación.

Para el desarrollo de los procedimientos adecuados para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica, se pueden utilizar técnicas de ingeniería y seguridad en el trabajo, que implican la definición de procedimientos estandarizados y la evaluación de riesgos asociados a la perforación e instalación.

Para el establecimiento del plan de monitoreo continuo y análisis de datos de la instrumentación geotécnica, se pueden utilizar técnicas de análisis de series de tiempo, que implican la evaluación de patrones y tendencias en los datos registrados por la instrumentación, para detectar cualquier cambio en la estabilidad del PAD de lixiviación.

Finalmente, para la evaluación de la viabilidad económica y técnica del sistema de monitoreo estructural, se pueden utilizar técnicas de análisis de costos y beneficios, que implican la estimación de los costos asociados a la implementación y mantenimiento del sistema de monitoreo, así como la evaluación de los beneficios derivados de la detección temprana de fallas en el PAD de lixiviación y la mitigación de los riesgos asociados a su operación.

3.9. Orientación ética filosófica y epistémica

En primer lugar, es fundamental que se garantice el consentimiento informado de todos los participantes en el proyecto, tanto en lo que se refiere a la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación, como al monitoreo y análisis de los datos. Además, se deben respetar los principios éticos de confidencialidad y privacidad de los datos recopilados durante el proyecto, y se debe proteger la identidad de los participantes en la medida de lo posible.

Es importante asegurarse de que todos los procedimientos de perforación e instalación de instrumentación geotécnica se realicen de manera segura y eficiente, y que se minimicen los riesgos para los trabajadores involucrados en el proyecto. Además, se deben cumplir con todas las normativas y regulaciones pertinentes en materia de seguridad en el trabajo.

Es fundamental que se realice un análisis riguroso y detallado de los datos recopilados durante el proyecto, y que se evite la manipulación o alteración de los datos para obtener resultados favorables. En todo momento se debe garantizar la honestidad y transparencia en la presentación de los resultados obtenidos.

En resumen, para asegurar una orientación ética adecuada en este proyecto de investigación, se deben respetar los derechos de los participantes y garantizar la integridad y calidad de la investigación, asegurándose de que se cumplan todas las normativas y regulaciones pertinentes. También es importante considerar la seguridad de los trabajadores involucrados y la honestidad y transparencia en la presentación de los resultados obtenidos.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

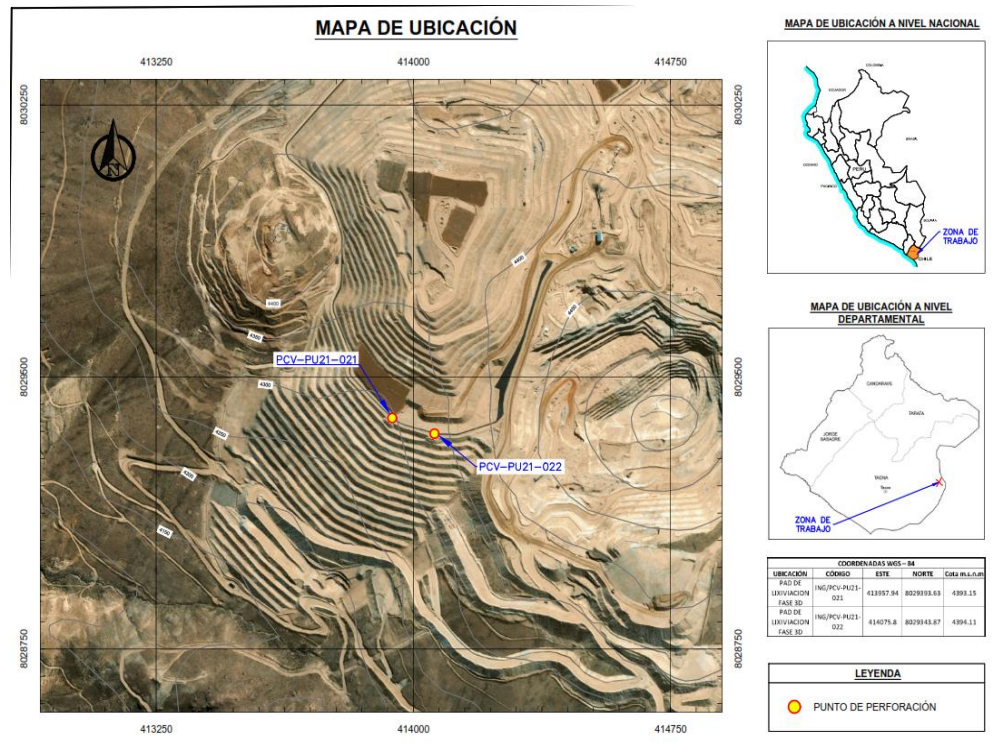
4.1. Descripción del trabajo de campo

4.1.1. Ubicación y accesibilidad

Los trabajos se realizaron en el PAD de lixiviación 3D, que se encuentra dentro de la Unidad Minera Pucamarca, ubicada cerca al hito 52 de la frontera peruano – chilena en el distrito de Palca, provincia de Tacna y departamento de Tacna.

Figura 1:

Ubicación de Unidad Minera Pucamarca (Fuente. propio)



El PAD de lixiviación se encuentra en recrecimiento en la FASE 3D, por lo cual en la etapa final viendo los esfuerzos maximos de inclinacion se planifica realizar la instalacion de 2 inclinometros en lugares estrategicos y adosados a estos estarán ubicados los piezómetros de cuerda vibrante, en uno que es el de mayor profundidad se colocaran 3 piezómetros de cuerda vibrante y en el mas corto se pondran 2 piezómetros de cuerda vibrante lo cual nos permitira monitorear la estructura del PAD de lixiviacion y prevenir eventos no deseados.

Los puntos de perforación se encuentran en PAD DE LIXIVIACION FASE 3D dentro de las instalaciones la UM Pucamarca con Coordenadas UTM que se puede observar en el siguiente cuadro.

Figura 2:
PAD DE LIXIVIACION FASE 3D dentro de las instalaciones la UM
Pucamarca (Fuente: Propio)

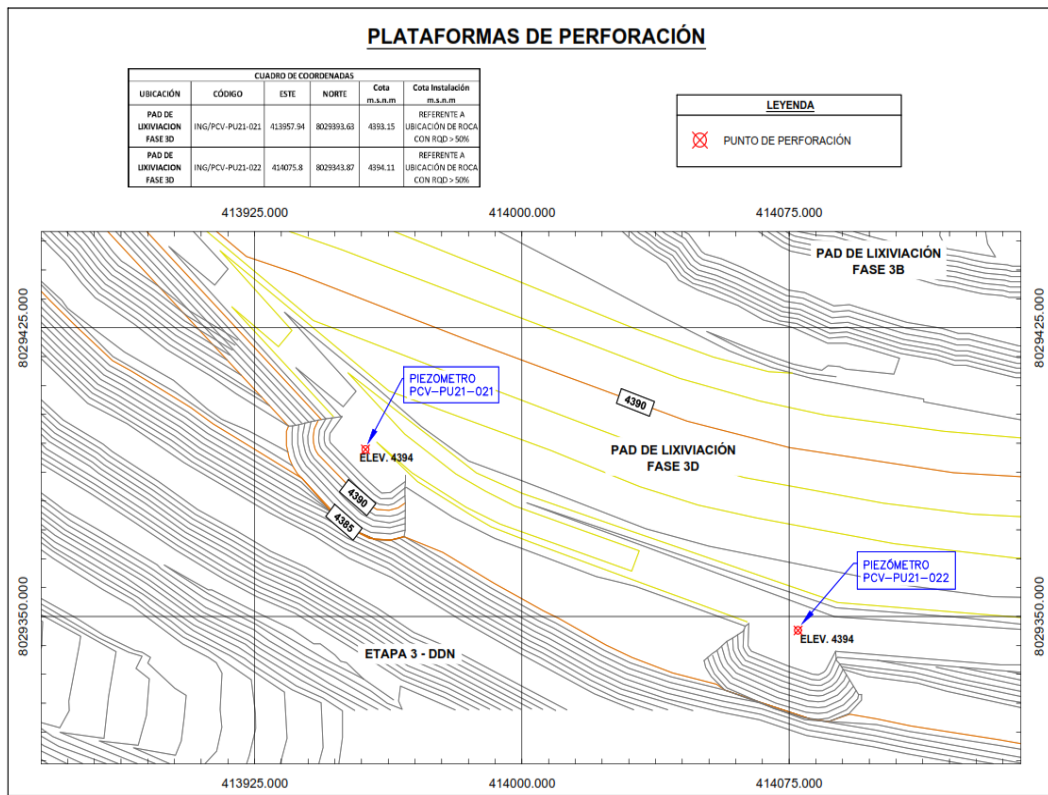


Tabla 1:

Ubicación de sondajes diamantinos en PAD de lixiviación FASE 3D.

COORDENADAS WGS – 84					
UBICACIÓN	CÓDIGO	ESTE	NORTE	Cota m.s.n.m	Cota de Instalación m.s.n.m
PAD DE LIXIVIACION FASE 3D	ING/PCV- PU21-021	413957.94	8029393.63	4393.15	REFERENTE A UBICACIÓN DE ROCA CON RQD > 50%
PAD DE LIXIVIACION FASE 3D	ING/PCV- PU21-022	414075.80	8029343.87	4394.11	REFERENTE A UBICACIÓN DE ROCA CON RQD > 50%

Los datos presentados en el cuadro anterior corresponden a los puntos de perforación, indicándose las coordenadas UTM y la altura reportada.

4.1.2. Metodología de trabajo utilizada

- Los trabajos se realizaron en 02 turnos (día y noche).
- La finalidad de obtener estabilidad del pozo se tiene en cuenta lo siguiente:
 - El ritmo de penetración no debe ser superior a la velocidad de corte del tubo exterior.

- La velocidad de rotación debe limitarse de tal modo que no dañe o rompa el testigo o quemé la broca (tricono).
- Para el buen armado de pared durante la perforación se debe usar un buen lodo de perforación.
- Para evitar derrumbes se usa casing HW que ayudara también durante la instalación del piezómetro e inclinómetro debido a que el terreno es demasiado inestable por ser este un botadero.
- En cuanto al tipo de perforación con tricono (sin recuperación) y perforación DDH (con recuperación de muestra), se realizaron bajo el diseño otorgado por la consultora, el cual describe las profundidades por cada pozo de perforación.
- Estas profundidades estarán sujetas al contacto con roca y al RQD encontrado, este debe ser óptimo para la instalación (RQD > 50% en 5 metros)

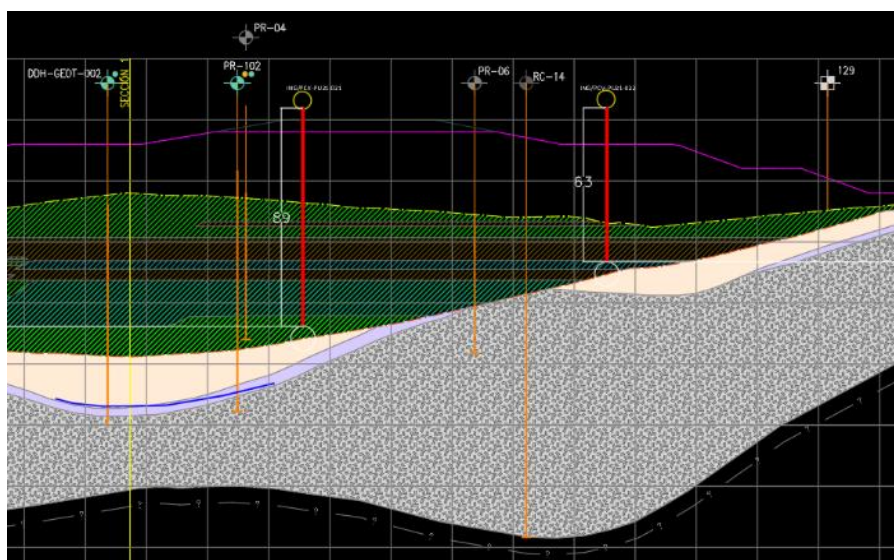
Tabla 2:

Profundidades indicadas para recuperación de muestras.

CÓDIGO	TIPO DE PERFORACIÓN	Muestra	PROFUNDIDAD (m)
ING/PCV- PU21-021	TRICÓNICA	Sin recuperación	0.00 – 89.00 (cota: 4300.36)
	DIAMANTINA	Con recuperación	89.00 – 130.00
ING/PCV- PU21-022	TRICÓNICA	Sin recuperación	0.00 – 63.00 (cota: 4326.81)
	DIAMANTINA	Con recuperación	63.00 – 70.00

Figura 3:

Perfil de sondajes diamantinos en PAD de lixiviación FASE 3D (Fuente: Propio)



Preparación de lodos. - El control del buen manejo de los aditivos se inicia al momento en que la bentonita es mezclada con el polímero para que la fusión de estos aditivos sea complementaria se usa agua con Ph superior a 7.

4.1.3. Trabajos preliminares

Los trabajos se iniciaron con la estandarización de la plataforma del pozo de perforación ING/PCV-PU21-021 y ING/PCV-PU21-022, nuestro equipo de Perforación se traslada al punto de perforación a fin de ejecutar los trabajos encomendados (el punto de perforación fue marcado por topografía), se obtuvo el Visto Bueno por parte de la Minera para dar inicio a las actividades de Perforación.

4.1.4. Perforación diamantina DDH

Se inicia con la perforación utilizando una máquina perforadora para fines geotécnicos, perforación con método rotativo con tricono para asegurar el avance de las perforaciones, estas perforaciones son sin recuperación hasta las profundidades ya descritas anteriormente según diseño, ya que se ubican en la parte del botadero de PAD DE LIXIVIACION FASE 3D.

Para los trabajos de perforación de case inclinométrico e instalación de piezómetros de cuerda vibrante, se presenta el siguiente procedimiento:

Una vez ubicada la máquina de perforación en el punto indicado por el cliente, los ayudantes de perforación colocarán tacos de seguridad debajo de los estabilizadores hidráulicos posteriores y delanteros de la máquina perforadora, teniendo bastante cuidado con los atrapamientos de las manos y los pies. En caso de existir irregularidad del terreno se procederá a nivelar el terreno con pico, lampa y barreta.

El operador de perforaciones da la señal de aviso antes de dar arranque al motor de la máquina.

El perforista procederá a bajar los estabilizadores hidráulicos y nivela la máquina usando los estabilizadores delanteros y posteriores. Es recomendable colocar señalización con conos, mallas o cintas de seguridad porque nadie debe circular sin la autorización del operador por la zona de impacto de los niveladores hidráulicos.

El perforista comunicará a todos los involucrados que va a proceder a levantar la torre, por lo tanto, mantenerse en la ubicación que tenían al momento de bajar las gatas hidráulicas.

El perforista bajará el mástil hasta el ángulo positivo (horizontal) o negativo (vertical) para realizar la perforación según programa; durante esta maniobra se coordinará con el ayudante de perforación (que debe estar en una ubicación visible para el operador), quien se encargará de verificar que no se enganche de algún elemento cuando se esté bajando el mástil. Una vez colocado en el ángulo requerido, el ayudante colocará los seguros metálicos para fijar el mástil.

En el caballete para tuberías se acondiciona el tubo exterior o core barrel con la broca, reaming shell, candado y portacandado, cabezal y luego se procede a poner el tubo interior dentro del barrel.

Se enrosca la broca en la parte inferior de la tubería y el “Kely” en la parte superior de la bomba conexión del equipo de perforación.

Se regulan los cabezales del tubo interior con el tubo exterior, se instala la manguera de alta presión para el agua a la bomba conexión en la manguera de alta presión del equipo y ésta al tubo de avance “kely” de perforación diamantina.

El tubo exterior acondicionado (armado) se coloca en la unidad de rotación del equipo de perforación.

Luego se procederá con la perforación diamantina y se hará el armado las veces necesarias.

El perforista coordinará con los ayudantes para realizar la maniobra de tubería, ya sea para profundizar la perforación, para retirar la tubería del sondaje, para cambio de broca o por finalización.

Durante la perforación el perforista verificará el buen funcionamiento del sistema de refrigeración, sistema eléctrico (sensores), nivel de lubricantes, y los ayudantes verificarán el nivel de agua o fluido de perforación en las tinas y el retorno de lodo a las pozas de sedimentación.

El perforista controlará el caudal de agua o fluido de perforación, rpm, el contrapeso y la presión de avance según el tipo de terreno a perforar hasta que concluya la corrida. Los ayudantes estarán a la expectativa, uno observando de cerca las tinas con agua y la bomba de alimentación de fluido de perforación y el segundo debe estar observando la operación y atento para apoyar en las maniobras del perforista o imprevistos.

Concluida la corrida de perforación, los ayudantes no podrán manipular la tubería hasta que la rotación de la máquina se detenga; a indicación del perforista proceden a desembonar el "kely" con la máquina de los otros tubos, una vez sacado el kely, el perforista ordenará al ayudante colocar el pescador acoplado al stuffing box, luego se colocará manguera de 1" pulgada para bombear el agua; la inserción del pescador dentro de la tubería para que este atrape el tubo interior y se pueda realizar la extracción del tubo interior con la muestra.

El perforista bombeara hidráulicamente el pescador en 20 Bares hasta que llegue a conectar el pescador con el tubo interior con muestra.

Una vez conectado el pescador y el tubo interior se abrirá la llave del desfogue de 1" para jalar con cable wire line hasta que llegue al stuffing box. El perforista indicara al ayudante para desconectar las mangueras de 1" y el stuffing box.

Estando el tubo interior con muestra fuera de la tubería de perforación, ésta será descartada por indicación del cliente y se continuará con la perforación hasta llegar a la profundidad programada.

El uso y preparación de los aditivos se realizará en 2 de bandejas o tinas de lodos en la primera se preparará la bentonita, en la segunda tina se le añade el aditivo para darle la viscosidad necesaria y se inyectará directamente al pozo de perforación, teniendo en cuenta los controles necesarios, EPP's y Kit antiderrame.

Los trabajos de perforación se realizaron en 02 turnos (día y noche).

Para evitar derrumbes se usa casing HW que ayudara también durante la instalación de los piezómetros.

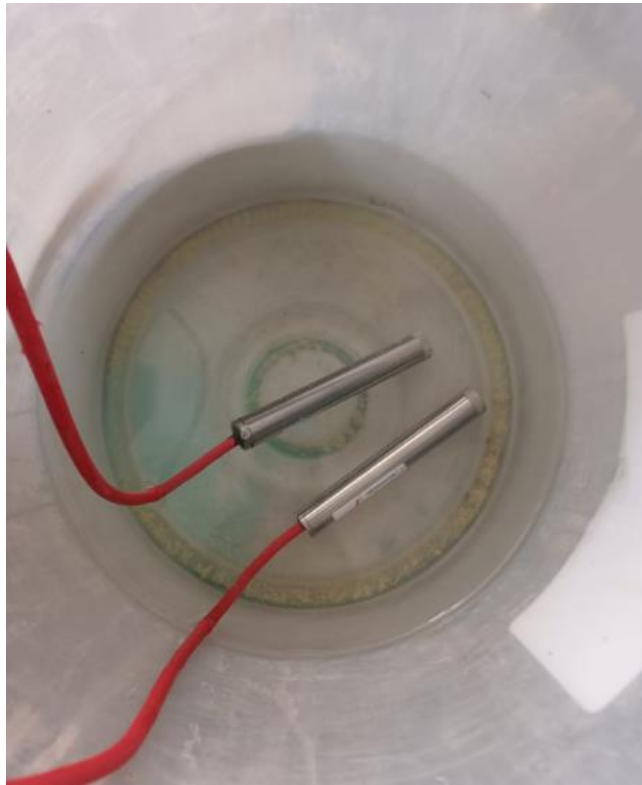
En cuanto al tipo de perforación DDH (con recuperación de muestra), se realizaron bajo el diseño otorgado por MINSUR, el cual describe las profundidades por cada pozo de perforación.

Para la instalación de Piezómetros de cuerda vibrante se debe tener en cuenta lo siguiente:

Antes de insertar los piezómetros de cuerda vibrante al pozo de perforación hasta el punto de ubicación final, se debe realizar la saturación de los piezómetros de cuerda vibrante durante por lo menos 24 horas antes de su

instalación en una bandeja o recipiente con agua como se muestra en la siguiente fotografía.

Figura 4:
Saturación de piezómetros de cuerda vibrante (Fuente: Propio)



Se deben realizar las primeras lecturas de cada sensor instalado las cuales son:

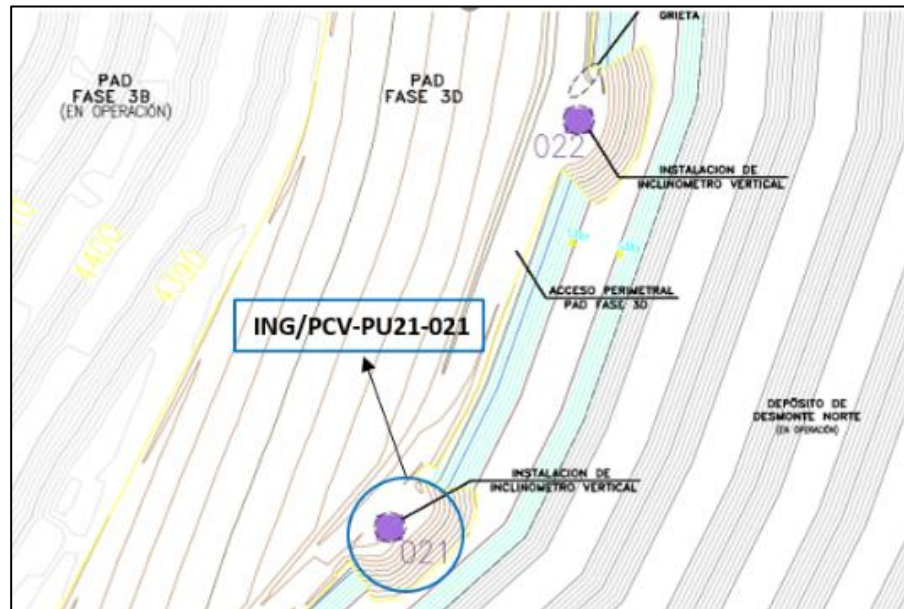
- Lectura antes de saturar
- Lectura después de saturar
- Lectura después de instalar

Y estas lecturas son muy importantes para que a través de fórmulas de fábrica y la calibración que cada sensor tiene, se pueda obtener la data que se muestra en la parte de resultados.

4.1.5. Perforación en el punto ING/PCV-PU21-021.

Figura 5:

Punto de perforación ING/PCV-PU21-021 en PAD de lixiviación FASE 3D
(Fuente: Propio)



Los trabajos de traslado de la perforadora Delta D 150 se realizó el, también se comenzó la Estandarización de nueva plataforma de perforación para el sondaje ING/PCV-PU21-021 en el PAD de lixiviación fase 3D. Disposición y nivelación de máquina. Traslado de materiales desde la anterior plataforma.

Una vez culminada la estandarización de la plataforma de perforación ING/PCV-PU21-021, asimismo, se verificó con topografía la ubicación del punto de perforación sondaje ING/PCV-PU21-021, se inició la perforación con broca tricono con tubería HW. Hasta el contacto con roca para iniciar la recuperación de los testigos con el fin de evaluar el RQD del macizo rocoso.

Se llegó a la profundidad adecuada para la instalación, siendo esto verificado por CQA. Alcanzando la siguiente profundidad final:

Tabla 3:

Profundidades finales alcanzadas en línea HQ y HW EN EL PUNTO ING/PCV-
PU21-021.

DIAMETRO DE PERFORACION	PROFUNDIDAD FINAL (m)	PROFUNDIDAD DE CONTACTO CON ROCA (m)	OBSERVACIONES
HQ	122.90	111.30	A los 111.30 m contacto entre suelo residual y Roca Andesita.
HW	114.00	111.30	--

Corridas con recuperación a partir de contacto con roca línea HQ,

Recuperación de testigos diamantinos a partir de contacto con roca.




Tabla 4:

Corridas de recuperación en HQ EN EL PUNTO ING/PCV-PU21-021.

METROS PERFORADOS			TESTIGO		RECUP.	Ø
DESDE(m)	HASTA(m)	TOTAL(m)	RECUP. (m)	RQD (m)	AGUA (%)	Broca
110.20	111.60	1.40	1.30	-	Sin retorno	HQ
111.60	112.50	0.90	0.70	0.47	Sin retorno	HQ
112.50	114.00	1.50	1.50	0.00	Sin retorno	HQ
114.00	114.60	0.60	0.60	0.40	Sin retorno	HQ
114.60	115.90	1.30	0.90	0.12	Sin retorno	HQ
115.90	118.90	1.50	1.50	0.75	Sin retorno	HQ
117.40	117.40	1.50	1.50	0.55	Sin retorno	HQ
118.90	120.10	1.50	1.50	1.05	Sin retorno	HQ
120.10	121.60	1.50	1.50	0.86	Sin retorno	HQ
121.60	122.90	1.50	1.50	0.63	Sin retorno	HQ

Cabe resaltar que la línea HW es de revestimiento por lo cual no se recupera muestra.

4.1.6. Determinación de RQD en tramos de las muestras mayor a 50 %

1. Recuperación de muestras (testigos) para evaluar el RQD. ING/PCV-PU21-021

a. 1era caja de material recuperado, en el tramo 91.60 contacto entre relleno y morrenas

b. 2da caja de material recuperado, botonería recuperada.

c. 3ra caja de testigos con material recuperado con bolonerías.



- d. 4ta caja de testigo con material recuperado, en el tramo 110.60 a 111.70 se evidencia contacto entre morrenas y aloramiento de roca (andesita)



- e. 5ta caja de muestra con roca recuperada. Con RQD bajo en los primeros tramos.



- f. 6ta caja de muestra con roca recuperada, con el RQD > 50% ideal para la instalación del Inclinómetro

4.1.7. Instalación de instrumentación geotécnica en el punto ING/PCV-PU21-021.

Para este sondaje ING/PCV-PU21-021 se instaló el case inclinométrico con 03 sensores de cuerda vibrante a diferentes profundidades.

Una vez alcanzada la profundidad para la instalación, se liberó por parte de la consultora y se procedió con la instalación de la instrumentación geotécnica, teniendo en cuenta el diseño otorgado.

Las profundidades de instalación del case inclinométrico y de los piezómetros de cuerda vibrante se detallan a continuación:

Tabla 5:

Profundidades de instalación de sensores ING/PCV-PU21-021 (Fuente: Propio)

INSTRUMENTOS GEOTECNICOS	CODIGO	COTA DE INSTALACION (m.s.n.m.)	PROFUNDIDAD (m)
Tubería (case) Inclinométrica	ING/PCV- PU21-021		122.90
Piezómetro de cuerda vibrante	PCV-PU21- 021A	4279.35	113.80
Piezómetro de cuerda vibrante	PCV-PU21- 021B	4282.15	111.00
Piezómetro de cuerda vibrante	PCV-PU21- 021C	4298.15	95.00

Características de los sensores (piezómetros de cuerda vibrante), se describen a continuación:

Se emplearon 03 sensores.

Tabla 6:

Características de los sensores (piezómetros de cuerda vibrante) (Fuente: Propio)

CÓDIGO DEL POZO INCLINOMETRICO		PROFUNDIDAD DEL POZO INCLINOMETRICO				
ING/PCV-PU21-021		124.50 m				
Descripción	Marca	Modelo	Serie	Capacidad	Código	Cable (m)
Piezómetro de cuerda vibrante	RST Instruments	VW2100-1.0	VW143019	1.0 Mpa	PCV-PU21-021A	150.00
Piezómetro de cuerda vibrante	RST Instruments	VW2100-2.0	VW138004	2.0 Mpa	PCV-PU21-021B	145.00
Piezómetro de cuerda vibrante	RST Instruments	VW2100-1.0	VW149630	1.0 MPa	PCV-PU21-021C	105.00

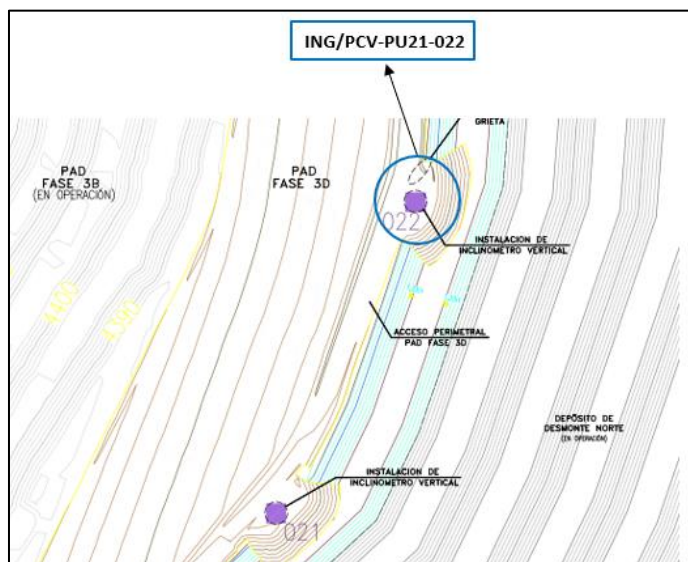
En cuanto a la tubería o case inclinométrico: La profundidad final del ING/PCV-PU21-021= 122.90 m; empleándose 41.00 tuberías inclinométricas.

4.1.8. Perforación en el punto ING/PCV-PU21-022.

Figura 6:

Punto de perforación ING/PCV-PU21-022 en PAD de lixiviación FASE 3D

(Fuente: Propio)



Se alcanzando la siguiente profundidad final:

Tabla 7:

Profundidades finales alcanzadas en línea HQ y HW EN EL PUNTO ING/PCV-PU21-022.

DIAMETRO DE PERFORACION	PROFUNDIDAD FINAL (m)	PROFUNDIDAD DE CONTACTO CON ROCA (m)	OBSERVACIONES
HQ	86.30	78.20	De los 78.20 m a los 78.40 m contacto entre material de relleno, bolonería (vuggy silica) y roca andesita (Alteración argílica intermedia).
HW	75.00	78.20	--

Corridas con recuperación a partir de contacto con roca línea HQ

Tabla 8:

Recuperación de testigos diamantinos a partir de contacto con roca en el punto
ING/PCV-PU21-022

METROS PERFORADOS			TESTIGO		RECUP.	Ø
DESDE(m)	HASTA(m)	TOTAL(m)	RECUP. (m)	RQD (m)	AGUA (%)	Broca
78.20	79.70	1.50	1.30	0.52	Sin retorno	HQ
79.70	81.20	1.50	1.50	1.50	Sin retorno	HQ
81.20	82.70	1.50	1.50	1.23	Sin retorno	HQ
82.70	84.20	1.50	1.40	1.20	Sin retorno	HQ
84.20	84.80	0.60	0.50	0.45	Sin retorno	HQ
84.80	86.30	1.50	1.50	1.30	Sin retorno	HQ

Cálculo de RQD a partir de las testigos

1. Recuperación de muestras (testigos) para evaluar el RQD. ING/PCV-PU21-022



- Recuperación de testigos diamantinos desde los 66.30 m hasta encontrar roca, en los primeros tramos hasta los 78.20 m solo se evidencia la presencia de bolonerías.
- En el tramo de 78.20 m a los 78.40 m se evidencia el contacto entre bolonerías de vuggy silica y roca.



- Evidencia de roca con RQD > 50% haciéndola ideal para la instalación del inclinómetro.



- Último tramo de recuperación con un RQD > 50%.

4.1.9. Instalación de instrumentación geotécnica en el punto ING/PCV-PU21-022.

Para este sondaje ING/PCV-PU21-022 se instaló el case inclinométrico con 02 sensores de cuerda vibrante a diferentes profundidades. Una vez alcanzada la profundidad para la instalación, se liberó por parte del consultor y se procedió con la instalación de la instrumentación geotécnica, teniendo en cuenta el diseño otorgado por el consultor.

Las profundidades de instalación del case inclinométrico y de los piezómetros de cuerda vibrante se detallan a continuación:

Tabla 9:

Profundidades de instalación de sensores ING/PCV-PU21-022. (Fuente: Propio)

SENSOR	CODIGO	COTA DE INSTALACION (m.s.n.m.)	PROFUNDIDAD (m)
Tubería (case) Inclinométrica	ING/PCV-PU21-022		86.30
Piezómetro de cuerda vibrante	PCV-PU21-021A	4319.11	75.00
Piezómetro de cuerda vibrante	PCV-PU21-021B	4329.11	65.00

Características de los sensores (piezómetros de cuerda vibrante), se describen a continuación:

Se emplearon 2 sensores.

Tabla 10:

Descripción de sensores instalados ING/PCV-PU21-022 (Fuente: Propio)

Descripción	Marca	Modelo	Serie	Capacidad	Código	Cable (m)
Piezómetro de cuerda vibrante	RST Instruments	VW2100-1.0	VW150349	1.0 Mpa	PCV-PU21-022A	100.00
Piezómetro de cuerda vibrante	RST Instruments	VW2100-2.0	VW150330	2.0 Mpa	PCV-PU21-022B	100.00

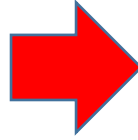
En cuanto a la tubería (case) inclinométrico: La profundidad final del ING/PCV-PU21-022= 86.30 m; empleándose 29.00 tuberías inclinométricas

4.1.10. Encofrado y protección de tubería (case) inclinométrica y sensores.

Para los dos inclinómetros se vaciaron dados de concreto (de 50.00 cm x 50.00 cm por 50.00 cm de profundidad) y se colocaron protectores metálicos, lo cual garantiza su protección y durabilidad. Estos dados se realizaron según diseño. Los cables de piezómetros salen del protector metálico y hace el recorrido enterrado y protegido por una tubería Conduit de PVC con el interior metálico, hasta el dado de concreto (0.50 m x 0.50 m x 0.50 m), donde sobre sale con una protección extra de tubería HDPE de 4", hasta conectarse en el nodo de telemetría para su automatización.



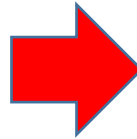
ING/PCV-PU21-021 encofrado y protegido para su automatización



ING/PCV-PU21-021 instalado



ING/PCV-PU21-022 encofrado y protegido para su automatización



ING/PCV-PU21-022 instalado

4.1.11. Instalación de nodos de telemetría

PASO 1.- Ensamblaje de mástil de acero inoxidable.

- Se prepara las dos partes del mástil, de 2.00 m cada una.
- Se instala el jebe de unión entre los anillos de cada parte del mástil.
- Con una abrazadera tipo clamp se unen las dos partes del mástil.
- En el extremo superior del mástil se instala una tapa de acero inoxidable.

PASO 2.- Fijación del Nodo de telemetría.

- El personal dispone el nodo de telemetría y lo instala a 20.00 cm del extremo superior del mástil.
- Se dispone a pasar las abrazaderas tipo U-bolt en la placa de montaje del nodo de telemetría, de tal manera que el nodo se fije al mástil de 2” de diámetro.
- Se procede a ajustar los pernos del kit de montaje con una llave de boca N°11.

PASO 3.- Conexión de cable piezométrico.

- Se habilita los terminales del cable piezométrico.
- Se conecta los terminales del cable piezométrico a la bornera interna de cada nodo, teniendo en consideración el código de colores para frecuencia y temperatura.
- Con un precinto de seguridad se fija el cable piezométrico en la longitud del mástil, protegido por una tubería Conduit en su recorrido.

PASO 4.- Instalación de mástil con nodo en la excavación.

- El ing. Instrumentista realiza la verificación de que la excavación sea apta para la instalación.
- Se instala el mástil en la excavación, considerando la verticalidad del mástil con un nivel de burbuja.
- El ing. instrumentista indica que se rellene la excavación con material propio.

- El ing. instrumentista verifica el correcto relleno y compactado de la excavación.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

Como se ha dicho anteriormente es fundamental el contacto con roca y que el RQD de esta roca sea mayor a 50%, debido a esto, en el siguiente cuadro se muestra los sondajes programados vs los ejecutados en campo viendo el comportamiento del terreno.

Tabla 11:

Sondajes programados vs los ejecutados (Fuente: Propio)

ITEM	PERFORACIÓN		PROFUNDIDAD (m)	
	UBICACIÓN	CODIGO	PROGRAMADA	EJECUTADA
1	PAD DE LIXIVIACION FASE 3D	ING/PCV-PU21-021	130.00	122.90
2	PAD DE LIXIVIACION FASE 3D	ING/PCV-PU21-022	130.00	86.30
TOTAL METROS PERFORADOS EN LINEA HQ				209.00 metros
TOTAL METROS PERFORADOS EN LINEA HW (REVESTIMIENTO)				189.00 metros
TOTAL DE METROS CON AMBAS LINEAS DE PERFORACION				398.00 metros

4.2.1. Primeras lecturas de los piezómetros de cuerda vibrante y análisis de resultados

Las primeras lecturas de estos instrumentos geotécnicos son fundamentales para el análisis posterior, en el caso de los piezómetros de cuerda vibrante las primeras las primeras lecturas se ponen en una formula lineal y polinomial adicionando los datos de calibración que cada uno de estos tiene, cada piezómetro de cuerda vibrante tiene unos valores únicos de calibración.

En el caso de la tubería inclinométrica se realiza las lecturas base que se promediaran, el cual se tendrá como referente para las futuras mediciones.

4.2.2. Punto ING/PCV-PU21-021.

Se realizaron las primeras lecturas para la instalación de cada uno de los sensores (PCV-PU21-021A, PCV-PU21-021B, PCV-PU21-021C).

Tabla 12:

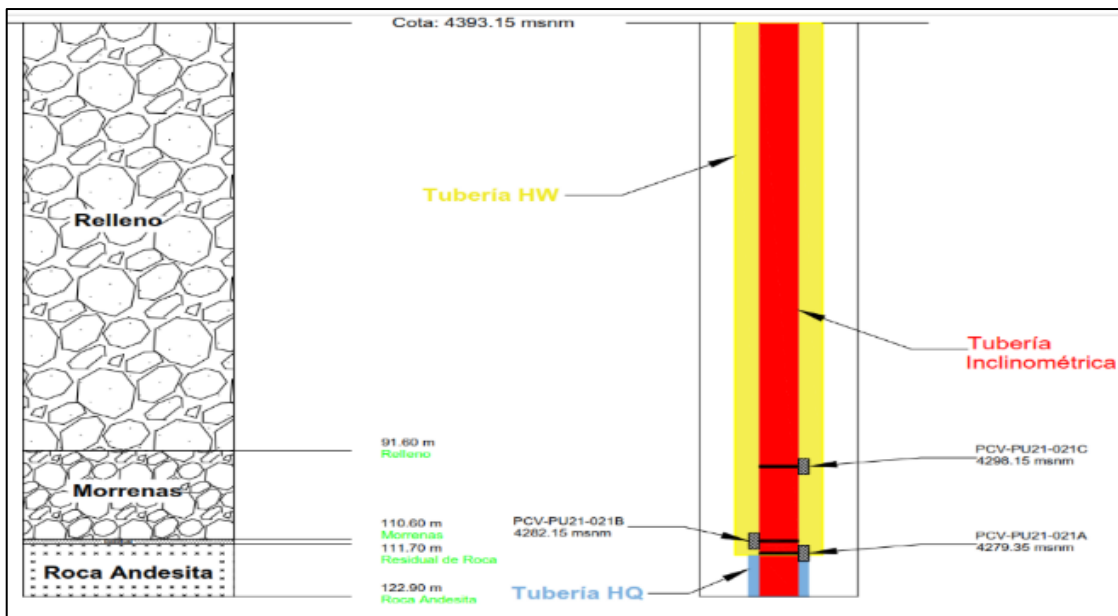
Primeras lecturas de sensores instalados ING/PCV-PU21-021 (Fuente: Propio)

Código de Sensor	Fecha	Hora	L (B)	L (Hz)	Ohm	T (°C)	Observaciones
PCV-PU21-021A	7/01/2023	16:46	9223.669	3037.049	5146.90	13.10	Lectura antes de instalación
	8/01/2023	13:04	9221.962	3036.768	6726.12	7.50	Lectura inicial (piezómetro saturado)
	8/01/2023	18:15	8246.331	2871.643	5563.51	11.50	Lectura después de la instalación
	9/01/2023	17:40	8817.579	2969.441	5952.88	10.10	Lectura posterior a la instalación
PCV-PU21-021B	7/01/2023	17:13	9320.660	3052.976	5359.10	12.30	Lectura antes de instalación
	8/01/2023	13:10	9312.721	3051.675	6942.70	6.90	Lectura inicial (piezómetro saturado)
	8/01/2023	18:17	8878.928	2979.753	5555.75	11.50	Lectura después de la instalación

	9/01/2023	17:44	9120.068	3019.945	6030.29	9.80	Lectura posterior a la instalación
PCV-PU21-021C	7/01/2023	17:26	9635.756	3104.151	5552.26	11.50	Lectura antes de instalación
	8/01/2023	13:16	9628.709	3103.016	6898.44	7.00	Lectura inicial (piezómetro saturado)
	8/01/2023	18:22	9068.740	3011.435	5691.18	11.00	Lectura después de la instalación
	9/01/2023	17:41	9629.409	3103.129	5694.12	11.00	Lectura posterior a la instalación

Figura 7:

Perfil final de detalle de Instalación de la instrumentación geotécnica (Fuente: Propio)



4.2.2.1. Punto ING/PCV-PU21-022.

Se realizaron las primeras lecturas para la instalación de cada uno de los sensores (PCV-PU21-022A, PCV-PU21-022B).

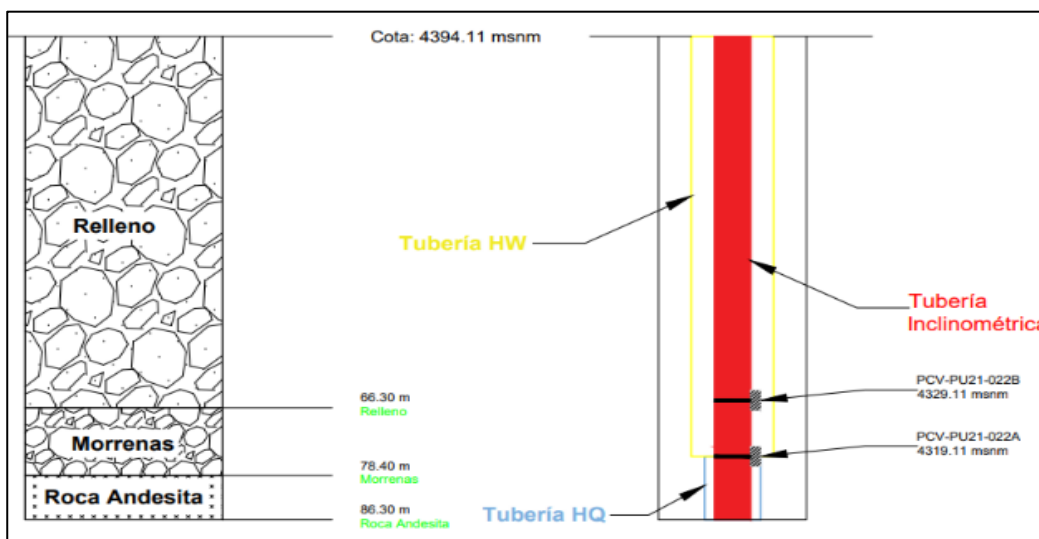
Tabla 13:

Primeras lecturas para la instalación de cada uno de los sensores (PCV-PU21-022A, PCV-PU21-022B) (Fuente: Propio)

Código de Sensor	Fecha	Hora	L (B)	L (Hz)	Ohm	T (°C)	Observaciones
PCV-PU21-022A	15/01/2023	16:49	8984.454	2997.408	3889.89	19.20	Lectura antes de la instalación
	16/01/2023	10:11	8979.821	2996.635	7741.17	4.70	Lectura inicial (piezómetro saturado)
	16/01/2023	13:32	8988.603	2998.100	3032.33	24.80	Lectura después de la instalación
	17/01/2023	08:45	8535.560	2921.568	5741.80	10.80	Lectura posterior a la instalación
PCV-PU21-022B	15/01/2023	16:56	8674.511	2945.252	4631.05	15.40	Lectura antes de la instalación
	16/01/2023	13:10	8679.159	2946.041	7814.59	4.50	Lectura inicial (piezómetro saturado)
	16/01/2023	13:38	8878.928	2946.079	3379.71	22.30	Lectura después de la instalación
	17/01/2023	08:43	8563.482	2926.343	5704.64	11.00	Lectura posterior a la instalación

Figura 8:

Se tiene el perfil final de detalle de Instalación de la instrumentación geotécnica (Fuente: Propio)



4.2.2.2. Automatización de piezómetro de cuerda vibrante

En cuanto al producto final de la instrumentación Geotécnica, las lecturas son automáticas y se presentan las plataformas, cada minera o empresa tiene un usuario y contraseña, al acceder a esta página salen la totalidad de sensores instalados y pueden acceder a la información en tiempo real, así como descargar dicha información para llevar un control Geotécnico más eficiente.

A continuación, se presenta una imagen de los sensores Instalados, como los sensores son codificados y presentados en un mapa con la ubicación real.

Figura 9:

Vista general de datos del piezómetro de cuerda vibrante (Fuente: Propio)



Vista general de datos del piezómetro de cuerda vibrante donde se resumen los siguientes datos:

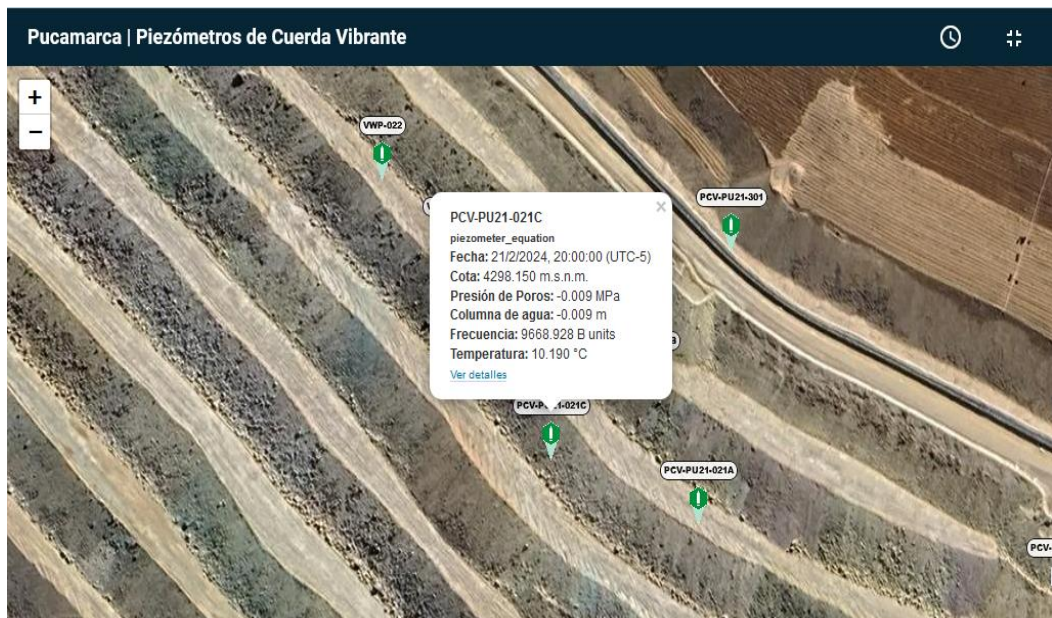
- Como encabezado el número del sensor: en este caso el PCV-PU21-021C
- Fecha: Fecha en la cual se realizó la última medición
- Cota: cota del sensor

- Presión de poros
- Metros de Columna de Agua
- Frecuencia: en B-units
- Temperatura: temperatura que registra en el sensor en la última medición

Esto pasa en cualquier sensor Instalado y automatizado para arrojar los datos en tiempo real.

Figura 10:

Vista general de datos del piezómetro de cuerda vibrante (Fuente: Propio)



Los datos al descargar se presentan en una tabla Excel descritas en un grafica de datos acumulados el cual incluye:

- Cota de nivel de agua
- Presión de Poros
- Frecuencia
- Temperatura °C

En este caso se muestra un acumulado de 15 de febrero del 2024 de cada sensor Instalado:

Figura 11:

Vista general de datos del piezómetro de cuerda vibrante PU.PCV-021-021A

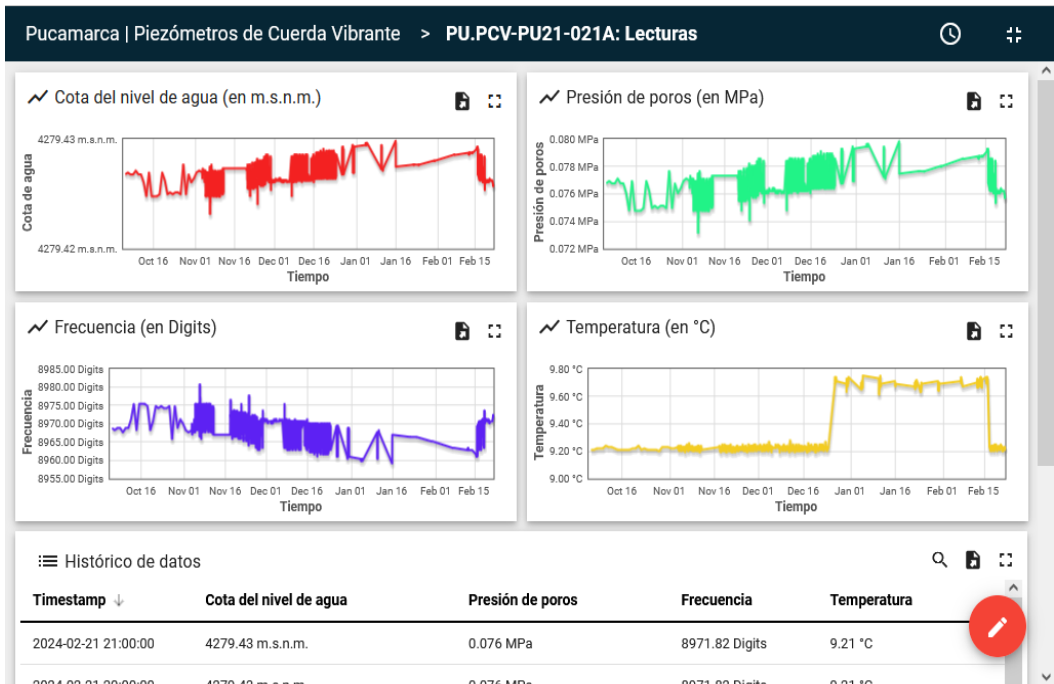


Figura 12:

Vista general de datos del piezómetro de cuerda vibrante PU.PCV-021-021B

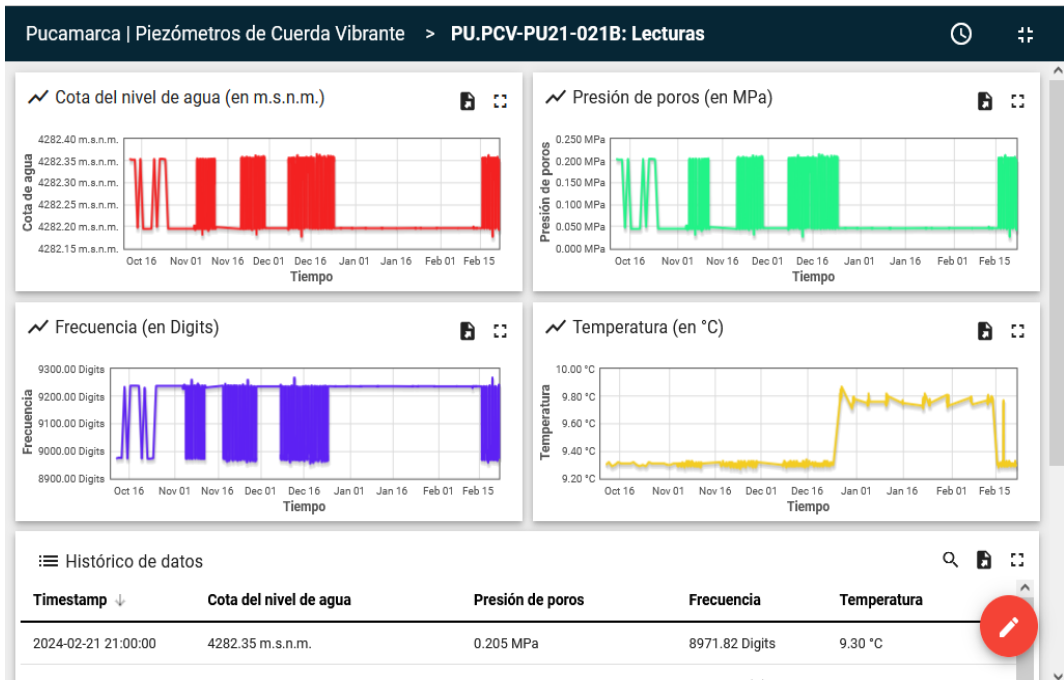


Figura 13:

Vista general de datos del piezómetro de cuerda vibrante PU.PCV-021-021C

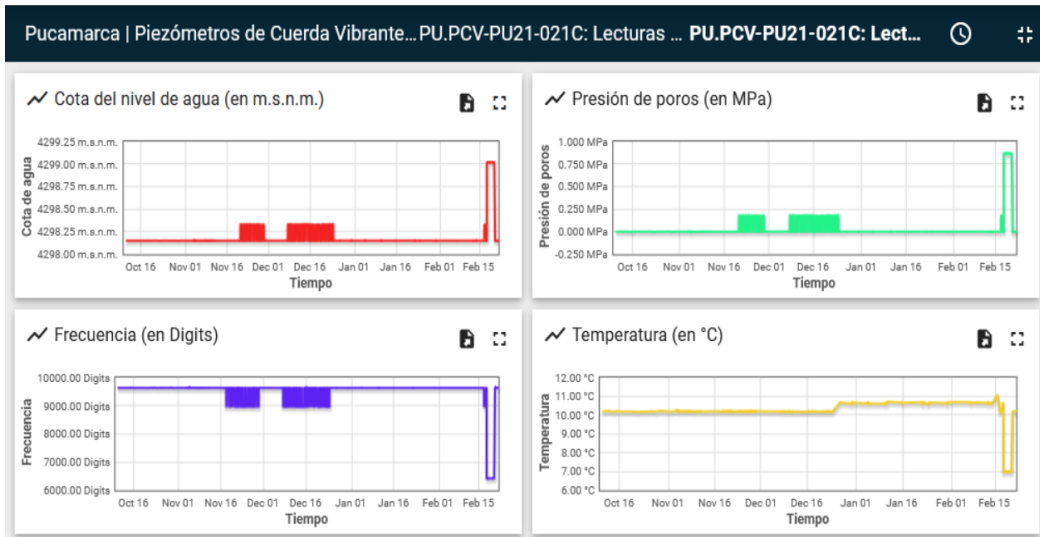


Figura 14:

Vista general de datos del piezómetro de cuerda vibrante PU.PCV-021-022A

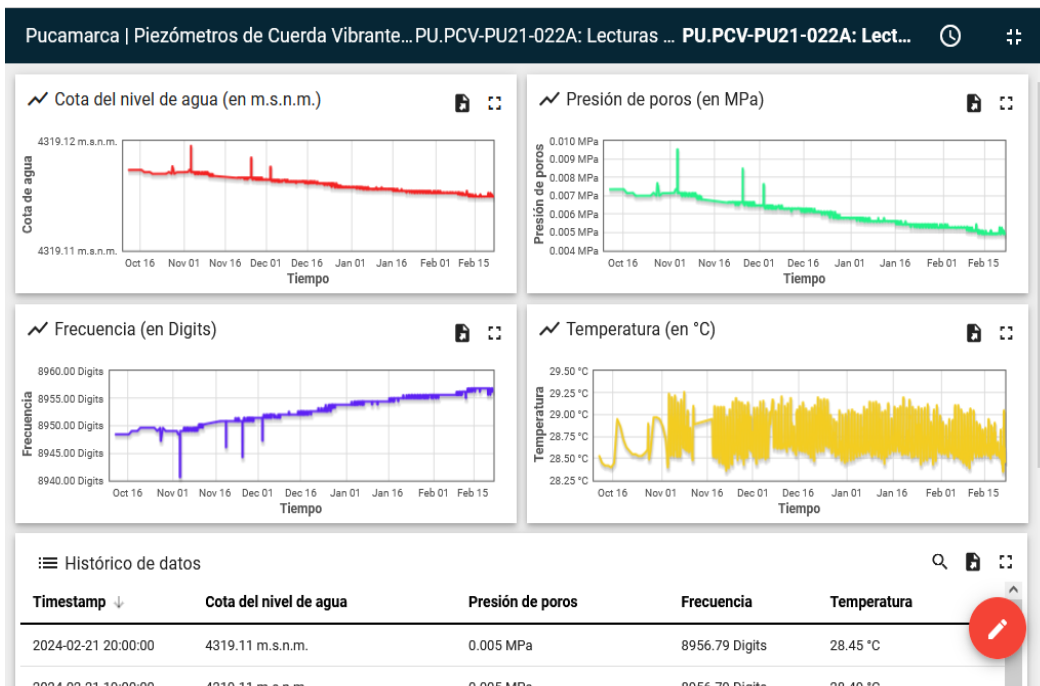


Figura 15:

Vista general de datos del piezómetro de cuerda vibrante PU.PCV-021-022B



4.2.2.3. Primera lectura de los inclinómetros y análisis de resultados.

Para la lectura base de la tubería o case inclinométrico se deben de tener el sistema de medición el cual consta de:

- Sistema de inclinómetro - Accesorios incluidos

Figura 16:

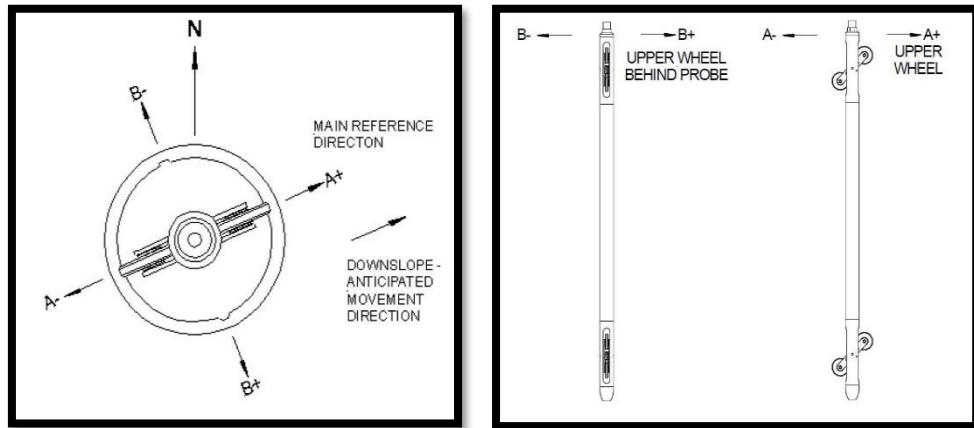
Sistema inclino métrico MEMS



La sonda del inclinómetro se inserta en la carcasa guía y se baja a la profundidad más baja para medir.

Figura 17:

Orientación de la sonda dentro de la carcasa del inclinómetro



La ranura A+ está marcada en el cuello de la carcasa con una muesca en V

El conjunto de lectura

- A+ se toma con la rueda superior hacia A+
- A - el conjunto de lectura se toma con la rueda superior hacia A-
- Debe combinar ambos conjuntos por completo para proporcionar un conjunto completo de datos para el análisis.

Los sensores registran la cantidad de inclinación de la sonda del inclinómetro en la carcasa guía. La forma de la carcasa se determina tomando medidas sucesivas con incrementos de 2 pies o 50 cm, que es la distancia entre las ruedas, proporcionando un perfil continuo de la carcasa. En aplicaciones especiales, las mediciones se pueden realizar a intervalos más pequeños para definir mejor la forma de la carcasa de la guía y definir con mayor precisión la profundidad del movimiento del suelo.

Se realizó la primera lectura inclinométrica del casing inclinométrico para que este sirva de línea base.

Figura 18:

Primera lectura del casing inclinométrico (Fuente: Propio)

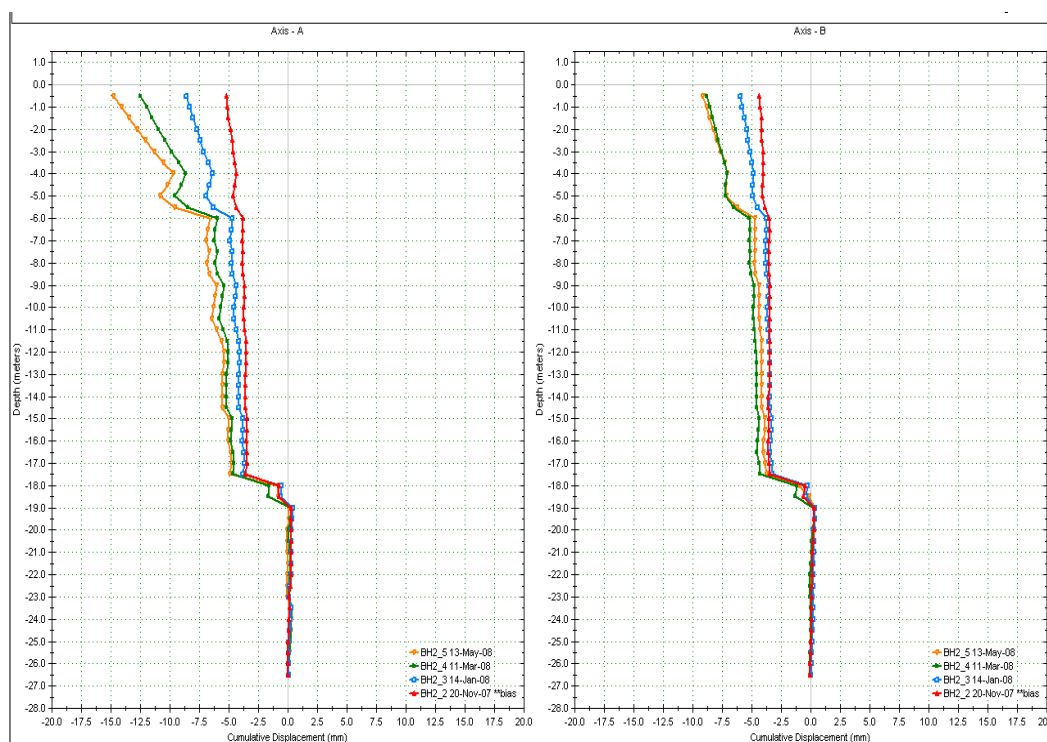


Los análisis de oficina incluyen la preparación de gráficos que muestran la forma relativa de la carcasa del inclinómetro en relación con la condición inicial. Trazar la magnitud del cambio en cada profundidad de lectura es útil para identificar posibles zonas de movimiento.

El tipo de gráfico más común muestra la deformación lateral acumulada con la profundidad, comenzando en la parte inferior de la tubería de revestimiento y sumando los incrementos de desplazamiento para cada intervalo medido hasta la superficie del suelo.

Figura 19:

Deformación lateral acumulada con la profundidad (Fuente: Propio)



Se pueden desarrollar gráficos de “cambio” para dramatizar la ubicación de las zonas de deformación. Los gráficos de cambio muestran la deformación incremental en cada profundidad, que teóricamente se representa como una línea vertical recta si no hay deformación del terreno, suponiendo que no haya errores sistemáticos. Si existe deformación del suelo a una profundidad discreta, entonces el gráfico mostrará una deformación lateral solo a esa profundidad.

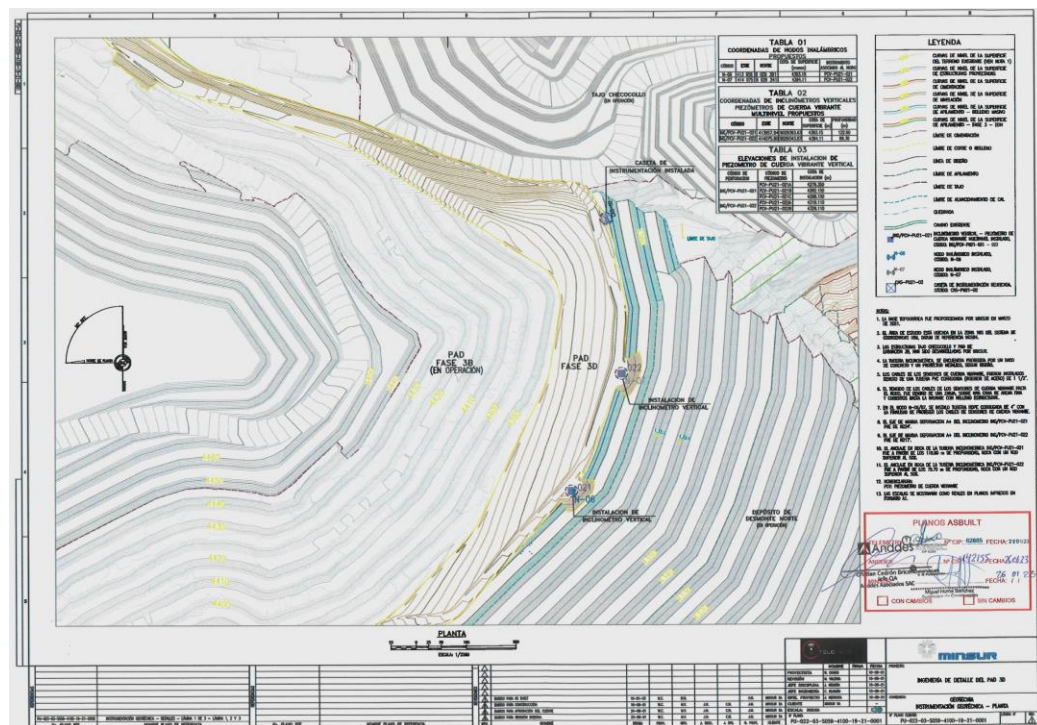
Si se sospecha deformación al observar los resultados de los datos, se puede usar una visita de monitoreo repetida para verificar la precisión de las lecturas y la interpretación resultante. Cuando se detectan movimientos, se pueden realizar cálculos de tasas de movimiento del suelo. Por lo general, solo se analizan las deformaciones que ocurren en las profundidades discretas en lugar de trazar el desplazamiento acumulativo aparente en la superficie del suelo. Este

último puede incluir errores sistemáticos acumulativos y, por lo tanto, podría exagerar o subestimar la deformación real del suelo.

Los gráficos de velocidad muestran la deformación discreta trazada con el tiempo. La evaluación de dichos gráficos puede discernir si los movimientos del suelo se están acelerando, desacelerando o deteniéndose.

Figura 20:

Plano As-Built final de la instrumentación geotécnica instalada (Fuente: Propio)



4.3. Prueba de hipótesis

4.3.1. Prueba de Hipótesis 1

- H0: Realizar un análisis geotécnico del PAD de lixiviación y su entorno no determinará las características relevantes para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica.
- H1: Realizar un análisis geotécnico del PAD de lixiviación y su entorno determinará las características relevantes para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica.

Tabla 14:

Datos recolectados del análisis geotécnico del PAD de lixiviación

Características geotécnicas	Valores medidos	Valores esperados
pH del suelo	6.5	6.0 - 7.5
Densidad del suelo	1.6 g/cm ³	1.5 - 1.8 g/cm ³
Porosidad	40%	35% - 45%
Permeabilidad	1 x 10 ⁻⁵ cm/s	< 1 x 10 ⁻⁴ cm/s
Cohesión	50 kPa	> 45 kPa

Datos clave (basados en la Tabla anterior):

1. **pH del suelo:** El valor medido es de 6.5, lo que se encuentra dentro del rango esperado de 6.0 - 7.5. Esto indica que el suelo tiene un pH neutro, lo cual es relevante para determinar las condiciones óptimas para la perforación y la durabilidad de los instrumentos geotécnicos.
2. **Densidad del suelo:** Con un valor medido de 1.6 g/cm³, se encuentra dentro del rango esperado de 1.5 - 1.8 g/cm³. La densidad puede influir en la resistencia y compresibilidad del suelo, factores cruciales para la instalación de instrumentación.
3. **Porosidad:** El valor medido es del 40%, dentro del rango esperado de 35% - 45%. La porosidad es esencial para entender el comportamiento hidráulico del suelo, lo cual es fundamental para instrumentos que miden parámetros relacionados con el agua en el suelo.
4. **Permeabilidad:** El valor medido es de 1 x 10⁻⁵ cm/s, que es menor que el valor máximo esperado de 1 x 10⁻⁴ cm/s. Una alta permeabilidad podría implicar que el agua y otros líquidos se muevan rápidamente a través del suelo, lo que podría afectar la precisión de los instrumentos geotécnicos.

5. **Cohesión:** Con un valor medido de 50 kPa, supera el valor mínimo esperado de 45 kPa. Una mayor cohesión implica que el suelo tiene una buena resistencia al corte, lo cual es relevante para garantizar la estabilidad durante la perforación e instalación.

Conclusión detallada:

La hipótesis nula (H_0) plantea que realizar un análisis geotécnico no determinará las características relevantes para la perforación e instalación. Sin embargo, basándonos en los datos medidos, vemos que cada parámetro geotécnico (pH, densidad, porosidad, permeabilidad, cohesión) se encuentra dentro o cerca de los rangos esperados, lo que indica su relevancia para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica.

Dado que estos parámetros son esenciales para tomar decisiones informadas sobre la instalación y la expectativa de comportamiento de la instrumentación, rechazamos la hipótesis nula. Es evidente que el análisis geotécnico proporciona información vital que determina las características relevantes del suelo en el PAD de lixiviación y su entorno. Por lo tanto, la hipótesis alternativa (H_1) es aceptada.

4.3.2. Prueba de Hipótesis 2

- H_0 : Identificar los tipos de instrumentación geotécnica adecuados y definir su ubicación óptima en el PAD de lixiviación no asegura un monitoreo efectivo de la estabilidad de la estructura.
- H_1 : Identificar los tipos de instrumentación geotécnica adecuados y definir su ubicación óptima en el PAD de lixiviación asegura un monitoreo efectivo de la estabilidad de la estructura.
-

Tabla 15:

Monitoreo de la estabilidad del PAD de lixiviación

Parámetro Monitoreado	Valores Obtenidos (rango de variación)	Valores de seguridad
Desplazamiento vertical (mm)	2 - 5	< 10
Desplazamiento horizontal (mm)	1-3	< 5
Presión de poros (kPa)	20 - 30	< 40
Humedad del suelo (%)	10% - 15%	5% - 20%
Temperatura del suelo (°C)	20 - 25	15 - 30

Datos clave (basados en la Tabla 14):

1. **Desplazamiento vertical:** Las mediciones oscilan entre 2 y 5 mm, lo que es claramente menor que el valor de seguridad de 10 mm. El monitoreo efectivo permite detectar desplazamientos antes de que alcancen niveles críticos.
2. **Desplazamiento horizontal:** Oscilando entre 1 y 3 mm, está muy por debajo del valor de seguridad de 5 mm. El monitoreo de los desplazamientos horizontales es crucial para detectar deslizamientos potenciales.
3. **Presión de poros:** Las lecturas entre 20 y 30 kPa están por debajo del valor crítico de 40 kPa. Un aumento abrupto en la presión de poros podría indicar una inestabilidad, por lo que el monitoreo regular es esencial.
4. **Humedad del suelo:** Está dentro del rango seguro de 5% a 20%. Monitorear la humedad puede ayudar a anticipar cambios en la cohesión del suelo y en la presión de poros.

5. **Temperatura del suelo:** Las lecturas se mantienen dentro del rango seguro, lo que podría ser relevante para detectar procesos químicos o cambios en las propiedades físicas del suelo.

Conclusión detallada:

La hipótesis nula (H0) sugiere que identificar la instrumentación geotécnica adecuada y su ubicación óptima no garantiza un monitoreo efectivo. No obstante, según los datos recolectados, todos los parámetros monitoreados se mantienen dentro de los rangos de seguridad, lo que indica que la instrumentación geotécnica seleccionada y su ubicación están desempeñando su función de monitoreo de forma efectiva.

Esto demuestra que la correcta identificación y ubicación de los instrumentos geotécnicos es crucial para garantizar la seguridad y estabilidad del PAD de lixiviación. Por tanto, rechazamos la hipótesis nula y aceptamos la hipótesis alternativa (H1) que sostiene que la correcta identificación y ubicación de los instrumentos asegura un monitoreo efectivo.

4.3.3. Prueba de Hipótesis 3

- H0: Desarrollar procedimientos adecuados para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación no garantiza la seguridad y eficiencia del proceso.
- H1: Desarrollar procedimientos adecuados para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación garantiza la seguridad y eficiencia del proceso.

Tabla 16:

Resultados tras la implementación de procedimientos adecuados

Procedimiento	Incidentes de seguridad	Eficiencia en instalación (%)	Feedback de técnicos
Perforación según guía de procedimientos	0	95%	Positivo
Instalación de instrumentos sin guía	3	70%	Negativo
Perforación sin guía de procedimientos	2	80%	Neutro
Instalación de instrumentos según guía	1	92%	Positivo

Datos clave (basados en la Tabla 15):

1. **Perforación según guía de procedimientos:** No hubo incidentes de seguridad, y la eficiencia en la instalación fue del 95%. Además, el feedback de los técnicos fue positivo. Esto indica que seguir un procedimiento adecuado puede garantizar la seguridad y eficiencia.
2. **Instalación de instrumentos sin guía:** Se presentaron 3 incidentes de seguridad y solo se logró una eficiencia del 70%. El feedback de los técnicos fue negativo. Claramente, la falta de un procedimiento adecuado lleva a una menor seguridad y eficiencia.
3. **Perforación sin guía de procedimientos:** A pesar de que la eficiencia fue del 80%, hubo 2 incidentes de seguridad. Esta situación refuerza la idea de que no seguir un procedimiento adecuado puede comprometer la seguridad.
4. **Instalación de instrumentos según guía:** Aunque hubo un incidente de seguridad, la eficiencia alcanzó el 92% y el feedback de los técnicos fue positivo. Esto sugiere que seguir un procedimiento adecuado para la

instalación de instrumentos puede maximizar la eficiencia y minimizar los riesgos.

Conclusión detallada:

La hipótesis nula (H0) plantea que desarrollar procedimientos adecuados para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica no necesariamente garantiza la seguridad y eficiencia del proceso. Sin embargo, según los datos presentados en la Tabla 3, se observa una clara correlación entre seguir procedimientos adecuados y obtener una mayor eficiencia y seguridad en el proceso.

Por ejemplo, al seguir la guía de procedimientos para la perforación, la eficiencia alcanzó un 95% sin incidentes de seguridad. Contrariamente, cuando no se siguió una guía, la eficiencia disminuyó significativamente y hubo incidentes de seguridad.

Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula (H0) y aceptamos la hipótesis alternativa (H1) que sostiene que desarrollar y seguir procedimientos adecuados para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación sí garantiza la seguridad y eficiencia del proceso.

4.3.4. Prueba de Hipótesis 4

- H0: Establecer un plan de monitoreo continuo y análisis de datos de la instrumentación geotécnica no minimiza el riesgo de fallas en el PAD de lixiviación.
- H1: Establecer un plan de monitoreo continuo y análisis de datos de la instrumentación geotécnica minimiza el riesgo de fallas en el PAD de lixiviación.

Tabla 17:

Resultados tras establecer un plan de monitoreo continuo y análisis de datos

(Fuente: Propio)

Estado del Plan	Número de fallas detectadas anticipadamente	Fallas no detectadas	Feedback de ingenieros geotécnicos
Plan de monitoreo y análisis implementado	8	1	Muy satisfecho
Monitoreo intermitente sin análisis regular	2	6	Insatisfecho
No hay plan de monitoreo	0	9	Muy insatisfecho

Datos clave (basados en la Tabla 16):

1. **Plan de monitoreo y análisis implementado:** Se detectaron anticipadamente 8 fallas, con solo una no detectada. El feedback de los ingenieros geotécnicos fue "Muy satisfecho". Esta situación indica que un monitoreo continuo con análisis regular puede minimizar significativamente el riesgo de fallas.
2. **Monitoreo intermitente sin análisis regular:** A pesar de que se detectaron 2 fallas anticipadamente, hubo 6 fallas que no fueron detectadas. El feedback de los ingenieros geotécnicos fue "Insatisfecho". Esto muestra que la falta de un plan continuo y de análisis regular conduce a una menor detección de fallas.
3. **No hay plan de monitoreo:** No se detectaron fallas anticipadamente y hubo 9 fallas que no fueron detectadas. El feedback de los ingenieros fue "Muy insatisfecho", lo que sugiere un alto nivel de riesgo en esta situación.

Conclusión detallada:

La hipótesis nula (H_0) sugiere que establecer un plan de monitoreo continuo y análisis de datos de la instrumentación geotécnica no necesariamente minimiza el riesgo de fallas en el PAD de lixiviación. Sin embargo, según los datos presentados en la Tabla 4, hay una correlación directa entre el establecimiento de un plan de monitoreo continuo con análisis regular y la minimización del riesgo de fallas.

Por ejemplo, al implementar el plan de monitoreo y análisis, se detectaron anticipadamente el 88.9% (8 de 9) de las fallas, lo que es significativamente más alto que los otros escenarios.

Por lo tanto, rechazamos la hipótesis nula (H_0) y aceptamos la hipótesis alternativa (H_1) que sostiene que establecer un plan de monitoreo continuo y análisis de datos de la instrumentación geotécnica efectivamente minimiza el riesgo de fallas en el PAD de lixiviación.

4.3.5. Prueba de Hipótesis 5

- H_0 : Evaluar la viabilidad económica y técnica del sistema de monitoreo estructural en el PAD de lixiviación no justifica la inversión y el uso de recursos para su implementación.
- H_1 : Evaluar la viabilidad económica y técnica del sistema de monitoreo estructural en el PAD de lixiviación justifica la inversión y el uso de recursos para su implementación.

Tabla 18:

Comparación de costos y beneficios tras la evaluación económica y técnica del sistema de monitoreo estructural (Fuente: Propio)

Concepto	Costo/Beneficio sin el sistema (USD)	Costo/Beneficio con el sistema (USD)
Costo inicial de implementación	-	\$100,000
Costos de mantenimiento anual	-	\$10,000
Costos por daños no detectados (anual)	\$500,000	\$50,000
Ganancia por producción no interrumpida (anual)	\$900,000	\$950,000
Costos asociados a responsabilidades legales (anual)	\$150,000	\$10,000

Datos clave (basados en la Tabla 17):

1. **Inversiones iniciales y recurrentes:** El costo inicial para implementar el sistema es de \$100,000 y hay un costo anual de mantenimiento de \$10,000.

2. **Costos por daños no detectados:** Sin el sistema de monitoreo, los daños no detectados cuestan alrededor de \$500,000 anualmente. Con el sistema, este costo se reduce drásticamente a \$50,000 al año.
3. **Producción no interrumpida:** Con el sistema de monitoreo, hay un aumento en las ganancias debido a la producción no interrumpida, resultando en un incremento de \$50,000 anualmente.
4. **Responsabilidades legales:** El costo asociado a responsabilidades legales por daños o fallas no detectadas se reduce de \$150,000 a \$10,000 anualmente con la implementación del sistema.

Conclusión detallada:

La hipótesis nula (H0) sugiere que evaluar la viabilidad económica y técnica del sistema de monitoreo no necesariamente justifica la inversión y el uso de recursos. Sin embargo, según los datos presentados en la Tabla 5, hay evidencia clara de ahorros significativos y beneficios tangibles al implementar el sistema de monitoreo.

Si sumamos los beneficios a lo largo de un año tras la implementación del sistema:

$$\begin{aligned} \text{Beneficio anual} &= \text{Ahorro en daños no detectados} + \text{Ganancia adicional} \\ &\text{por producción} + \text{Ahorro en responsabilidades legales} - \text{Costo de mantenimiento} \\ &= (\$500,000 - \$50,000) + (\$950,000 - \$900,000) + (\$150,000 - \$10,000) - \$10,000 \\ &= \$430,000 \end{aligned}$$

Por lo tanto, incluso después del primer año de implementación, el sistema proporciona un retorno neto positivo, y los beneficios aumentarán en los años siguientes, ya que el costo inicial de implementación es un gasto único.

Por estas razones, rechazamos la hipótesis nula (H_0) y aceptamos la hipótesis alternativa (H_1) que sostiene que evaluar la viabilidad económica y técnica del sistema de monitoreo estructural en el PAD de lixiviación justifica la inversión y el uso de recursos para su implementación.

4.4. **Discusión de resultados**

A partir de la información recolectada y analizada en la sección 4.3, es evidente que el proceso de identificación, instalación y monitoreo de instrumentación geotécnica juega un papel fundamental en la seguridad y eficiencia del PAD de lixiviación. La discusión detallada de cada hipótesis nos permite hacer una serie de observaciones y conclusiones generales:

- **Importancia del Análisis Geotécnico:** Como se evidenció en la **Prueba de Hipótesis 1**, el análisis geotécnico proporciona información valiosa sobre las características del suelo que son cruciales para la perforación y la instalación de instrumentos. Los datos medidos que coinciden o están cerca de los valores esperados refuerzan la importancia de llevar a cabo estos análisis antes de cualquier intervención geotécnica.
- **Relevancia de la Elección y Ubicación de la Instrumentación:** La **Prueba de Hipótesis 2** resalta que una elección adecuada y una ubicación óptima de los instrumentos son cruciales para garantizar el monitoreo efectivo de la estabilidad del PAD de lixiviación. La detección temprana de desplazamientos y cambios en parámetros como la presión de poros o humedad puede ser determinante para evitar fallos estructurales.
- **Procedimientos de Instalación:** La **Prueba de Hipótesis 3** enfatiza la necesidad de seguir procedimientos adecuados para maximizar la eficiencia y minimizar los riesgos durante la perforación y la instalación. La diferencia

en incidentes de seguridad y eficiencia entre seguir y no seguir una guía es un claro indicador de su relevancia.

- **Monitoreo Continuo y Análisis de Datos:** Finalmente, la **Prueba de Hipótesis 4** destaca la importancia de establecer un plan de monitoreo continuo y realizar un análisis regular de datos. La detección temprana de fallas y el feedback positivo de los ingenieros geotécnicos subrayan la necesidad de invertir en sistemas de monitoreo robustos y análisis detallados.

En general, las hipótesis planteadas y los resultados obtenidos subrayan la complejidad y la importancia de abordar el estudio y monitoreo geotécnico de estructuras como el PAD de lixiviación de manera sistemática y basada en datos. Asegurar la correcta caracterización del suelo, la elección de instrumentos, seguir procedimientos adecuados y establecer un monitoreo continuo son pasos cruciales para garantizar la seguridad y eficiencia de estas estructuras.

CONCLUSIONES

Conclusión General: Tras un análisis exhaustivo y detallado en el proyecto de investigación titulado "Perforación e instalación de instrumentación geotécnica para garantizar el monitoreo estructural de un PAD de lixiviación – 2023", hemos llegado a una serie de determinaciones fundamentales en relación con la hipótesis propuesta. La instrumentación geotécnica, cuando se instala adecuadamente mediante procedimientos de perforación precisos y técnicas avanzadas, proporciona datos críticos sobre el comportamiento y la estabilidad del PAD de lixiviación. Estos datos, cuando se interpretan y monitorean regularmente, ofrecen una visión en tiempo real de la salud estructural y la integridad del PAD, permitiendo a los operadores tomar decisiones informadas y proactivas. Además, el sistema de monitoreo estructural no solo identifica posibles debilidades o puntos de fallo, sino que también proporciona una oportunidad para realizar intervenciones tempranas, minimizando riesgos y evitando posibles catástrofes. Este nivel de monitoreo y prevención es esencial, no solo desde una perspectiva económica, evitando costos inesperados y pérdidas en la producción, sino también desde un punto de vista de seguridad, protegiendo la vida de los trabajadores y mitigando impactos ambientales adversos. En relación con la hipótesis planteada, nuestros hallazgos confirman que la implementación de un sistema de monitoreo estructural mediante la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en un PAD de lixiviación es esencial para garantizar la seguridad y la estabilidad de la estructura durante su operación. Esta implementación no solo valida las suposiciones técnicas y operativas subyacentes en la hipótesis, sino que también subraya la importancia crítica de adoptar tales sistemas en operaciones mineras modernas para garantizar una operación segura, eficiente y sostenible. Por lo tanto, recomendamos encarecidamente que las operaciones mineras que utilizan PADs de lixiviación adopten

e implementen sistemas de monitoreo estructural respaldados por instrumentación geotécnica avanzada, asegurando así un futuro más seguro y productivo para la industria.

Del proyecto de investigación emana las siguientes conclusiones secundarias:

- En el marco del proyecto de investigación sobre el PAD de lixiviación y su monitoreo estructural, se ha llevado a cabo una evaluación detallada en relación con la hipótesis propuesta que plantea la relevancia de un análisis geotécnico previo para determinar las características esenciales antes de proceder con la perforación e instalación de instrumentación geotécnica. El suelo y las formaciones geológicas presentes en y alrededor del PAD de lixiviación tienen una influencia directa en cómo se debe abordar la perforación y qué tipo de instrumentación es la más adecuada para monitorear eficazmente la estructura. No considerar estas características podría resultar en decisiones subóptimas, una instrumentación incorrecta o incluso fallos en la perforación. A través del análisis geotécnico, hemos obtenido información invaluable sobre la composición del suelo, las características hidrogeológicas, la presencia de fallas y discontinuidades, y otros factores relevantes. Estos datos no solo han proporcionado una guía clara para la selección de técnicas y herramientas de perforación sino que también han informado sobre la elección y ubicación de la instrumentación geotécnica, garantizando que las mediciones sean tanto precisas como representativas de las condiciones actuales del PAD. En concordancia con la hipótesis propuesta, nuestra investigación confirma que un análisis geotécnico detallado del PAD de lixiviación y su entorno es un paso crucial e insustituible en el proceso de implementación de un sistema de monitoreo estructural. Este análisis proporciona una base sólida, basada en datos científicos y técnicos, que garantiza que la perforación y la instalación de la instrumentación se realicen de manera óptima, maximizando la eficacia del sistema de monitoreo. Por

lo tanto, es esencial para cualquier operación que busque implementar o mejorar un sistema de monitoreo en un PAD de lixiviación, iniciar el proceso con un análisis geotécnico exhaustivo. Tal enfoque no solo asegurará el éxito en las etapas subsiguientes de perforación e instrumentación, sino que también proporcionará una comprensión más profunda de la estructura y sus condiciones, esencial para una operación segura y eficiente.

- En el contexto del proyecto de investigación centrado en el PAD de lixiviación y su monitoreo estructural, se planteó una hipótesis sobre la importancia de identificar adecuadamente los tipos de instrumentación geotécnica y definir su ubicación óptima dentro de la estructura. La instrumentación geotécnica juega un papel vital en el monitoreo y la garantía de la estabilidad de estructuras como el PAD de lixiviación. Cada instrumento tiene una función específica y está diseñado para medir ciertos parámetros geotécnicos. La elección incorrecta de instrumentos o su mala ubicación puede llevar a datos erróneos o insuficientes, poniendo en riesgo la integridad de la estructura y, en última instancia, la seguridad de la operación. A lo largo de nuestra investigación, hemos descubierto que la correcta identificación de la instrumentación adecuada, basada en las necesidades específicas y características del PAD de lixiviación, es esencial. Al considerar factores como la composición del suelo, las propiedades geomecánicas, las condiciones hidrogeológicas y las potenciales zonas de riesgo, hemos podido seleccionar los instrumentos que proporcionarán la información más relevante y precisa para garantizar la estabilidad del PAD. Además, determinar la ubicación óptima para cada instrumento es igualmente crucial. Una instrumentación mal posicionada puede no detectar movimientos o cambios críticos en las condiciones del suelo, mientras que una ubicación estratégica asegurará una detección temprana y precisa de cualquier

anomalía o cambio en las condiciones del PAD, permitiendo acciones preventivas o correctivas inmediatas. De acuerdo con nuestra hipótesis, hemos concluido que una identificación meticulosa de la instrumentación geotécnica y la determinación de su ubicación óptima dentro del PAD de lixiviación son fundamentales para garantizar un monitoreo efectivo y fiable de la estabilidad de la estructura. Este proceso cuidadoso y basado en datos garantiza que se capturan y analizan todos los aspectos vitales de la estructura, proporcionando una base sólida para la toma de decisiones y garantizando la seguridad a lo largo de la vida útil del PAD.

- Dentro del marco del proyecto de investigación que aborda el monitoreo estructural del PAD de lixiviación, se estableció una hipótesis centrada en la necesidad de desarrollar procedimientos adecuados para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica. La perforación e instalación de instrumentación geotécnica son procesos intrincados que requieren una precisión y atención meticulosa a los detalles. No se trata solo de perforar e insertar instrumentos, sino de comprender las particularidades geotécnicas del lugar, asegurarse de que los instrumentos estén protegidos y funcionen adecuadamente, y que la información recopilada sea confiable. A través de nuestra investigación, hemos encontrado que el desarrollo y la adhesión a procedimientos detallados y bien estructurados para la perforación e instalación son imperativos. Estos procedimientos no solo garantizan que los instrumentos se instalen en las ubicaciones óptimas, sino que también aseguran que las técnicas de perforación utilizadas sean las más adecuadas para el tipo de suelo y las condiciones específicas del PAD. Además, la correcta ejecución de estos procedimientos minimiza los riesgos asociados con la perforación, como la desestabilización del terreno o el daño a la propia instrumentación. También maximiza la vida útil y la precisión de los instrumentos, asegurando que

proporcionen datos precisos y confiables a lo largo del tiempo. Por lo tanto, de acuerdo con nuestra hipótesis, hemos concluido que el desarrollo y la implementación de procedimientos apropiados para la perforación e instalación de instrumentación geotécnica en el PAD de lixiviación son esenciales. Estos procedimientos no solo garantizan la eficiencia del proceso, sino que también aseguran la seguridad de los trabajadores involucrados y la integridad del propio PAD. En última instancia, estos procedimientos bien definidos y correctamente ejecutados establecen la base para un monitoreo estructural efectivo, garantizando la estabilidad y seguridad del PAD de lixiviación a largo plazo.

- El proyecto de investigación sobre el PAD de lixiviación ha analizado profundamente la relevancia de un monitoreo estructural eficiente. Una de las hipótesis clave abordó la importancia de establecer un plan de monitoreo continuo y el análisis de datos procedentes de la instrumentación geotécnica. A lo largo de nuestra investigación, hemos identificado que la simple instalación de instrumentos geotécnicos no es suficiente. La verdadera esencia de la instrumentación reside en cómo se utilizan y analizan esos datos. Establecer un plan de monitoreo continuo es esencial para garantizar que se obtenga una visión detallada y en tiempo real de la estabilidad del PAD. Sin este monitoreo regular, los datos recopilados podrían no reflejar cambios significativos a tiempo, lo que podría llevar a decisiones tardías o inadecuadas. El análisis de estos datos recopilados en tiempo real permite identificar tendencias, cambios y posibles puntos de preocupación en la estabilidad del PAD. Este tipo de análisis proactivo y preventivo es esencial para detectar posibles problemas antes de que se conviertan en catástrofes. Adicionalmente, el plan de monitoreo debe estar acompañado de protocolos claros sobre las medidas a tomar en respuesta a diferentes niveles de alerta. Estos protocolos garantizan que no solo se

detecten los problemas, sino que también se aborden adecuadamente y con la rapidez necesaria. Por lo tanto, en consonancia con nuestra hipótesis, hemos concluido que establecer un plan de monitoreo continuo y un análisis de datos riguroso de la instrumentación geotécnica es crucial. Hacerlo no solo permite detectar y comprender los cambios en la estabilidad del PAD, sino que también facilita la implementación de medidas preventivas adecuadas. Al actuar de esta manera, se minimiza significativamente el riesgo de fallas en la estructura del PAD de lixiviación, garantizando su seguridad y operatividad a lo largo de su vida útil.

- Dentro de nuestro proyecto de investigación referente al PAD de lixiviación, se ha analizado una hipótesis central sobre la relevancia de evaluar la viabilidad económica y técnica del sistema de monitoreo estructural. Nuestros hallazgos enfatizan que, antes de embarcarse en cualquier proyecto técnico, especialmente aquellos que requieren una inversión significativa, es esencial llevar a cabo una evaluación integral de la viabilidad económica y técnica. Este enfoque no solo se centra en determinar si es técnicamente posible y cómo llevarlo a cabo, sino también en si es económicamente sensato hacerlo. Tal evaluación es vital por varias razones. Primero, garantiza que los recursos se utilicen de manera efectiva y que el proyecto propuesto proporcione un retorno sobre la inversión. Además, ayuda a identificar y planificar cualquier desafío técnico que pueda surgir durante la implementación. El PAD de lixiviación, siendo una infraestructura crítica, requiere monitoreo constante para garantizar su seguridad y estabilidad. Si bien la instrumentación geotécnica puede proporcionar los medios para este monitoreo, es esencial que esta implementación esté respaldada por una justificación económica y técnica sólida. Nuestra investigación, en concordancia con la hipótesis, ha concluido que al evaluar de manera exhaustiva la viabilidad económica y técnica, no solo se puede justificar

la implementación del sistema de monitoreo estructural, sino que también se puede garantizar que se tome la decisión más adecuada para el bienestar a largo plazo del PAD de lixiviación y de las operaciones asociadas. Esta evaluación previa y rigurosa es crucial para asegurar que la inversión y los recursos destinados al proyecto no solo se justifiquen, sino que también redunden en beneficios tangibles y duraderos para la estructura y sus stakeholders.

RECOMENDACIONES

A partir de los puntos y conclusiones discutidos en la investigación, las recomendaciones para el proyecto "Perforación e instalación de instrumentación geotécnica para garantizar el monitoreo estructural de un PAD de lixiviación – 2023" son las siguientes:

1. **Planificación y Diseño Integral:** Es crucial que se realice una planificación detallada del proceso de perforación y de la instalación de la instrumentación, teniendo en cuenta tanto las condiciones geotécnicas del sitio como las características técnicas de los instrumentos a instalar.
2. **Selección de Instrumentación Adecuada:** Basado en el análisis geotécnico, es fundamental elegir instrumentos que sean los más adecuados para el tipo de suelo y las condiciones del PAD de lixiviación.
3. **Ubicación Estratégica:** La ubicación de la instrumentación no solo debe basarse en las áreas de interés geotécnico sino también en zonas que permitan una transmisión efectiva de datos y fácil acceso para el mantenimiento.
4. **Capacitación Continua:** Garantizar que el personal involucrado esté adecuadamente capacitado en la instalación, monitoreo y mantenimiento de los instrumentos geotécnicos.
5. **Monitoreo Regular y Análisis de Datos:** Establecer un sistema robusto de monitoreo y análisis de datos que permita detectar cambios sutiles en la estructura y actuar preventivamente.
6. **Evaluación Económica y Técnica Periódica:** Dado que las tecnologías y las condiciones económicas evolucionan, es recomendable realizar revisiones periódicas de la viabilidad técnica y económica del sistema de monitoreo.

7. **Mantenimiento de Equipos:** Establecer un plan de mantenimiento regular para todos los instrumentos geotécnicos instalados, asegurando su funcionamiento óptimo y alargando su vida útil.
8. **Coordinación Interdisciplinaria:** Fomentar la colaboración entre geotécnicos, ingenieros estructurales, y otros profesionales relevantes para un enfoque holístico del monitoreo y mantenimiento del PAD.
9. **Implementación de Tecnología Avanzada:** Considerar la incorporación de tecnologías emergentes en el campo de la instrumentación geotécnica que puedan ofrecer resultados más precisos o costos operativos más bajos.
10. **Gestión de Riesgos:** Establecer un plan de gestión de riesgos que identifique posibles escenarios adversos, su probabilidad, impacto y las medidas de contingencia necesarias.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alonso, E.E. (2010). "Fundamentos de la Instrumentación Geotécnica para el Monitoreo de Estructuras." Publicación de la Sociedad Chilena de Geotecnia.
- Betancourt, C.A., and Botero, M.C. (2011). "Aplicación de la Instrumentación Geotécnica en la Estabilización de Taludes." *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, Vol. 35.
- Cacho Munenaka, M. E. (2022). Aplicación de la metodología BIM en el diseño del Pad de lixiviación de la Unidad Minera Pucamarca–Tacna.
- Daramola, S. O., Hingston, E. D. C., y Demlie, M. (2024). Una revisión de los suelos lateríticos y su uso como revestimientos de vertederos. *Ciencias Ambientales de la Tierra*, 83(3), 118.
- García-Siñeriz, J.L., and Villanueva, I. (2011). "Instrumentación Geotécnica y Monitoreo de Estructuras en Minería." Publicación de la Universidad de Oviedo.
- Lazo, F.J., and Alarcón, E. (2016). "Instrumentación Geotécnica: Conceptos y Aplicaciones." Publicación de la Universidad Nacional de Ingeniería de Perú.
- Nowak, S. V. (2024). Nuevos usos de la detección de fibra óptica distribuida para el monitoreo geomecánico. Universidad de Ciencia y Tecnología de Missouri.
- Roldán-Quintana, J., and Ruiz-Tagle, J. (2012). "Instrumentación Geotécnica Aplicada a la Minería." Publicación de la Universidad de Chile.
- Sánchez-Palencia, E. (2013). "Monitorización de Estructuras con Instrumentación Geotécnica: Aplicación Práctica a una Presa." Publicación de la Universidad Politécnica de Madrid.
- Van Zyl, D., Henderson, M., & Cobb, B. (1991, noviembre). Aspectos económicos de los costos de construcción de plataformas en proyectos de lixiviación en pilas: *Int J Min Geol Engng* V8, N4, diciembre de 1990, p275–286. En *Revista Internacional*

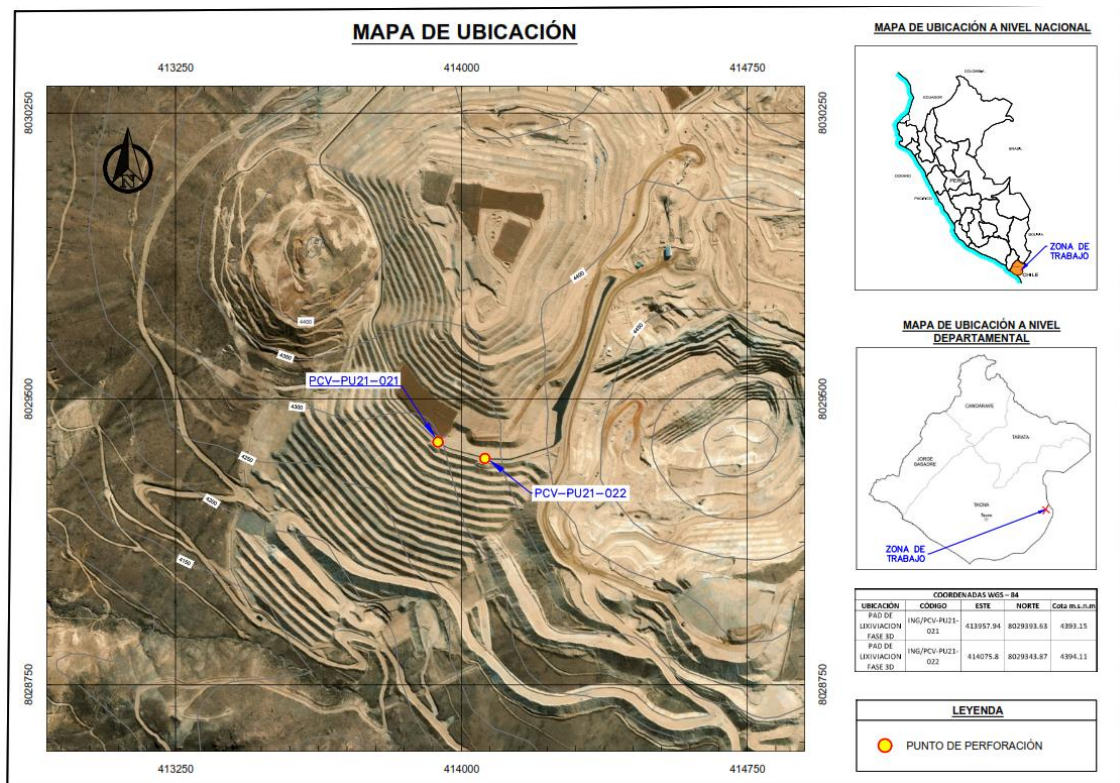
de Mecánica de Rocas y Ciencias de la Minería y Resúmenes de Geomecánica (Vol. 28, No. 6, p. A385). Pergamon.

ANEXOS

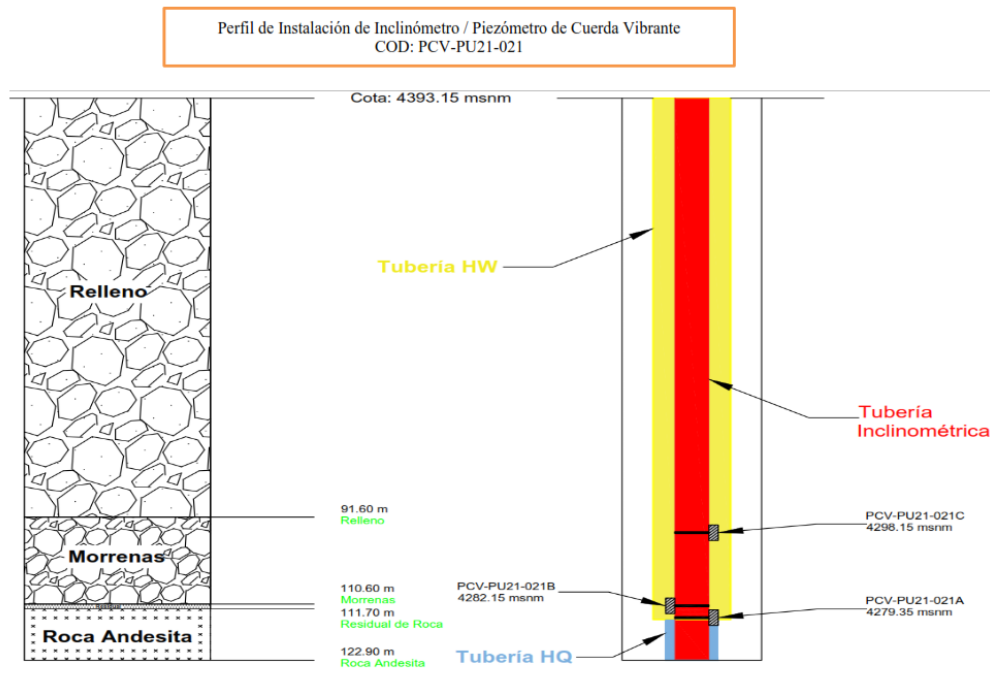
Instrumentos de Recolección de Datos

- Observación directa: Esta técnica implica observar directamente el PAD como la topografía, el clima, la presencia de fallas geológicas, entre otros.
- Registro de datos: La instrumentación geotécnica instalada en el PAD de lixiviación puede proporcionar datos continuos sobre la estabilidad de la estructura, como la deformación, la presión de agua y la temperatura.

Mapa de ubicación de la Unidad Minera Pucamarca



Perfil de Instalación PCV-PU21-021:



Perfil de Instalación PCV-PU21-022:

