



UNIVERSIDAD
DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE MÉTODOS DE
MUESTREO MEDIANTE PERFORACIÓN A
AIRE REVERSO Y DIAMANTINA, PARA EL
MODELAMIENTO GEOLÓGICO EN SCM
ATACAMA KOZAN**

Trabajo de titulación presentado en conformidad a los requisitos para
obtener el título de Geólogo

Profesor guía: Francisco Tapia Guerra

Gino Fabrizio Vincenzo Scola Pulgar

Copiapó, Chile 2024

UNIVERSIDAD DE ATACAMA

FACULTAD DE INGENIERÍA

DEPARTAMENTO DE GEOLOGÍA



Índice

Agradecimientos	5
Resumen	6
Abstract	8
1.1 Introducción	10
1.2 Problema de investigación	11
1.3 Objetivos	11
1.3.1 General	11
1.3.2 Específicos	11
1.4 Hipótesis	12
Capítulo 2: Antecedentes generales	13
2.1 Reseña histórica	13
2.2 Antecedentes históricos de SCM Atacama Kozan	13
2.3 Ubicación y accesos	14
Capítulo 3: Marco geológico	16
3.1 Marco geológico regional	16
3.2 Geología local	16
3.3 Unidades litológicas	17
3.3.1 Formación Punta del Cobre	17
3.3.2 Mineralización	21
Capítulo 4: Marco teórico	22
4.1 Introducción	22
4.2 Muestreo en minería subterránea	22
4.3 Métodos de muestreo	23
4.3.1 Perforación de aire reverso (RC)	25
4.3.2 Perforación diamantina (DDH)	28
4.4 Ventajas y desventajas de RC y DDH	30
4.5 Factores geoestadísticos involucrados en el muestreo mediante perforaciones	32
Capítulo 5: Metodología	34
5.1 Trabajo de pre-terreno	35
5.2 Trabajo de terreno	43
5.3 Trabajo post-terreno	44

5.4 Rangos de Evaluación de eficiencia y eficacia operacional	45
Capítulo 6: Resultados	47
6.1 Resumen de la base de datos histórica de Atacama Kozan del año 2023	47
6.1.1 Equipos de perforación diamantina: cumplimiento de plan de perforación.	47
6.1.2 Equipos de perforación simba: cumplimiento de plan de perforación.	49
6.2 Análisis exploratorio de datos (EDA).....	51
6.2.1 Método de perforación diamantina (DDH).....	51
6.2.1.1 Tiempo de perforación de muestreo	51
6.2.1.2 Costos en perforación de muestreo	52
6.2.1.3 Calidad de la muestra	53
6.2.2 Método con equipos Simba (aire reverso)	53
6.2.2.1 Tiempo de perforación de muestreo	55
6.2.2.2 Costos en perforación de muestreo	56
6.2.2.3 Calidad de la muestra	56
6.3 Eficiencia operacional	57
6.3.1 Evaluaciones de métodos de muestreo utilizados en Atacama Kozan.....	57
6.3.1.1 Evaluación de método de muestreo: Diamantina	57
6.3.1.2 Evaluación de método de muestreo Aire reverso (Mediano plazo)	59
6.3.1.3 Evaluación de método de muestreo Aire reverso (Corto plazo).....	61
6.4 Análisis comparativo de representatividad geológica.....	64
Capítulo 7: Discusiones	72
7.1 Comparación de resultados	72
7.2 Complicaciones en el muestreo con equipos de perforación Simba	75
7.3 Análisis de representatividad geológica.....	77
7.4 Desafíos Potenciales.	77
7.5 Estrategia empleada para la confección de la E_{em}	78
7.6 Análisis de la metodología implementada para la comparación de los métodos de perforación	79
7.7 Proyección de la eficiencia operativa con la implementación exclusiva de sondajes diamantina	80
Capítulo 8: Conclusión	81
Capítulo 9: Recomendaciones para la empresa	82
9.1 Adopción Estratégica de Métodos:.....	82
9.2 Posibles Cambios en el Método de Muestreo:	82

9.3 Implementación Estratégica de Ambos Métodos:	83
Referencias bibliográficas	84
Capítulo 10: Anexo	87
Anexo 1: encuesta parámetros por considerar para la selección adecuada de un método de muestreo.	87

Agradecimientos

Quisiera expresar mi más profundo agradecimiento a quienes han sido parte fundamental en la realización de esta tesis. En primer lugar, quiero agradecer a mis padres, cuyo amor y apoyo incondicional han sido el pilar sobre el cual he construido mis sueños. Su constante aliento y confianza en mis capacidades me han motivado a seguir adelante, incluso en los momentos más desafiantes.

Agradezco sinceramente a todos aquellos que me ayudaron y apoyaron durante el desarrollo de este trabajo. Cada uno de ustedes ha contribuido de manera significativa, ya sea a través de consejos, recursos o simplemente brindando su tiempo para escucharme. Su generosidad no ha pasado desapercibida.

Mi más profundo reconocimiento a mi profesor guía, Francisco Tapia, por su paciencia y dedicación. Su orientación ha sido invaluable, y su capacidad para inspirar y guiarme ha sido esencial en cada etapa de este proceso. Gracias por compartir su conocimiento.

Quiero extender mi agradecimiento a la empresa Atacama Kozan por permitirme realizar mi memoria en sus dependencias. Su disposición y apoyo han facilitado enormemente mi investigación y me han brindado un entorno propicio para el desarrollo del estudio.

Finalmente, a toda mi familia, gracias por su constante preocupación y apoyo. Cada palabra de aliento, cada gesto de cariño y cada muestra de confianza han sido vitales para alcanzar este logro.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Sin su apoyo, este proyecto no habría sido posible.

“La persistencia es el camino del éxito”

- Charles Chaplin.

Resumen

El presente estudio se desarrolla en el yacimiento de tipo IOCG que lleva por nombre SCM Atacama Kozan, este yacimiento se localiza en la comuna de Tierra Amarilla en la III región de Atacama y se especializa en la producción y comercialización de concentrado de cobre siendo la calcopirita la mena de cobre principal en extracción.

En el proceso de mejorar y optimizar el método de muestreo en minería subterránea, la eficiencia juega un papel esencial. A lo largo de la investigación, se identificaron desafíos en el rendimiento del método de muestreo implementado con los equipos de perforación actuales, que corresponde a una combinación entre perforación diamantina para largo plazo y aire reverso para el mediano y corto plazo. La calidad de las muestras es esencial para la toma de decisiones, y la eficacia y eficiencia de los equipos puede impactar significativamente en ello.

La metodología empleada en el presente estudio incluye un análisis y revisión de parámetros asociados directamente con el método de muestreo empleado con los equipos de perforación de SCM Atacama Kozan. Se realizó entonces, con el fin de determinar una manera de evaluar la eficiencia y eficacia en el muestreo, y así lograr una muestra más representativa para un modelamiento geológico, un procedimiento de comparación entre métodos de perforación diamantina y de aire reverso. Con esta finalidad, se presenta una evaluación y calificación de distintos métodos de perforación usados en minería, denominada como la ecuación de evaluación de muestreo (E_{em}). Este procedimiento se basa principalmente en una ecuación que considera cuatro aspectos clave: tiempo de muestreo, costos de muestreo, calidad de la muestra y adherencia al plan de perforación. Posteriormente, se amplía la ecuación para incluir aspectos adicionales de calidad de la muestra relacionados con litología, mineralización y elementos estructurales.

Los pesos de cada influencia se determinaron mediante una encuesta entre profesionales de la industria minera, los que proporcionaron una estructura con valores fijos para evaluar y comparar los métodos de muestreo. Se aplicaron estos valores a la ecuación del E_{em} para evaluar dos métodos de perforación utilizados en Atacama Kozan: perforación tipo

diamantina (DDH) y aire reverso con equipos Simba, tanto en el mediano como en el largo plazo.

Los resultados del E_{em} indicaron que el método de perforación DDH obtuvo una calificación más alta en comparación con los métodos de aire reverso, lo que sugiere que es más efectivo en términos generales y sumados entre sí de tiempo, costos, calidad de la muestra y adherencia al plan de perforación. Por lo tanto, el método DDH se considera el más adecuado para las operaciones de muestreo en Atacama Kozan ya sea para una exploración de largo plazo o un muestreo de mediano plazo.

Abstract

The present study takes place in the IOCG-type deposit known as SCM Atacama Kozan, located in the Tierra Amarilla commune in the III region of Atacama. This deposit specializes in the production and marketing of copper concentrate, with chalcopyrite being the main copper ore extracted.

In the process of improving and optimizing the sampling method in underground mining, efficiency plays an essential role. Throughout the research, challenges were identified in the performance of the sampling method implemented with the current drilling equipment, which is a combination of diamond drilling for long-term and reverse circulation for medium and short-term. The quality of the samples is crucial for decision-making, and the effectiveness and efficiency of the equipment can significantly impact this.

The methodology employed in this study includes an analysis and review of parameters directly associated with the sampling method used with the drilling equipment at SCM Atacama Kozan. This was conducted to determine a way to evaluate efficiency and effectiveness in sampling, aiming to achieve a more representative sample for geological modeling, alongside a comparison procedure between diamond drilling and reverse circulation methods. To this end, an evaluation and grading of different drilling methods used in mining, termed the sampling evaluation equation (Eem), is presented. This procedure is mainly based on an equation that considers four key aspects: sampling time, sampling costs, sample quality, and adherence to the drilling plan. Subsequently, the equation is expanded to include additional quality aspects related to lithology, mineralization, and structural elements.

The weights of each influence were determined through a survey among mining industry professionals, who provided a structure with fixed values to evaluate and compare the sampling methods. These values were applied to the Eem equation to assess two drilling methods used in Atacama Kozan: diamond drilling (DDH) and reverse circulation with Simba equipment, for both medium and long-term periods.

The results of the Eem indicated that the DDH drilling method received a higher rating compared to reverse circulation methods, suggesting that it is generally more effective when considering the combined factors of time, costs, sample quality, and adherence to the drilling plan. Therefore, the DDH method is deemed the most suitable for sampling

operations at Atacama Kozan, whether for long-term exploration or medium-term sampling.

1.1 Introducción

La minería subterránea ha sido durante décadas una fuente fundamental de extracción de minerales, desempeñando un papel crucial en el suministro de materias primas esenciales para la industria global. En este contexto, la eficiencia y la precisión en los métodos de muestreo juegan un papel vital en la optimización de los recursos y la rentabilidad de las operaciones mineras (Lambert, 2006).

El presente proyecto se enfoca en la evaluación y mejora de las prácticas actuales de muestreo mediante la transición del método de perforación de aire reverso al método diamantina. Esta iniciativa se desarrolla en el contexto específico de la compañía SCM Atacama Kozan, una entidad comprometida con la excelencia operativa y la innovación en sus procesos mineros.

La elección del método de perforación en la minería subterránea tiene un impacto directo en la calidad de las muestras extraídas, y, por ende, en la toma de decisiones estratégicas relacionadas con la planificación y el rendimiento operativo. La adopción de la perforación diamantina representa una alternativa prometedora que busca superar las limitaciones asociadas con el método de aire reverso, ofreciendo mejoras sustanciales en la calidad de las muestras, la eficiencia de la perforación y la obtención de información geológica más detallada (Hapugoda, 2010).

A lo largo de este proyecto, se exploraron detalladamente los fundamentos técnicos y operativos de la perforación diamantina, comparándolos con el método de aire reverso actualmente empleado por SCM Atacama Kozan. Se analizarán los beneficios potenciales en términos de precisión en la estimación de reservas minerales, reducción de tiempos de perforación y optimización de costos asociados a la actividad minera.

Esta investigación no solo busca introducir una metodología más avanzada y eficiente, sino también sentar las bases para una toma de decisiones informada y estratégica en la implementación de tecnologías que contribuyan al crecimiento sostenible y competitivo de SCM Atacama Kozan en el sector minero. A lo largo de las secciones posteriores, se abordarán en detalle los objetivos, la metodología, los resultados esperados y las implicaciones prácticas de este proyecto, con la aspiración de aportar significativamente al desarrollo y la mejora continua de las operaciones mineras subterráneas.

1.2 Problema de investigación

La necesidad de cambiar el método de muestreo en las operaciones mineras de SCM Atacama Kozan se fundamenta en diversas razones estratégicas y operativas que respaldan la iniciativa. El método de perforación de aire reverso, aunque ha sido una práctica convencional, presenta limitaciones significativas en la obtención de muestras de alta calidad. La variabilidad en la granulometría y la posible contaminación durante el proceso de extracción comprometen la representatividad de las muestras, afectando directamente la precisión en la estimación de las reservas minerales (Larisch, 2012).

No obstante, las virtudes conocidas y detalladas en la bibliografía, sobre el método de perforación diamantina, se carece de una metodología sistemática para la comparación de ambos métodos, y se desconoce si efectivamente la implementación de la perforación diamantina resultará en ventajas operativas para la compañía.

En cuanto al muestreo mediante el método de perforación de aire reverso supone una pérdida significativa en la información geológica por ende en la calidad de la muestra la cual es de suma importancia para el diseño de los modelos geológicos respectivos lo que se traduce en una posible planificación y producción errónea de los caserones.

1.3 Objetivos

1.3.1 General

Analizar la eficiencia y eficacia de los métodos de muestreo mediante perforación a aire reverso (RC) y diamantina (DDH), para la obtención de información geológica a incorporar en el modelamiento geológico de mediano y corto plazo.

1.3.2 Específicos

- Determinar el costo, precisión y confiabilidad de las muestras obtenidas mediante perforación RC y DDH.
- Elaborar una propuesta metodológica para la comparación de los métodos de muestreo con equipos de perforación RC y DDH, para el modelamiento geológico de mediano y corto plazo.

- Comparar la utilidad de los datos extraídos a partir de ambos métodos en la creación de modelos geológicos.

1.4 Hipótesis

Se plantea que, mediante la utilización de la ecuación de evaluación de muestreo (E_{em}), se determinará cuantitativamente que el método de perforación diamantina es más adecuado para el muestreo geológico en el yacimiento de minería subterránea SCM Atacama Kozan, debido a su mayor capacidad para obtener muestras representativas que registren la estructura y litología del macizo rocoso. Gracias a esto, será posible definir un protocolo de muestreo que incrementará la calidad de las muestras, reduciendo sesgos y mejorando la representatividad geológica y, en consecuencia, la precisión de los modelos geológicos, optimizando así la toma de decisiones en las operaciones mineras.

Capítulo 2: Antecedentes generales

2.1 Reseña histórica

La compañía minera Atacama Kozan, de origen chileno-japonés, fundada en 1998, se especializa en la producción y venta de concentrado de cobre de elevada pureza. Ubicada en la región de Atacama, Chile, la mina se somete a operaciones de minería subterránea para su explotación. El depósito de Atacama Kozan forma parte de una categoría de depósito conocida como Iron Oxided Copper and Gold (IOCG), situado en el interior del Distrito minero Punta del Cobre. Esta región se distingue por albergar diversas compañías mineras que se dedican a la explotación de yacimientos minerales ubicados en los estratos de la Formación Punta del Cobre, específicamente del Turoniense. Cabe destacar que Candelaria es el depósito con la mayor cantidad de reservas en este distrito minero (Pérez, 2019).

Las formaciones geológicas que albergan a Atacama Kozan pueden clasificarse en cuatro unidades primordiales, situadas en el interior del Miembro Algarrobos. Estas unidades comprenden andesitas, metasedimentos, manto y tobas. De estas, la unidad explotable es el manto, caracterizado como un cuerpo sólido de magnetita. Este manto exhibe concentraciones de cobre de hasta el 3,5%, siendo la calcopirita la principal mena de cobre. La presencia de calcopirita se manifiesta en diseminaciones, vetas, stockwork y en forma de manto (Pérez, 2019).

2.2 Antecedentes históricos de SCM Atacama Kozan

Fechas	Descripción
Junio 1992-Mayo 1995	Se realizan exploraciones por Nittetsu Mining Co., Ltd.
Octubre 1995	Se realiza proyecto de pre factibilidad realizado por Fluor Daniel.

14 de Julio de 1998	Se realiza su iniciación sus actividades a través del Servicio de Impuestos Internos. Sin embargo, y en este mismo periodo, cuando se llegó a la etapa de las negociaciones se postergó el financiamiento, ya que una crisis congeló los mercados asiáticos, deteniendo parcialmente los inicios de las obras.
5 de Mayo de 1999	Se constituyen los primeros acuerdos del directorio, conformándose la estructura central y directrices a seguir por S.C.M Atacama Kozan.
Enero 2001	Se inicia la construcción de accesos principales a la Mina y la construcción de la Planta.
Febrero del 2003	Comienza la explotación del yacimiento cuprífero

Extraído de (González, 2020).

2.3 Ubicación y accesos

La sociedad contractual minera Atacama Kozan se localiza en el distrito minero Punta del Cobre, en la comuna de Tierra Amarilla, región de Atacama, Chile. Sus coordenadas son N 6957193 E 374370, y está a una distancia de 16 km al sureste de Copiapó, a una altitud de 650 metros sobre el nivel del mar (Ilustración 1). Para llegar desde Copiapó, se toma el camino C-35 (Av. Copayapu) hacia el sur, recorriendo unos 10 km hasta llegar a la comuna de Tierra Amarilla. Luego, se continúa por la calle Miguel Lémur (C35; línea azul) durante unos 7 km hasta llegar al cruce de la minera Punta del Cobre. Desde allí, se desvía hacia el oeste, cruza el puente Punta del Cobre y avanza por un camino de bischofita (línea de color amarillo) en buen estado, siguiendo un tramo recto de 0,6 km. Finalmente,

se gira hacia el sur y se recorren 1,5 km hasta llegar a las instalaciones de la compañía minera.

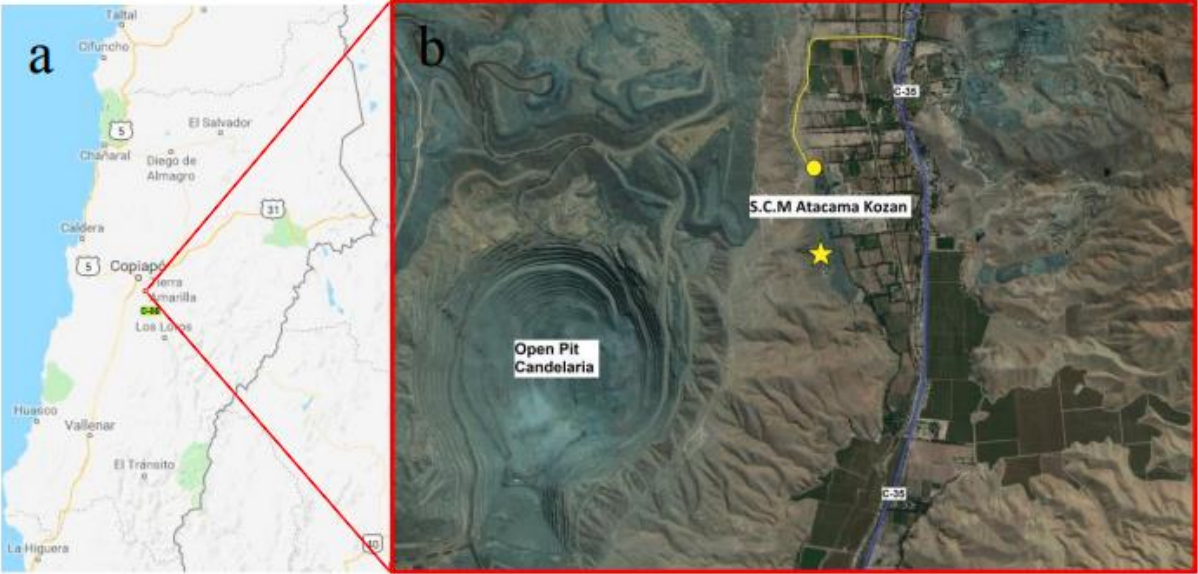


Ilustración 1. Ubicación de SCM. Atacama Kozan. Extraído de (Pérez, 2019).

Capítulo 3: Marco geológico

3.1 Marco geológico regional

El depósito minero Atacama Kozan se cataloga dentro de un grupo de yacimientos del tipo óxido de hierro Cu-Au (Zn-Ag) especiales a lo largo de un cinturón en el margen Este del contacto entre el batolito costero y las rocas instruidas del Cretácico Inferior, al sureste de Copiapó. La mineralización está controlada por ramales de fallas asociadas al Sistema de Falla de Atacama. Estos depósitos se emplazaron en rocas volcánicas y volcanoclásticas derivadas del arco volcánico de Cretácico Inferior.

3.2 Geología local

Las rocas presentes en la mina Atacama Kozan pertenecen a las formaciones Punta del Cobre (Jurásico - Cretácico Inferior) y Abundancia (Valanginiano; 138 – 131 Ma.), además de intrusiones de cuerpos menores (diques), Gravas de Atacama (Mioceno) y Depósitos aluviales recientes (González, 2020). En el área de Atacama Kozan afloran unidades que se dividen en cuatro distintivas localizadas en el Miembro Algarrobo que se compone de andesitas, metasedimentos, manto y tobas. Entre estas litologías, destaca el manto, el cual está caracterizado por ser un cuerpo sólido compuesto mayormente de magnetita, se identifica como la unidad propicia para la explotación, presentando concentraciones de cobre que pueden llegar hasta un 3,5% de ley de cobre (Pérez, 2019).

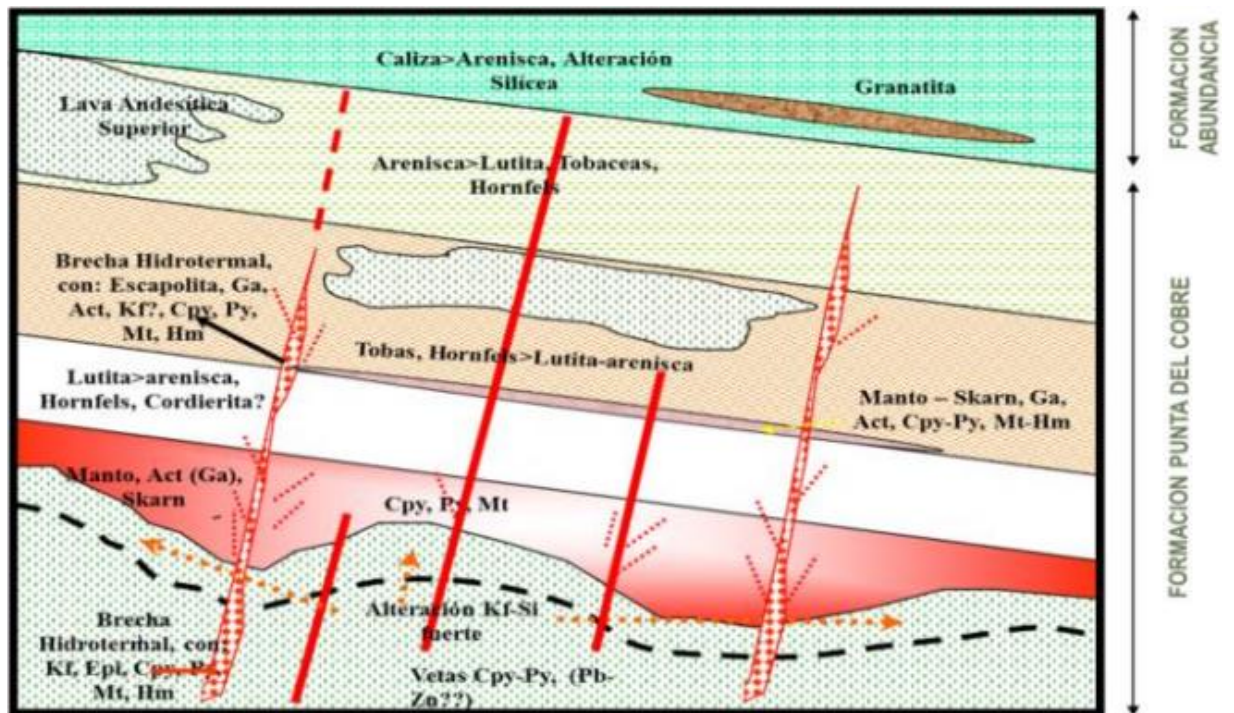


Ilustración 2. Perfil geológico Atacama Kozan. Recuperado de (S.C.M. Atacama Kozan, 2018).

La génesis del depósito está vinculada a la presencia de intrusivos complejos, incluyendo plutones como los monzoníticos, monzodioríticos porfídicos y tonalíticos del Complejo Plutónico Copiapó, la ilustración 2 muestra un perfil geológico donde se encuentra la geología local de la mina Atacama Kozan. La mineralización en la zona ocurrió debido a la actividad de fluidos hidrotermales exsultos de estos complejos, evento que tuvo lugar aproximadamente entre 115 y 112 millones de años atrás (Pérez, 2019).

3.3 Unidades litológicas

3.3.1 Formación Punta del Cobre

La mineralización de cobre en el distrito Punta del Cobre está predominantemente alojada en la Formación volcano-sedimentaria del Cretácico Inferior (~135–132 Ma), que está cubierta por secuencias sedimentarias marinas del Grupo Chañarcillo del Cretácico Inferior (132–130 Ma). En el yacimiento, la mineralización de Cu-Fe y su alteración hidrotermal relacionada se encuentran hospedadas principalmente en rocas

volcánicas/volcanoclásticas de la Formación Punta del Cobre y se extienden a profundidades superiores a los 800 metros. A estas profundidades, los conjuntos de alteración magnetita-actinolita y cálcico-sódica de etapa temprana están sobreimpresos por una mineralización y alteración de calcopirita-magnetita-biotita-feldespato potásico \pm pirita \pm actinolita, datada en aproximadamente 115 Ma, que representa la principal etapa de mineralización de cobre en el área. El cuerpo mineral principal en el yacimiento alcanza hasta 400 metros de espesor en la parte central y se adelgaza hacia los márgenes (Del Real, 2021). Específicamente en Atacama Kozan la mineralización de Cu-Fe se concentra según el autor Gonzales (2020) en el manto, el cual se caracteriza por su color pardo o gris con tonalidades verdosas y puede presentar texturas clásticas y estructuras como foliación, laminación y estratificación. Su mineralización incluye disseminación de calcopirita, pirita y pirrotina, con vetilleos y, en algunos casos, mineralización tipo brecha cuando el vetilleo es más intenso. Las leyes de cobre varían entre 0.8% y 3.0%, y el contenido de magnetita suele estar entre 15% y 50%.

Por otro lado, las rocas de la Formación Punta del Cobre que se hallan en la mina Atacama Kozan corresponden a lavas andesíticas en su parte inferior, la cual según el autor Castaño et al, (2018), exhibe una textura porfirítica, con cristales de plagioclasa dispersos en una matriz fina, y presenta un color que varía entre gris, verde y marrón. La mineralización en la andesita se manifiesta principalmente en brechas con disseminación de calcopirita, pirrotina y pirita, a veces con magnetita. Las leyes de cobre en esta roca oscilan entre 0.3% y 3.0%. En conjunto a la andesita, las lutitas, areniscas y conglomerados en la parte media afectados por metamorfismo y metasomatismo (skarn) y toba con niveles de lutitas y areniscas con metamorfismo y metasomatismo en su parte superior, tal como se evidencia en la ilustración 3. En las cotas superiores de la mina existen rocas de la Formación Abundancia con lutitas, calizas y areniscas en su parte inferior y calizas en su parte superior (González, 2020). En mayor detalle, las lutitas son rocas sedimentarias con partículas finas, de color pardo-gris a pardo-verdoso, y presenta una estructura clástica con laminación o estratificación, y foliación marcada. La mineralización se exterioriza como disseminación de calcopirita y pirita, ocasionalmente con pirrotina, y puede incluir vetilleos o mineralización tipo brecha cuando el vetilleo es más intenso. Gonzales (2020), también menciona que la arenisca, presenta colores que van desde pardo a gris pardo o

pardo verdoso, tiene una textura clástica y estructuras sedimentarias como laminación y estratificación. Puede mostrar foliación o esquistosidad, y su mineralización se presenta como disseminación de calcopirita y pirita, con vetilleos y ocasionalmente mineralización tipo brecha. Por último, el autor (Gonzales, 2020) señala que el conglomerado presente en Atacama Kozan consiste en una roca de color pardo a pardo verdoso con textura clástica y estructuras sedimentarias similares a laminación y estratificación. Puede exhibir foliación o esquistosidad, y sus alteraciones incluyen silicificación y skarn de actinolita y clorita. La mineralización se presenta principalmente como disseminación de calcopirita y pirita, con o sin pirrotina, y puede desarrollar vetilleos y mineralización tipo brecha.

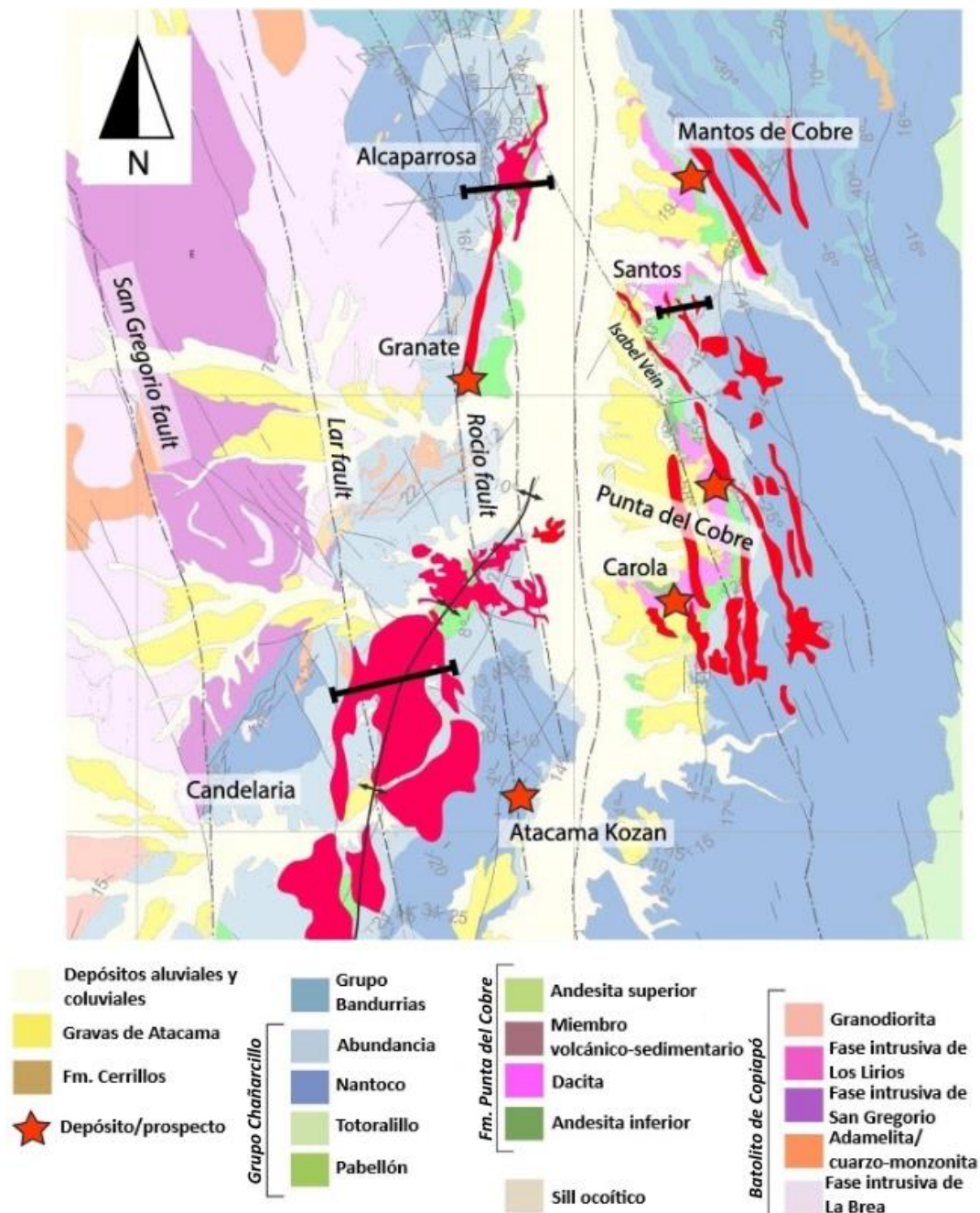


Ilustración 3. Geología regional área Distrito Punta del Cobre. Recuperado de (Del Real, I. 2018).

En la ilustración 3 se puede observar la geología regional del área y Distrito geológico Punta del Cobre, formaciones y unidades litológicas, además de algunas fallas y yacimientos principales del distrito, entre ellos Atacama Kozan.

3.3.2 Mineralización

Las áreas donde se presenta mineralización son influenciadas por estructuras geológicas activas en el momento de la mineralización y por estratos permeables, como es el caso de los metasedimentos (roca sedimentaria sometida a un proceso de metamorfismo). Estas condiciones estructurales y geológicas desempeñan un papel clave en la determinación y distribución de los depósitos minerales en la región. También la evolución de la mineralización se produjo en consonancia con la disminución de la temperatura, dando lugar a la formación de asociaciones minerales que abarcan cuatro fases distintas: la fase de metasomatismo potásico-silíceo, seguida por la precipitación de magnetita y granate, la precipitación de sulfuros y, finalmente, la precipitación de carbonato con la intervención de procesos supérgenos. Estas fases sucesivas indican una compleja historia geológica y geoquímica que ha contribuido a la configuración actual de la mineralización en la zona (Pérez, 2019).

La mineralización en la mina se encuentra principalmente en la Formación Punta el Cobre. Esta incluye un manto de Cu-Fe en las cotas sedimentarias superiores y una brecha de andesita en los niveles inferiores (González, 2020).

Capítulo 4: Marco teórico

4.1 Introducción

La minería subterránea es una tarea que debe ser desarrollada por personas técnicas especializadas, además requiere unas etapas previas de planificación, control y posterior su ejecución. Una de las actividades que garantizan el éxito de la minería es el muestreo para la evaluación de la calidad y cantidad de la muestra extraída (Hapugoda, 2010). A lo largo de esta memoria se abordarán los conceptos de minería subterránea, resaltando su importancia para la toma de decisiones y el modelamiento geológico a corto y mediano plazo.

Asimismo, se realizará una revisión de los métodos de muestreo más comunes en la industria de la minería, tales como aire reverso (RC) y perforación diamantina (DDH), luego de conocer las definiciones se analiza y clasifican las ventajas y desventajas de cada método de muestreo aplicado en SCM Atacama Kozan.

4.2 Muestreo en minería subterránea

La minería subterránea es la extracción de minerales ejecutada en el subsuelo, lo que implica generar túneles y pozos para acceder a los yacimientos de minerales. Para la extracción, las técnicas varían según el terreno y su geología. Además, en minería subterránea, el proceso de muestreo desempeña un papel crucial en la obtención de información precisa sobre la composición y calidad de los minerales extraídos. Para llevar a cabo este proceso, se seleccionan cuidadosamente puntos estratégicos de muestreo en la mina subterránea, abarcando diversas áreas geológicas y zonas de interés. Estos puntos sirven como representantes de la variabilidad geológica presente en el yacimiento (Serra & Gómez, 2003).

La extracción de muestras se realiza mediante herramientas específicas como barrenos o taladros. La meta es obtener muestras que sean verdaderamente representativas del material mineralizado presente en cada punto seleccionado. Posteriormente, las muestras extraídas se preparan para su análisis. Este paso puede implicar la reducción del tamaño

de las muestras mediante procesos de trituración y molienda, asegurando tamaños de partículas adecuados para los análisis subsiguientes (Serra & Gómez, 2003).

Los análisis brindan información inmediata sobre la composición mineral y las características del mineral extraído, facilitando decisiones operativas inmediatas. Sin embargo, las muestras preparadas se transportan al laboratorio para análisis más detallados, donde se realizan pruebas químicas, mineralógicas y físicas para obtener información precisa sobre la concentración de minerales, presencia de impurezas y otras propiedades relevantes (Serra & Gómez, 2003).

El propósito principal de los sondajes es la recuperación de la muestra, razón por la cual los esfuerzos deben dirigirse a mejorar la eficiencia de perforación, de modo de lograr una recuperación superior a 90%. En la práctica esto significa obtener como mínimo, 90 cm de muestra, de 1 m perforado (o su equivalente en peso) (Geotec, 2005).

4.3 Métodos de muestreo

En SCM Atacama Kozan, las técnicas de recolección de muestras utilizadas son el aire reverso y la perforación diamantina. Estos métodos son relevantes, ya que brindan diversas ventajas y desventajas asociadas al costo, la calidad de las muestras y la efectividad del proceso. Dichas ventajas y desventajas dependen de la geología de la zona de recolección, dado que cada yacimiento posee características únicas. Asimismo, la recolección de muestras se realiza con un objetivo previamente definido, por lo que una evaluación completa y precisa debe incluir la combinación de estos dos métodos.

Según Nuñez (2018), el método de aire reverso es principalmente práctico en formaciones de roca dura, que superan los 100 MPa de resistencia a la compresión uniaxial e incluso superan los 200 MPa. Se subraya que el método de aire reverso puede alcanzar tasas de producción hasta diez veces más rápidas que los equipos de perforación. Esta alta eficiencia lo posiciona como una opción atractiva para proyectos de perforación de alta demanda y plazos concretos. Asimismo, se muestra en este estudio que el método de aire reverso genera formación de material particulado, que va a la atmósfera. Esto se puede contrarrestar perforando bajo el agua o usando colectores de polvo (Nuñez, 2018).

Larisch (2012) respecto al método DDH encontró que, en similitud al método de aire reverso, la perforación diamantina es efectiva en formaciones rocosas duras con alta

resistencia a la compresión. Además, logra ser más apropiada para rocas más abrasivas o que contienen cuerpos de mineral, donde la precisión y la conservación del núcleo son críticas. Asimismo, la perforación diamantina es popular por producir muestras de núcleo de alta calidad y precisión. Esto es fundamental en concentraciones donde se requiere un análisis detallado de la composición y estructura de la roca, como en la exploración minera o la evaluación geotécnica, tal como ocurre con Atacama Kozan (Larisch, 2012).

El autor indicó que, a diferencia del método de aire reverso, la perforación diamantina tiende a formar menos polvo y contaminación, ya que el núcleo se conserva dentro de la barra de perforación durante el proceso. Esto logra ser una ventaja en entornos sensibles o donde se requiere un control estricto de la contaminación. Por otro lado, es importante indicar que la velocidad de perforación suele ser más lenta en comparación con el método de aire reverso, especialmente en rocas duras y abrasivas. Esto influye en la eficiencia y el tiempo total requerido para completar un proyecto de perforación subterránea. El método diamantino tiende a tener costos más elevados en términos de equipos y consumibles en paralelo con el método de aire reverso. Sin embargo, los costos son aceptados por la calidad y precisión del núcleo obtenido (Larisch, 2012).

Por otro lado, Hapugoda (2010), expuso que el método de aire reverso ofrece una opción excelente para la exploración mineral, principalmente cuando se requiere una alta precisión en el sitio de las muestras. Sin embargo, no garantiza la calidad de las muestras y resaltó que es importante considerar cuidadosamente los costos y desafíos asociados con este método para avalar su eficacia y viabilidad en un proyecto de exploración minera específica (Hapugoda, 2010).

El mismo autor señaló que, en balance con la perforación de aire reverso, la perforación de diamantina brinda muestras de mayor calidad y precisión geológica, lo que la hace más conveniente para planes que requieren una caracterización detallada del subsuelo y la identificación de recursos minerales. De otra forma, estos beneficios aparecen con mayores costos y tiempos de perforación, lo que se debe razonar en la planificación y ejecución de proyectos de exploración. La elección entre ambos métodos dependerá de las necesidades específicas del proyecto, incluyendo la profundidad de perforación requerida, el presupuesto disponible y la naturaleza del terreno a perforar (Hapugoda, 2010).

Nwanwe (2020), realizó su análisis a través del desarrollo de una herramienta llamada "Matrix Selector" utilizando el modelo de matriz de decisión. Este instrumento se usa para escoger métodos de perforación y tecnologías en función de criterios como la descripción de la formación, el costo y el tiempo de perforación. Entonces, el método de perforación de aire reverso usaba un sistema donde el aire comprimido se inyecta en el pozo a través del interior del tubo de perforación, y los cortes de roca son trasladados hacia el plano a través del espacio anular entre el tubo de perforación y la pared del pozo. El autor demostró que la perforación de aire reverso es más rápida que la perforación con diamantina (Nwanwe & Teodoriu, 2020).

El autor concluyó que el aire reverso es más conveniente para perforar en formaciones de roca dura y puede ser más eficiente en términos de costos y tiempo en comparación con la perforación diamantina en ciertos escenarios. La perforación diamantina es destacada para adquirir muestras de alta calidad en formaciones geológicas donde se demanda una alta precisión en la recuperación de núcleos, como en la exploración de minerales y recursos naturales (Nwanwe & Teodoriu, 2020).

4.3.1 Perforación de aire reverso (RC)

El método de aire reverso se inicia con la producción de aire comprimido en la superficie, lo cual es un elemento esencial para el éxito de la operación. Este aire comprimido es generado mediante equipos especializados y se convierte en el medio propulsor clave para todo el proceso (Lambert, 2006). Tal cual como se puede identificar en la siguiente ilustración.

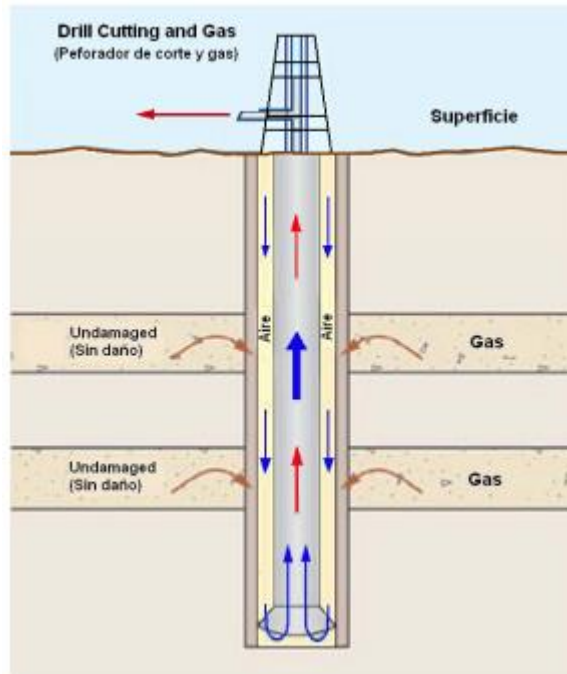


Ilustración 4. Método aire reverso. Recuperado de (Geotec, 2006).

La maquinaria utilizada, en este caso, dirigirá el aire comprimido hacia el fondo del pozo a través de una tubería central tal como muestra la ilustración 4, la cual se encuentra en el interior de la perforación. La tubería central actúa como el conducto principal para la distribución de este aire comprimido desde la superficie hasta la zona de perforación en el subsuelo (Lambert, 2006).

Primero, el aire comprimido juega un papel crucial en la estabilización del pozo al crear una presión positiva que evita el colapso de las paredes del pozo durante la perforación. Además, este flujo de aire inverso contribuye significativamente a la extracción eficiente de las muestras de roca y detritos durante el proceso de perforación, llevándolas hacia la superficie a través del espacio de perforación y las paredes del pozo. (Lambert, 2006).

La muestra recolectada se mantiene libre de contaminación al no entrar en contacto con las paredes del pozo, evitando así la contaminación por estratos previamente perforados. En consecuencia, la muestra proporciona una representación precisa de la profundidad en la que se está llevando a cabo la perforación. El uso del tubo de doble pared facilita la travesía de oquedades y galerías sin pérdida de muestra ni de fluido de perforación. Además, al mantener el aire circundante en reposo alrededor del tubo exterior, se evita la erosión de las paredes del pozo (Lambert, 2006).

El avance de la perforación constituye un componente crítico en el proceso de perforación con el método de aire reverso. Este se resume en un conjunto de tubos conectados y equipados con una herramienta de corte en su extremo inferior, el cual se introduce en el pozo con el objetivo de alcanzar las profundidades deseadas (Espinoza, 2019).

La perforación desciende a través del pozo bajo la dirección y control de la maquinaria, y su movimiento es facilitado por la presión del aire inverso que se genera en la superficie. La herramienta de corte ubicada en el extremo inferior, con un BIT de perforación, desempeña un papel esencial en esta fase. La herramienta de corte, al entrar en contacto con las formaciones rocosas subsuperficiales, inicia la perforación al romper y triturar el material. El BIT de perforación, que generalmente está compuesto por tres conos giratorios equipados con dientes de corte, realiza esta tarea de manera eficaz al aplicar fuerzas mecánicas para fracturar las rocas y crear espacio para la progresión de la perforación (Geotec, 2006). Es importante seleccionar un rock bits adecuado para las necesidades y condiciones de la perforación. A continuación en la ilustración 5, ejemplos de tipos de Rock Bits.

ROCK BITS							
	CROSS BIT	BUTTON BIT	RETRAC BITS	REAMING BITS			
1 3/8"		BCR3235	BBR3235				
1 5/8"		BCR3241	BBR3241				
1 3/4"		BCR3245	BBR3245		BBR3245RT		
1 7/8"		BCR3248	BBR3248		BBR3248RT		
2"		BCR3250	BBR3250		BBR3250RT		
2 1/4"		BCR3257	BBR3257		BBR3257RT		
2 1/2"		BCR3264	BBR3264		BBR3264RT		
3"		BCR3276	BBR3276		BBR3276RT		
3 1/2"		BCR3289	BBR3289				BRR3276
4"		BCR32102	BBR32102				BRR3289
4 1/2"		BCR32115	BBR32115				BRR32102
5"		BCR32127	BBR32127				BRR32115
							BRR32127

Button Types - Round, Conical, Ballistic, Parabolic.
Face Design - Modified Chisel, Crown, Flat Face, Dome, Drop Center.

Ilustración 5. Ejemplo de Rock Bits. Recuperado de (Geotec, 2006).

Es importante destacar que la elección de la herramienta de corte, en este caso el BIT de perforación, se adapta a las condiciones geológicas específicas del lugar de perforación. Factores como la dureza de las rocas, la presencia de capas distintas y la resistencia del

sustrato influyen en la selección de la herramienta adecuada para optimizar la eficiencia del proceso de perforación (Lambert, 2006).

Es importante destacar que el proceso de perforación y extracción se realiza con ayuda de un fluido, sea agua o lodo. Este fluido es adicionado desde la superficie y con ayuda de un sistema de bombeo. El fluido llega al fondo de la tubería y es expulsado arrastrando el material perforado. El material geológico removido es tamizado mediante embudos de malla (Geotec, 2006).

El levantamiento de muestras constituye un momento crucial en el proceso de perforación con el método de aire reverso. A medida que se progresa en la perforación avanza en su descenso a través del pozo, se inicia la recolección de las muestras de roca y detritos presentes en las formaciones geológicas. Durante esta fase, el flujo de aire inverso, generado por la maquinaria, desempeña un papel fundamental. Este flujo de aire se desplaza desde la superficie hasta el fondo del pozo a través del espacio anular. Al ascender por este espacio, el aire arrastra consigo las muestras de roca y detritos que han sido desprendidas y trituradas por la herramienta de corte en la punta de la sarta de perforación (García & Rodríguez, 2023).

Este flujo de aire inverso es esencial para el levantamiento eficiente de las muestras hasta la superficie. La presión positiva generada por el aire inverso contribuye a mantener el espacio anular despejado, asegurando que las muestras sean transportadas de manera continua y sin obstrucciones significativas. La velocidad y el control del flujo de aire son factores críticos que se monitorean cuidadosamente para garantizar la recopilación precisa y representativa de las muestras geológicas.

En la superficie, las muestras son separadas del flujo de aire y recolectadas para su posterior análisis. Es fundamental mantener un control cuidadoso sobre la secuencia y el intervalo de las muestras para asegurar una representación fiel de las formaciones geológicas atravesadas. Durante todo el proceso, se monitorea y controla la presión y la velocidad del aire para garantizar una eficiente extracción de las muestras y prevenir la contaminación de las mismas con materiales del pozo (Geotec, 2006).

4.3.2 Perforación diamantina (DDH)

El método de muestreo a diamantina, también conocido como Diamond Drill Hole (DDH), es una técnica de perforación utilizada para obtener muestras de núcleo de roca en

exploración geológica y minera. La perforación a diamantina implica la utilización de un taladro rotativo que está equipado con un conjunto de brocas de diamante en su extremo inferior. Estas brocas, con incrustaciones de diamantes industriales, son altamente resistentes y capaces de cortar a través de diversas formaciones geológicas (Geotec, 2005). La broca de diamante se baja al pozo mediante la rotación y avance del taladro. La broca corta continuamente el material rocoso, creando un núcleo cilíndrico que es elevado a la superficie a medida que avanza la perforación. A medida que la broca de diamante perfora, genera un núcleo continuo de roca que se extrae a la superficie mediante una tubería de extracción ubicada en el interior del taladro. Este cilindro o núcleo de roca, denominado comúnmente testigo, que posteriormente se libera y extrae del macizo rocoso (Sánchez, 2016).

El núcleo de roca obtenido se registra detalladamente a medida que emerge. Se realizan observaciones visuales para identificar características geológicas, estructuras de la roca, cambios en la mineralización y cualquier otro detalle relevante. Además, se lleva a cabo una medición precisa de la profundidad desde la cual se extrajo cada segmento del núcleo. Para esta operación se utilizan los llamados tubos sacatestigos, que en el transcurrir del tiempo se han ido modificando en el diseño para permitir obtener recuperaciones lo más próximas posible al 100% en diferentes tipos de terreno (Sánchez, 2016).

Para preservar la integridad del núcleo, este se extrae y se coloca en contenedores sellados, etiquetados y catalogados según la profundidad y la ubicación. Este cuidado garantiza que las muestras no se contaminen y que se mantenga la relación espacial precisa con las formaciones geológicas originales. Una vez en el laboratorio, el núcleo de roca se somete a análisis detallados, que pueden incluir pruebas físicas, químicas y mineralógicas. Estos análisis proporcionan información valiosa sobre la composición de la roca, la presencia de minerales, y otros aspectos geológicos y geoquímicos relevantes (Geotec, 2005).

4.4 Ventajas y desventajas de RC y DDH

La siguiente tabla presenta un análisis comparativo de las ventajas y desventajas de los métodos de perforación por aire reverso y diamantina. En ella se abordan aspectos como los costos de perforación, el tiempo requerido para completar el proceso y la versatilidad de cada método. Este análisis proporciona una visión de los beneficios y limitaciones de cada técnica.

Tabla 1. Ventajas y Desventajas de RC y DDH datos recuperados de (Geotec, 2005).

Tipo de perforación	Ventajas	Desventajas
Aire reverso	Económico en comparación, los costos se calculan por metro perforado. Penetración rápida del subsuelo Perfora en condiciones geológicas diversas (suelos duros y blandos) Perforación en ángulos de 90 y 45 grados	Requiere capacidad de empuje y rotación Se usa solo para superficies En minas subterráneas posee baja calidad de las muestras Método rápido, pero poco preciso. Contaminación ambiental por material particulado La perforación con aire reverso requiere de un equipo mucho más grande, además de un compresor de aire de alta capacidad
Diamantina	Menor rotación y empuje Calidad en las muestras Se utiliza en superficie y en interior de la mina. Equipo útil a grandes profundidades	Equipo pequeño Baja potencia / equipo más lento El avance de este tipo de perforación es menor en relación con el tiempo

	<p>Perfora en condiciones geológicas diversas (suelos duros y blandos)</p> <p>Los equipos de perforación diamantina no utilizan el agua para minimizar la contaminación de polvo que es riesgoso en una mina subterránea. Si no más bien puede ser utilizada como lubricante entre la corona y la roca.</p>	<p>empleado, teniendo así una menor tasa de penetración.</p> <p>Trabaja a altas revoluciones, 800 a 1600 revoluciones por minuto.</p> <p>Costos mayores de avance por metro perforado en comparación a la de tipo aire reverso.</p>
--	---	---

Es importante resaltar que usualmente los yacimientos se pueden encontrar a pocos metros sobre el nivel del mar hasta condiciones extremas como 5500 metros sobre el nivel del mar. Estas condiciones afectan de manera significativa el funcionamiento de los equipos, pues a mayor altura menos cantidad de aire y la capacidad de operación de los equipos se disminuye, se conoce que cada mil metros de altura la eficiencia mecánica disminuye al 10%, por lo que en condiciones extremas de 5 mil metros de altura la eficiencia de los equipos es del 50%.

La recuperación de una muestra de una perforación aire reverso en comparación a la recuperación en diamantina, esta última aparentemente presenta una mucho mayor recuperación que las muestras de *cutting*, las cuales son obtenidas por el método de aire reverso. El motivo de esto es desconocido, pero en relación de metros perforados a cantidad de muestras se está perdiendo bastante información en una perforación aire reverso. Lo que también se traduce como una pérdida de la inversión en muestreo geológico esto porque si se paga la perforación de 100 metros, la recuperación de aire reverso puede estar alrededor del 50% quizá menos y en el caso de una diamantina si se pagan 100 metros a perforar se recupera por lo general cerca del 90% o mayor (Geotec, 2005).

4.5 Factores geoestadísticos involucrados en el muestreo mediante perforaciones

La geoestadística es un enfoque matemático y estadístico clave en la modelación en geología. Se basa en la probabilidad estadística para caracterizar datos geológicos, considerando la autocorrelación y heterogeneidad de los procesos geológicos. Además, la geoestadística a menudo incorpora técnicas de simulación estocástica para evaluar la incertidumbre y analizar la sensibilidad en la toma de decisiones, siendo esencial en la minería subterránea (Rojo, 2016).

Los principales factores geoestadísticos involucrados en la recolección de muestras para minería subterránea son:

- Variabilidad espacial: variación de los valores de una variable geológica a lo largo del espacio. Este componente interviene en la comercialización y dispersión de los datos de muestreo, lo que afecta la representatividad de las muestras y la interpretación de los resultados (Chica, 1987).
- Estructura de correlación espacial: La estructura de correlación espacial representa cómo la variabilidad de una variable está relacionada en el espacio. Este elemento geoestadístico es esencial para deducir cómo la información de un punto de muestreo se relaciona con los puntos circundantes y cómo esta correlación puede precisar las estimaciones en ubicaciones no muestreadas (Chica, 1987).
- Anisotropía: es la variación en la dirección espacial. En el entorno del muestreo, la anisotropía puede manifestarse en diferentes direcciones y escalas, lo que involucra consideraciones puntuales al modelar la distribución de los datos y ceñir los modelos geoestadísticos (Chica, 1987).
- Distribución de los datos: La distribución de los datos geológicos tiene un enorme impacto en la precisión de las estimaciones. Algunas variables siguen distribuciones no normales, lo que requiere técnicas estadísticas apropiadas para su análisis y modelado (Chica, 1987).

- Tamaño y disposición de la muestra: El tamaño y la disposición de la muestra son factores determinantes que influyen en la representatividad de los datos y la precisión de las estimaciones. Una muestra escasa o mal distribuida puede conducir a sesgos y errores en las inferencias geoestadísticas (Chica, 1987).
- Tasa de variación espacial: hace referencia a la rapidez con la que los valores de una variable mutan en el espacio. Este factor puede influir en la elección de modelos geoestadísticos y en la selección de parámetros de interpolación, especialmente en áreas con alta variabilidad espacial (Chica, 1987).

Capítulo 5: Metodología

La metodología empleada para la investigación se desglosa en diversas fases interrelacionadas que buscan abordar de manera integral la propuesta de transición del método de muestreo en las operaciones mineras de SCM Atacama Kozan. Estas fases se dividen en tres (ilustración 6):



Ilustración 6. Fases de metodología de trabajo.

5.1 Trabajo de pre-terreno

En una primera etapa, se llevó a cabo una preparación y diseño de la investigación abordando los siguientes puntos.

1. Recopilación bibliográfica de datos históricos de perforación (abarca los métodos de muestreo en minería subterránea y trabajos similares o relacionados a la perforación de muestreo en minería).
2. Diseño de la metodología para la comparación de métodos de perforación.
3. Recopilación de datos históricos de muestreo y perforación de la faena en estudio relacionados al programa de perforación del año 2023.
4. Organización de la información y fundar los criterios específicos para evaluar eficacia, eficiencia y variables clave en la aplicación de la prueba piloto.
5. Diseño de encuesta con enfoque en parámetros específicos tales como, tiempo y costos de perforación además de calidad de la muestra la cual se aborda tanto en mineralogía como en geología estructural.
6. Aplicación de encuesta a profesionales directamente relacionados al área de geología o implicados en el proceso de muestreo. Se entrevistó a un total de 10 profesionales, entre ellos 8 geólogos y 2 ingenieros en minas vinculados a las empresas Atacama Kozan y a Mantoverde. A partir de las entrevistas realizadas se han promediado los porcentajes obtenidos de las respuestas de los profesionales permitiendo asignar valores numéricos específicos a cada parámetro (tiempo, costo, adherencia al plan de perforación y calidad de la muestra en representatividad mineral-litológica y estructural), los cuales pasaron a considerarse como pesos detallados a continuación en la tabla 2.

Tabla 2. Parámetros y valores de pesos en la ecuación (E_{em}).

Parámetro	Peso en ecuación
Tiempo de muestreo (W_t)	2,65
Costos de muestreo (W_c)	2,25
Calidad de la muestra respecto a litología y mineralización (W_{qlm})	1,37

Calidad de la muestra respecto a elementos estructurales (W_{qes})	1,68
Adherencia al plan de perforación (W_a)	2,05

Los pesos W_t , W_c , W_{qlm} , W_{qes} y W_a indican la importancia relativa de cada aspecto en la evaluación general del método de muestreo. Estos pesos fueron asignados de acuerdo con la relevancia que se le otorga a cada parámetro en el contexto específico de la operación minera.

7. A partir de los pesos calculados y presentados en la tabla 2 se elaboró la ecuación de evaluación de muestreo (E_{em}) la cual consiste en una ecuación para la evaluación y calificación de los distintos tipos de métodos de perforación para muestreo en minería.

$$E_{em} = 2.65 \times S_t + 2.25 \times S_c + 1.37 \times S_{qlm} + 1.68 \times S_{qes} + 2.05 \times S_a$$

Donde:

S_t : representa la puntuación asignada al tiempo de muestreo.

S_c : representa la puntuación asignada a los costos de muestreo.

S_{qlm} : representa la puntuación asignada a la calidad de la muestra respecto a litología y mineralización.

S_{qes} : representa la puntuación asignada a la calidad de la muestra respecto a elementos estructurales.

S_a : representa la puntuación asignada a la adherencia al plan de perforación.

E_{em} proporciona una medida cuantitativa de la eficacia del método de muestreo en minería, integrando y ponderando los resultados de la evaluación en cada uno de los cuatro aspectos considerados. Un E_{em} más alto indica una mejor evaluación del método de muestreo, teniendo en cuenta los criterios específicos de tiempo, costos, calidad de la muestra y adherencia al plan de

perforación. Cada uno de los pesos S_i (donde i representa cada uno de los parámetros) de estos parámetros puede recibir puntuaciones en un rango de 1 a 9, por lo que, una vez realizada la evaluación los métodos sometidos a ella obtuvieron una calificación específica en un rango que va desde 10, como la calificación más baja hasta 90, como la más alta.

8. Debido a que cada peso S_i pudo recibir puntuaciones en un rango de 1 a 9, fue imperativa la creación de tablas basadas en intervalos que van de acuerdo a cada parámetro utilizado, considerando valores mínimos y máximos para el diseño de un puntaje a cada intervalo que pueda ser aplicado a la ecuación E_{em} . Para este fin, dichas tablas se detallan a continuación en las tablas 3, 4, 5 y 6, representando una escala cuantitativa.

a) Tiempo de muestreo: Los valores de los intervalos para este parámetro son una relación de metros perforados por hora, obteniendo así el porcentaje correspondiente que se utilizó para obtener un puntaje aplicable a la ecuación de evaluación de muestreo.

Tabla 3. Escalas cuantitativa y cualitativa para tiempo de muestreo.

Tiempo de muestreo			
Escala cuantitativa			Escala cualitativa
Intervalo	Unidad	Puntaje	
0,15 - 3,33	metros/hora	1	Ineficiente
3,33 - 6,66	metros/hora	2	
6,66 - 9,99	metros/hora	3	
9,99 - 13,32	metros/hora	4	Aceptable
13,32 - 16,65	metros/hora	5	
16,65 - 19,98	metros/hora	6	
19,98 - 23,31	metros/hora	7	Eficiente
23,31 - 26,64	metros/hora	8	
26,64 - 30,00	metros/hora	9	

Para establecer rangos de tiempos de muestreo que abarcaran categorías eficientes, aceptables e ineficientes, se consideraron los máximos y mínimos de metros perforados durante los turnos del año 2023, siendo 56,35 y 0,9 respectivamente. Luego se dividieron estos valores en las horas efectivas

promedio de perforación (6 horas), para posteriormente obtener un valor promedio de metros/hora máximo y mínimo. De esta manera el equipo Multipower 1 obtuvo en promedio un máximo de 8,97 [m/h] y un mínimo de 0,2 [m/h]. De la misma forma en que se hizo con el método diamantina, para el método de muestreo con aire reverso se utilizaron los máximos y mínimos metros perforados en el turno correspondiente del año en cual se presentan dichos valores (ver más adelante tabla 13), dividiendo estos valores en las horas efectivas promedio de perforación (6 horas), para posteriormente obtener un valor promedio de metros/hora máximo y mínimo. De esta manera en el mediano plazo se obtuvo en promedio un máximo de 25,33 [m/h] y un mínimo de 0,9 [m/h]. Por otro lado, para el caso del corto plazo, este tipo de muestreo entrega valores aproximados de 29,45 [m/h] de máximo y 1,0 [m/h] de mínimo. Cabe destacar que tanto el corto como mediano plazo se realizan con el método de muestreo de aire reverso.

b) Costos de muestreo: Los valores de los intervalos para este parámetro son una relación del valor expresado en USD por metro perforado, obteniendo así el porcentaje correspondiente que se utilizó para obtener un puntaje aplicable a la ecuación de evaluación de muestreo.

Tabla 4. Escalas cuantitativa y cualitativa para costos de muestreo.

Costos de muestreo			
Escala cuantitativa			Escala cualitativa
Intervalo	Unidad	Puntaje	
0 - 20	US/metro	9	Económico
20 - 40	US/metro	8	
40 - 60	US/metro	7	
60 - 80	US/metro	6	Moderado
80 - 100	US/metro	5	
100 - 120	US/metro	4	
120 - 140	US/metro	3	Elevado
140 - 160	US/metro	2	
160 - 180	US/metro	1	

c) **Adherencia al plan de perforación:** los intervalos corresponden a una relación de metros perforados dividido en metros planificados multiplicado por 100, obteniendo así el porcentaje correspondiente que se utilizó para obtener un puntaje aplicable a la ecuación de evaluación de muestreo.

Tabla 5. Escalas cuantitativa y cualitativa para adherencia al plan de perforación.

Adherencia al plan de perforación			
Escala cuantitativa			Escala cualitativa
Intervalo	Unidad	Puntaje	
0 - 11	%	1	Incumplimiento significativo
11 - 22	%	2	
22 - 33	%	3	
33 - 44	%	4	Cumplimiento aceptable
44 - 55	%	5	
55 - 66	%	6	
66 - 77	%	7	Cumplimiento óptimo
77 - 88	%	8	
88 - 100	%	9	

d) **Calidad de la muestra:** Los intervalos para este parámetro consisten en un porcentaje de representatividad de la muestra sobre la roca o sector muestreado por lo cual, una representatividad del 100% corresponde a el puntaje máximo (9) siendo una muestra considerada confiable.

Tabla 6. Escalas cuantitativa y cualitativa para calidad de la muestra.

Calidad de la muestra			
Escala cuantitativa			Escala cualitativa
Intervalo	Unidad	Puntaje	
0 - 11	%	1	No confiable
11 - 22	%	2	
22 - 33	%	3	
33 - 44	%	4	Aceptable
44 - 55	%	5	
55 - 66	%	6	
66 - 77	%	7	Confiable
77 - 88	%	8	
88 - 100	%	9	

Cada S_i sigue representando la puntuación asignada a su parámetro específico, y cada uno de estos valores como ya se mencionó, puede variar en un rango de 1 a 9, reflejando su desempeño en la evaluación. Este enfoque proporcionó una estructura específica con valores fijos para los pesos, brindando una forma concreta de evaluar y comparar los distintos métodos de muestreo en el caso de estudio.

En las tablas 3, 4, 5 y 6, los puntajes presentan un equivalente para una escala cualitativa. A continuación, se presenta la definición para cada rango de estas escalas.

- Adherencia al plan de perforación para un cumplimiento óptimo: Una adherencia al plan de perforación para un cumplimiento óptimo implica una ejecución precisa y consistente de todas las fases del plan. Se siguen estrictamente las especificaciones del plan de perforación, incluyendo la secuencia de actividades, los tiempos de perforación, y la asignación de recursos. Las metas y objetivos establecidos se cumplen de manera eficiente y dentro de los plazos previstos. Existe una coordinación efectiva entre los equipos, y se implementan medidas proactivas para abordar cualquier desviación potencial antes de que afecte el cronograma general. El monitoreo continuo y la comunicación efectiva aseguran un rendimiento óptimo y la consecución de los resultados deseados.
- Adherencia al plan de perforación aceptable: Una adherencia al plan de perforación aceptable se refiere a la ejecución del plan con cierta variabilidad que no compromete significativamente el logro de los objetivos. Aunque puede haber algunas desviaciones menores en términos de tiempos o recursos, se toman medidas para corregirlas y minimizar su impacto. El cumplimiento de las metas y plazos establecidos aún es alcanzable, y se realizan ajustes oportunos para mantener la eficiencia general del proceso. La comunicación efectiva sigue siendo clave, y se documentan las desviaciones y las acciones correctivas implementadas.
- Adherencia al plan de perforación con incumplimiento significativo: Una adherencia al plan de perforación con incumplimiento significativo implica que el plan no se ejecuta según lo planeado y que las desviaciones afectan

sustancialmente el progreso y los resultados esperados. Pueden surgir demoras significativas, superación de costos y problemas operativos. La falta de coordinación, comunicación deficiente y problemas imprevistos contribuyen al incumplimiento. Se requieren medidas correctivas inmediatas para abordar las desviaciones y restablecer la alineación con los objetivos. Este nivel de incumplimiento puede tener impactos significativos en la eficiencia general del proyecto y podría requerir ajustes importantes en el plan para recuperar el tiempo y los recursos perdidos.

- Tiempo de perforación de muestreo eficiente: Un tiempo de perforación de muestreo eficiente se caracteriza por la ejecución oportuna y precisa de las operaciones de perforación. Los procedimientos se llevan a cabo de manera rápida y efectiva, minimizando los tiempos muertos y asegurando una recolección de muestras sin demoras innecesarias. Existe una planificación y coordinación efectiva que permiten el cumplimiento de los plazos establecidos, sin comprometer la calidad de las muestras. La eficiencia en la ejecución se traduce en un uso óptimo del tiempo y recursos.

- Tiempo de perforación de muestreo aceptable: Un tiempo de perforación de muestreo aceptable implica una ejecución que sigue en gran medida los plazos y cronogramas previstos. Aunque puede haber algunas variaciones y pequeñas demoras, estas se manejan de manera efectiva para minimizar su impacto en el tiempo total de perforación. La coordinación entre los equipos y la gestión de recursos permiten cumplir con los objetivos de muestreo sin comprometer significativamente la eficiencia general del proceso.

- Tiempo de perforación de muestreo ineficiente: Un tiempo de perforación de muestreo ineficiente se refiere a una ejecución que experimenta demoras significativas o sistemáticas en comparación con los plazos establecidos. Pueden existir problemas en la planificación, coordinación deficiente entre equipos, o la presencia de obstáculos no gestionados de manera efectiva. Esta ineficiencia puede traducirse en un uso inadecuado del tiempo y recursos, afectando negativamente la capacidad de cumplir con los objetivos de muestreo en los plazos previstos. Se

requiere una revisión exhaustiva de los procesos para identificar y abordar las causas subyacentes de la ineficiencia.

- Costo de perforación de muestreo económico: Un costo de perforación de muestreo razonable se caracteriza por una asignación eficiente de recursos financieros para llevar a cabo el proceso de perforación de manera efectiva. Los gastos están alineados con los estándares de la industria y reflejan una gestión cuidadosa de los costos operativos. Se busca la eficiencia sin comprometer la calidad de las muestras o la integridad del proceso. Los costos son justificados por la calidad y la representatividad de las muestras obtenidas, y no hay excesos innecesarios en el presupuesto.
- Costo de perforación de muestreo moderado: Un costo de perforación de muestreo moderado indica que los recursos financieros asignados están en línea con las expectativas y requisitos de la operación. Existe un equilibrio entre la eficiencia en la recolección de muestras y la gestión prudente de los gastos. Los costos se mantienen dentro de los límites predefinidos, y se busca la relación óptima entre calidad y eficiencia. Puede haber margen para mejoras en la optimización de costos, pero en general, la inversión está en consonancia con los resultados esperados y la calidad de las muestras obtenidas.
- Costo de perforación de muestreo elevado: Un costo de perforación de muestreo elevado implica una asignación de recursos financieros a la perforación a costo por metro superior a lo cotizado por la empresa correspondiente a un máximo de 110 USD por metro aproximadamente. Esto puede deberse a prácticas ineficientes, selección de tecnologías o proveedores costosos, o una falta de control en la gestión de costos. A pesar de la inversión adicional, la relación costo-beneficio puede ser desfavorable, ya que los beneficios obtenidos no justifican el gasto adicional. En este caso, se requiere una revisión exhaustiva de los procesos y decisiones de gasto para optimizar la eficiencia y reducir los costos innecesarios.
- Muestreo confiable: Un muestreo confiable se caracteriza por la aplicación de un proceso sistemático y preciso que garantiza la representatividad de las muestras tomadas. En este caso, las muestras se recolectan de manera consistente, siguiendo procedimientos bien definidos y estandarizados. La confiabilidad implica la

minimización de posibles sesgos, la precisión en la selección de puntos de muestreo y la atención cuidadosa a las condiciones ambientales que podrían afectar la calidad de las muestras. La documentación adecuada respalda cada etapa del proceso, y se implementan medidas de control de calidad para garantizar la integridad de las muestras.

- Muestreo aceptable: Un muestreo aceptable se refiere a un proceso que cumple con los estándares y criterios previamente establecidos, aunque puede haber cierta variabilidad en la ejecución. Las muestras aún son representativas, pero puede haber áreas para mejoras en términos de consistencia o eficiencia. A pesar de pequeñas variaciones, se siguen protocolos y procedimientos generales de muestreo, y se toman medidas para abordar cualquier desviación ocasional. La calidad de las muestras es satisfactoria, pero podría haber oportunidades para optimizar el proceso.
- Muestreo no confiable: Un muestreo no confiable implica la falta de consistencia, precisión y seguimiento de procedimientos establecidos. Puede deberse a la ausencia de un plan de muestreo claro, la selección arbitraria de ubicaciones o la falta de atención a los detalles críticos. Las muestras recopiladas pueden no ser representativas de la población objetivo, y la falta de control de calidad puede dar lugar a sesgos o errores. Este tipo de muestreo puede generar resultados poco confiables y afectar la validez de cualquier análisis posterior. Es crucial identificar y abordar las causas subyacentes de la falta de confiabilidad para mejorar el proceso de muestreo.

5.2 Trabajo de terreno

Comprendió acciones y/o actividades que fueron planificadas para recopilar datos e información y ejecutar evaluaciones del caso de estudio.

1. Se realizó el logueo de testigos de perforación con un máximo de 250 metros por sondaje para un total de 10 sondajes, posteriormente se hizo una recolección de muestras de *cutting* (material triturado), seguido del logueo de las mismas que corresponden a muestras provenientes de las perforaciones de aire reverso las cuales presentan un avance por pozo de perforación de un

máximo de 36 metros por tiro, siendo analizados un total de 20 tiros y también se desarrollaron visitas a posturas en las zonas de interés para la recolección de datos sobre el funcionamiento de los equipos de perforación, específicamente en el sector llamado Farellones.

2. Implementación de pruebas piloto de la evaluación de muestreo, esto con el fin de poder corregir detalles y/o eliminar aspectos innecesarios para dar paso de manera correcta a la siguiente etapa.
3. Realización de evaluación técnica a cada método implicado en el estudio (aire reverso y diamantina), donde el análisis contempló aspectos tales como capacidades, velocidades de perforación, tiempo efectivo de perforación principalmente entre otros como, recuperación, control de calidad de muestra y complicaciones en la operación. Los primeros tres mencionados fueron registrados y comprobados basándose en las planillas originales tanto de la empresa contratista encargada de las perforaciones DV Drilling como también la empresa Atacama Kozan encargada de operar las perforaciones de aire reverso, en dichas planillas se encuentra información entregada por cada turno de perforación y registran información como el procedimiento a cada hora del turno y metros de avance del mismo.

5.3 Trabajo post-terreno

Implicó el procesamiento, análisis e interpretación de datos recolectados, seguido por la elaboración, revisión y presentación de resultados. Este proceso permitió identificar patrones, tendencias y relaciones significativas en los datos para generar conclusiones. Para este fin, se emplearon gráficos de barras con el objetivo de visualizar los datos de manera clara y entregar recomendaciones útiles para el proyecto o investigación en curso o futuras.

1. Presentación de resultados tanto de visitas a postura como también de proyección de datos, y evaluaciones realizadas a cada método de muestreo (aire reverso y diamantina), estas se presentan en los resultados habiendo sido

sometidos ambos métodos a evaluación mediante la ecuación E_{em} , presentada más anteriormente.

2. Con el fin de comparar los métodos de muestreo se realizaron ilustraciones para un análisis de representatividad geológica. En dichas ilustraciones se presentaron datos de muestras obtenidas tales como ley mineral, alteraciones, litología y mineralización, para su posterior comparación.
3. Análisis de resultados: Esto contempló el resumen de la base de datos recuperados de Atacama Kozan, seguido del análisis exploratorio de datos, las evaluaciones aplicadas tanto a perforación diamantina como aire reverso y un análisis comparativo de representatividad geológica basado en la confección de ilustraciones mencionadas anteriormente compuestas de una síntesis de información de perforaciones de mediano y largo plazo.

5.4 Rangos de Evaluación de eficiencia y eficacia operacional

Los rangos presentados a continuación en la tabla 7 fueron creados con el fin de dar un estimado de calidad del método de muestreo en respuesta a los resultados que se obtuvieron una vez evaluados dichos métodos.

Tabla 7. Tabla de rangos de evaluación de eficiencia y eficacia operacional.

Escala cromática	Rango de evaluación	Definición
	Excelente (79-90 puntos)	Métodos altamente eficientes y eficaces. Demuestran un rendimiento excepcional en todos los aspectos evaluados, destacando en tiempo, costos, calidad de la muestra y adherencia al plan de perforación.
	Muy Bueno (69-79 puntos)	Métodos eficientes y eficaces en la mayoría de los aspectos evaluados. Muestran un buen desempeño, pero podrían tener áreas de mejora en algunos aspectos específicos.

	Bueno (59-69 puntos)	Métodos que cumplen satisfactoriamente con los requisitos fundamentales. Aunque tienen áreas fuertes, puede haber aspectos que necesiten mejoras para alcanzar un rendimiento óptimo.
	Aceptable (49-59 puntos)	Métodos que cumplen con los requisitos mínimos, pero muestran oportunidades significativas de mejora en varios aspectos.
	Necesita mejoras (39-49 puntos)	Métodos que presentan deficiencias sustanciales y necesitan mejoras considerables en varios aspectos para ser considerados eficientes y eficaces.
	No Satisfactorio (10-39 puntos)	Métodos que muestran un rendimiento insatisfactorio en la mayoría de los aspectos evaluados. Requieren una revisión exhaustiva y mejoras sustanciales para ser considerados eficientes y eficaces.

Capítulo 6: Resultados

6.1 Resumen de la base de datos histórica de Atacama Kozan del año 2023

Para los datos reunidos de la base de datos de Atacama Kozan se realizó un resumen correspondiente el cual permitió presentarlos de manera clara y concisa. Esto con el fin de evaluar y comparar los métodos de muestreo.

6.1.1 Equipos de perforación diamantina: cumplimiento de plan de perforación.

Se consideró únicamente el equipo Multipower 1 de un total de dos por ser el único que ha perforado durante todo el año por lo que proyecta de mejor manera los metros y cumplimiento que puede alcanzar una perforadora de tipo diamantina. En la tabla 8 se detalla tanto el sector, programa de perforación, metros perforados realmente y el cumplimiento del programa para cada sector en específico. Por otro lado, para un total de 11027 metros de programa de perforación del año 2023, se perforaron 11724,45 metros en total cumpliendo el programa en un 106% considerando el equipo de DDH Multipower 1 (tabla 9), donde el exceso de metros perforados es por motivo de alguna solicitud especial de alargar alguno de los pozos realizados por parte del geólogo de exploraciones.

Tabla 8. Detalle año 2023 de equipo (MultiPower 1), sector, programa de perforación, real perforado y cumplimiento.

Equipo	Sector	Programa	Real	Cumplido %
Multipower 1	ExFar2-1-4	280	290	104%
Multipower 1	ExFar2-1-5	280	290,1	104%
Multipower 1	ExFar2-1-6	110	270	245%
Multipower 1	ExFar2-1-7	110	300	273%
Multipower 1	AcPrKN1A-1	80	90	113%
Multipower 1	AcPrKN1A-2	120	115	96%
Multipower 1	AcPrKN1A-5	120	127,1	106%
Multipower 1	AcPrKN1A-3	100	95,15	95%
Multipower 1	AcPrKN1A-4	110	105	95%
Multipower 1	AcPrKN1A-6	100	95	95%
Multipower 1	AcPrKN1A-7	120	115	96%
Multipower 1	AcPrKN1A-8	190	190	100%
Multipower 1	PrSLS7Inf2-1	175	161,1	92%
Multipower 1	PrSLS7Inf2-2	115	202,9	176%
Multipower 1	PrSLS7Inf2-4	155	115	74%
Multipower 1	PrSLS7Inf2-5	125	172,9	138%
Multipower 1	PrSLS7Inf2-3	175	175	100%
Multipower 1	PrSLS7Inf2-7	120	105	88%
Multipower 1	PrSLS7Inf2-6	120	143,2	119%
Multipower 1	PrSLS7Inf2-10	110	107,4	98%
Multipower 1	PrSLS7Inf2-09	145	151	104%
Multipower 1	PrSLS7Inf2-08	160	167,3	105%
Multipower 1	PrBrS2-1	235	235	100%
Multipower 1	PrBrS2-2	230	230	100%
Multipower 1	PrBrS2-3	210	261,7	125%
Multipower 1	PrBrS2-4	225	310	138%
Multipower 1	PrSLSW1-12	190	190	100%
Multipower 1	PrSLSW1-13	195	218,3	112%
Multipower 1	PrSLSW2-1	190	205	108%
Multipower 1	PrSLSW2-2	190	190	100%
Multipower 1	PrSLSW2-3	190	190	100%
Multipower 1	PrSLSW2-6	215	225	105%
Multipower 1	PrSLSW2-4	195	195	100%
Multipower 1	PrSLSW2-5	200	230	115%
Multipower 1	PrSLSW2-7	205	230	112%
Multipower 1	PrSLSW2-15	220	218,15	99%
Multipower 1	PrSLSW2-08	190	203,45	107%
Multipower 1	PrSLSW2-09	195	209,35	107%

Multipower 1	PrSLSW2-16	220	220	100%
Multipower 1	PrSLSW2-10	200	215,15	108%
Multipower 1	PrSLSW2-11	195	195	100%
Multipower 1	PrSLSW2-12	205	223,7	109%
Multipower 1	PrSLSW2-13	195	236,35	121%
Multipower 1	PrSLSW2-14	200	197	99%
Multipower 1	FARPRE-1-1	580	580	100%
Multipower 1	PRSLSW2-AI-1	256	256	100%
Multipower 1	PRSLSW2-AI-2	272	272	100%
Multipower 1	PRSLSW2-AI-3	288	302,3	105%
Multipower 1	PRSLSW2-17	220	125	57%
Multipower 1	ACPRBN8-6	107	107	100%
Multipower 1	ACPRBN8-4	121	121	100%
Multipower 1	ACPRBN8-3	141	141	100%
Multipower 1	ACPRBN8-2	143	143	100%
Multipower 1	ACPRBN8-1	138	138	100%
Multipower 1	FARPRE-3	635	635	100%
Multipower 1	FARPRE-2	595	524,35	88%
	Total	11027	11724,45	106%

Tabla 9. Suma total de metros de programa de perforación y real perforado.

Multipower 1	
Programa [m]	11027
Real [m]	11724,45
Cumplido %	106%

6.1.2 Equipos de perforación simba: cumplimiento de plan de perforación.

Sobre el cumplimiento del programa de perforación de los equipos Simba se divide en dos partes que corresponde al mediano y corto plazo, respectivamente durante el año 2023 a las perforaciones de muestreo de mediano plazo el rendimiento óptimo es lograr un programa de perforación de 16.725 metros, de los cuales fueron perforados realmente 12.287 metros, cumpliendo el programa anual total en un 73% (Tabla 10). Por el otro lado está el corto plazo el cual contó con un programa de perforación anual total de 24.250 metros, de los cuales lograron perforar 13.765,71, cumpliendo en un 57% el programa de perforación de muestreo (Tabla 11).

Tabla 10. Detalle año 2023 de equipos de mediano plazo, sector, programa de perforación, real perforado y cumplimiento.

Resumen 2023 De Mediano Plazo				
Equipo	Sector	Programa [m]	Real [m]	Cumplido %
306	EN-03 MP	500	392	78%
304	OS3-5 MP	500	75	15%
306	OS3-5 MP	500	109	22%
306	H3A-MP	1000	914	91%
302	EN1-MP	500	464	93%
302	E1-MP	500	465	93%
304	K10N-MP	1400	808	58%
302	F1-INF-MP	650	250	38%
302	F4-INF-MP DR-SUP	1025	412	40%
302	F4-INF-MP	700	481	69%
302	F3-INF-MP	700	608	87%
302	F2-INF-MP	700	599	86%
302	F5-MP (INT/SUP)	1300	1037	80%
302	F6-DR-INT-MP	550	529	96%
302	OS3-2-MP	600	381	64%
302	M2-MP-(FP)	700	533	76%
302	HARU 1-MP	700	1220	174%
302	HARU 2-MP	700	437	62%
302	K10S-MP	1100	497	45%
302	M1-MP	700	526	75%
302	M3-MP	700	1131	162%
302	FAR2-ESTE-MP	1000	419	42%
	Total	16725	12287	73%

Tabla 11. Detalle año 2023 de equipos de corto plazo, sector, programa de perforación, real perforado y cumplimiento.

Resumen 2023 De Corto Plazo				
Equipo	Sector	Programa [m]	Real [m]	Cumplido %
302	K6-B BCO	1700	1059	62%
306	K7-B BCO	2950	2290	78%
306	F4 SUP BCO	14100	6275	45%
306	F4 UND AUX	4000	2277,71	57%
306	F3 INF UND	1500	1864	124%
	Total	24250	13765,71	57%

6.2 Análisis exploratorio de datos (EDA)

6.2.1 Método de perforación diamantina (DDH)

La diferencia y comparación de metros programa versus metros reales perforados se encuentran en la ilustración 7 donde se separa la cantidad perforada por cada equipo utilizado en el año 2023, en cuanto a metros programados durante dicho año fueron 11.027 metros, por otro lado, los metros realmente perforados llegan a una suma de 11.724,45 metros, superando así los equipos de perforación diamantina, la programación anual.

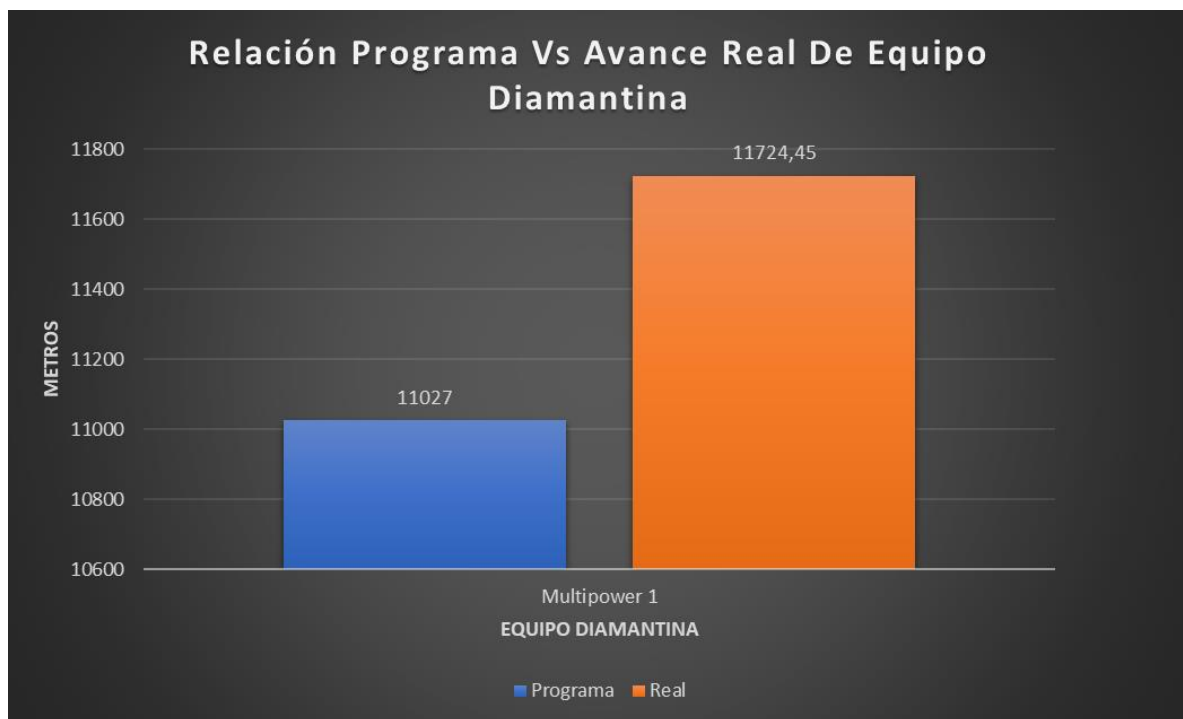


Ilustración 7. Comparativa de metros perforados respecto a programa versus real (DDH).

6.2.1.1 Tiempo de perforación de muestreo

De acuerdo con los reportes realizados por cada turno se estima un tiempo de perforación promedio aproximado de 6 horas efectivas en un turno normal de 8 horas. Para obtener valores de metros de avance por hora de perforación se utilizaron los valores promedio de metros de avance por turno, dividiendo estos valores por 6 horas respectivamente y

obteniendo así por último los metros/hora que fueron utilizados para una posterior evaluación del método.

En particular para el caso del equipo Multipower 1, presenta distintos valores de avance de metros por turno, perforando en promedio un total de 21,66 metros por turno (Tabla 12), esto dividido por 6 horas obtuvo aproximadamente un avance de 3,61 metros por hora.

Tabla 12. Detalle de metros promedio perforados por turno y máximos/mínimos de equipo Multipower 1.

Equipo Diamantina	Multipower 1
Promedio de metros perforados por turno [m]	21,66
máximo - mínimo [m]	56,35 - 0,9

Los promedios de metros/hora obtenidos a partir de los avances de perforación por turno se utilizaron más tarde para evaluar el método en sí y permitir una comparación con respecto al otro método de muestreo empleado donde se utilizaron equipos Simba. En ese sentido para haber realizado una posterior comparación con los tiempos de perforación de los equipos Simba se utilizó la totalidad de datos de turnos del año 2023.

6.2.1.2 Costos en perforación de muestreo

En cuanto a los costos de perforación de muestreo se expresaron en US dólar por metro, variando los valores de acuerdo con la profundidad deseada del pozo, como también en condiciones de *stand by* donde el valor está expresado en US dólar por hora. A continuación, en la tabla 13 se presentan los valores de DDH disponibles los cuales más adelante fueron usados para una comparación y evaluación con respecto al otro método de muestreo.

Tabla 13. Valores de perforación tipo diamantina.

DDH		
Stanby	74,48	US/hora
0-100	83,52	US/metro
100-200	86,72	US/metro
200-300	90,97	US/metro
300-400	96,29	US/metro
400-500	104,8	US/metro
500-600	111,19	US/metro
Promedio	95,58	US/metro

6.2.1.3 Calidad de la muestra

En una perforación de tipo diamantina se intenta extraer la roca tal cual se encuentra distribuida en la formación geológica sacando un testigo cilíndrico en su mayoría sólido y en lo posible de la menor cantidad de fragmentos o piezas de roca, obteniendo así una muestra consistente. Por lo anterior la capacidad de este tipo de muestreo de representar las características en general de la roca es muy buena, permitiendo poder identificar tanto elementos estructurales como la mineralogía, la cual se puede distinguir adecuadamente y así permitir a los geólogos realizar un logueo lo más completo posible. También es posible identificar y aproximar la cantidad de cobre determinando una ley visual de una manera fácil y con buen grado de certeza. A partir de los resultados obtenidos del estudio de 10 pozos de sondaje, con un largo aproximado de 250 metros por sondaje, se entiende que las muestras obtenidas por una perforación de tipo diamantina se consideran con una representatividad casi del 100%, permitiendo ver de manera clara tanto elementos estructurales como mineralogía, alteración y ley mineral.

6.2.2 Método con equipos Simba (aire reverso)

Los datos recopilados respecto al año 2023 del método de perforación de aire reverso (RC) ejecutado por medio de equipos Simba para lo que es el mediano y el corto plazo en minera Atacama Kozan. Posteriormente han sido utilizados para la evaluación de muestreo.

En cuanto a los equipos de mediano plazo la ilustración 8 muestra las diferencias de metros que le corresponde a cada equipo en este caso en el mediano plazo se involucraron los equipos Simba 302, 304 y 306, además para cada Simba se muestra la comparación de metros de programa de perforación (azul) y los perforados realmente (anaranjado), donde se puede notar que ningún equipo cumplió o superó el programa de perforación. De manera similar para el corto plazo se especificó la misma información que para el mediano plazo en la ilustración 9 expresando metros de programa de perforación en azul y los perforados realmente en anaranjado, por otro lado, en el corto plazo solo se involucran dos equipos en el proceso de muestreo, los cuales corresponden a las Simbas 302 y 306, siendo estos últimos los principales equipos de perforación del corto plazo.

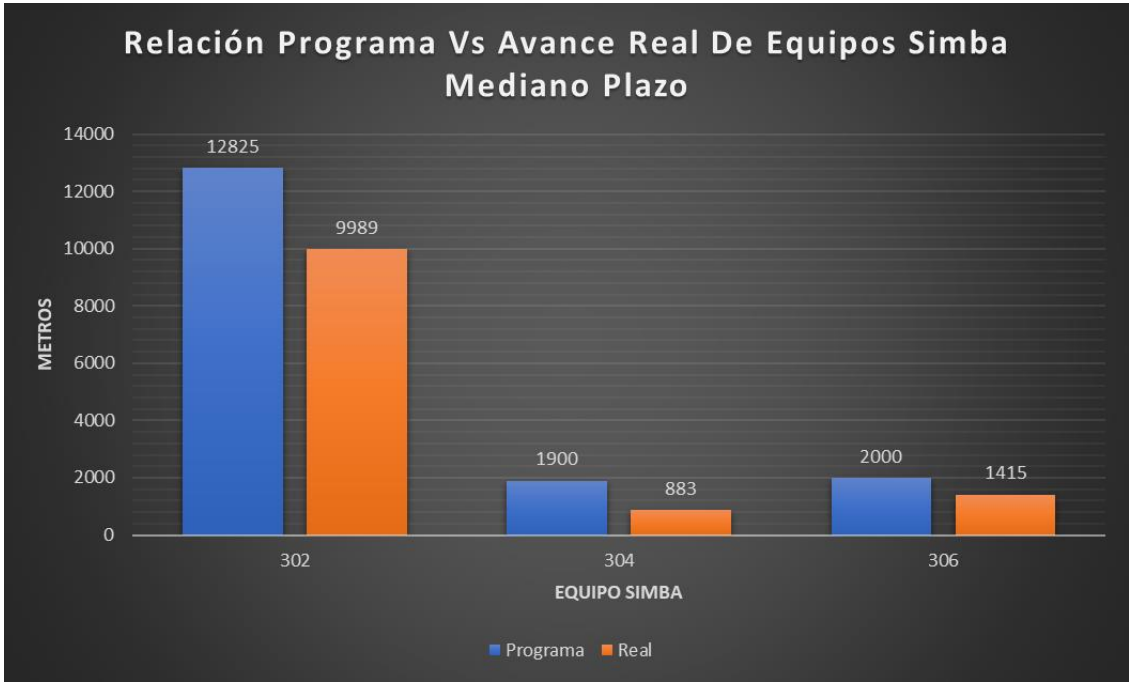


Ilustración 8. Comparativa de metros perforados respecto a programa versus real (equipos Simba MP).

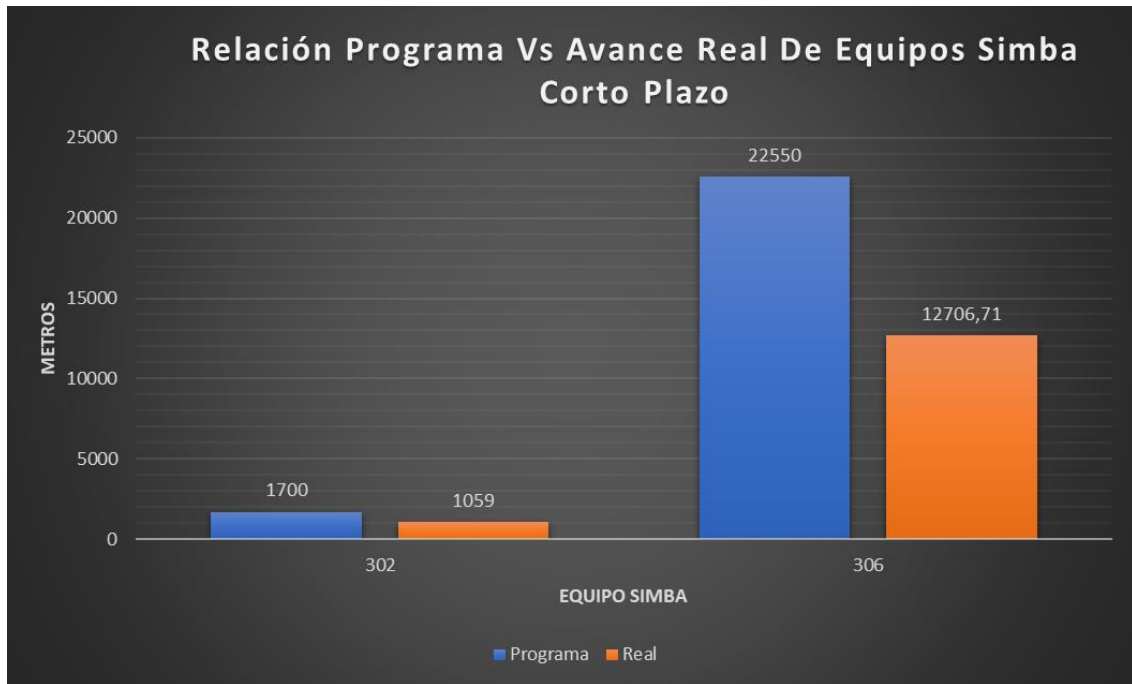


Ilustración 9. Comparativa de metros perforados respecto a programa versus real (equipos Simba CP).

6.2.2.1 Tiempo de perforación de muestreo

De acuerdo a los reportes realizados por cada turno se estimó un tiempo de perforación promedio, al igual que en el caso de operaciones de perforación diamantina, un aproximado de 6 horas efectivas en un turno normal de 8 horas totales.

Para obtener valores de metros de avance por hora de perforación se utilizaron los valores promedio de metros de avance por turno, dividiendo estos valores por 6 horas respectivamente y obteniendo así por último los metros/hora que fueron utilizados para una posterior evaluación del método.

Respectivamente para cada propósito del muestreo, es decir, mediano (MP) y corto plazo (CP) se presentan distintos valores de avance de metros por turno, perforando en promedio para el caso del mediano plazo un total de 60,61 metros por turno (Tabla 14), esto dividido por 6 horas obtiene aproximadamente un avance de 10,1 metros por hora. Por otro lado, con respecto al corto plazo este promedió 77,59 metros por turno (Tabla 14), llegando a perforar aproximadamente 12,93 metros por hora.

Tabla 14. Detalle de metros promedio perforados por turno y de máximos/mínimos de mediano y corto plazo (aire reverso).

Tipo de muestreo	Simba MP	Simba CP
Promedio de metros perforados por turno [m]	60,61	77,59
Máximo - mínimo [m]	152 - 5,4	176,69 - 6

6.2.2.2 Costos en perforación de muestreo

En cuanto a los costos de perforación con equipo simba el costo es uno solo en promedio y corresponde a 0,75 UF por metro perforado, llevando este valor a US dólar para poder ser comparable con los valores de perforación por metro de un sondaje diamantina se traduce a 29,47 USD el metro. Este costo de muestreo es un valor estándar calculado en S.C.M. Atacama Kozan.

6.2.2.3 Calidad de la muestra

Para los equipos de aire reverso o similares, en este caso en específico de perforación de aire reverso con inyección de agua dentro del barreno. A partir de los resultados obtenidos del estudio de 20 pozos de perforación, contemplando cada pozo aproximadamente 36 metros, se considera que la representatividad de las muestras no es buena, debido directamente y por efecto de distintos procesos que dificultan mantener las características en general de la roca, pero sobre todo y más importante sus distintos elementos estructurales y la mineralización. El equipo Simba utilizado en este tipo de muestreo presenta ciertas limitaciones en cuanto a la recuperación de la muestra se trata, debido a que la recolección de la misma no es adecuada para un muestreo correcto y eficiente, el cual debería realizarse con un ciclón que separa partículas de roca de los demás elementos que serían agua y aire, sin embargo, el muestreo realizado durante el estudio, corresponde en dejar caer por medio de una goma actuando como canal que intercepta en lo posible el material que se expulsa del pozo de perforación, el cual viene con bastante cantidad de agua y provoca que se disperse por múltiples lados la roca triturada y no se concentre en la caja que recolecta la muestra para poder introducir está en la bolsa tivex utilizada para

la recolección. Por otro lado, la caja que recolecta la muestra recibe una escasa cantidad de muestra la cual al ser transportada con una cantidad posiblemente excesiva de agua se lava perdiendo de esta manera parte de la mineralización y por consiguiente siendo menos representativa también en términos de ley mineral al perder los finos generados por efecto de la perforación.

6.3 Eficiencia operacional

6.3.1 Evaluaciones de métodos de muestreo utilizados en Atacama Kozan

En Atacama Kozan se utilizaron dos métodos distintos de muestreo en el desarrollo de las labores, en el caso de interior mina se aplica un muestreo mediante equipos Simba que funcionan por el método de Aire reverso adaptado con inyección de agua y/o aire para la extracción la muestra triturada del pozo, como también se realizan perforaciones de tipo DDH o Diamantina, que se ubicaron en una postura fija y determinada para realizar el sondaje. Por otro lado, si se realiza una perforación desde el exterior, solo se utilizó este último método mencionado de tipo DDH.

La ecuación E_{em} mostrada en el punto 5.1, fue utilizada para evaluar estos métodos de perforación en el caso del muestreo con equipos Simba se realizaron dos evaluaciones debido a que presentan datos distintos en cuanto a el mediano y corto plazo, por lo que es posible tener dos resultados de referencia para ser comparados con el método diamantina.

6.3.1.1 Evaluación de método de muestreo: Diamantina

Para realizar la evaluación se debieron primero utilizar las escalas cuantitativas presentadas en las tablas 3, 4, 5 y 6, las cuales permiten obtener un puntaje ajustado a la ecuación para obtener los valores de S_i y una calificación dentro del rango que estas permiten (tabla 15).

Tabla 15. Parámetros, datos reales medidos y puntajes obtenidos para método de muestreo con perforación Diamantina.

Diamantina		
Parámetro	Dato real	Puntaje Obtenido
Tiempo de muestreo (S_t)	3,12 m/h	1
Costo de muestreo (S_c)	95,58 USD	5
Adherencia al plan de perforación (S_a)	106%	9
Calidad de la muestra (S_{qlm})	88%	9
Calidad de la muestra (S_{qes})	99%	9

Para el caso de la calidad de la muestra con respecto a litología y mineralización se puede interpretar que es posible identificar sobre el 88% de la litología y la mineralización en la mayoría o casi totalidad de los casos de un logueo geológico de testigos, donde hay excepciones como cuando se inicia una perforación en superficie y se presentan sedimentos o cuando se tiene una roca muy triturada por alguna zona de falla y no es posible identificar la litología y/o mineralización, es por esto que para el parámetro S_{qlm} y según la escala de calidad de la muestra el método obtiene un puntaje de 9. En segundo lugar y refiriéndose al parámetro de Calidad de la muestra respecto a elementos estructurales (S_{qes}) es posible afirmar que una perforación de tipo DDH es de los métodos más confiables en la identificación de elementos estructurales siendo posible identificar muy cerca del 100% de estos, obteniendo así un puntaje de 9 sobre este parámetro.

Se utilizó la ecuación E_{em} (presentada en el capítulo 5) para evaluar el método:

$$E_{em} = 2.65 \times S_t + 2.25 \times S_c + 1.37 \times S_{qlm} + 1.68 \times S_{qes} + 2.05 \times S_a$$

Donde los valores de S_i son los siguientes:

$$S_t = 1$$

$$S_c = 5$$

$$S_{qlm} = 9$$

$$S_{qes} = 9$$

$$S_a = 9$$

Reemplazando estos valores se obtiene que:

$$E_{em} = 2.65 \times 1 + 2.25 \times 5 + 1.37 \times 9 + 1.68 \times 9 + 2.05 \times 9$$

Por lo que para el método de perforación de muestreo Diamantina la evaluación resulta:

$$E_{em} = 59,8$$

3.3.1.2 Evaluación de método de muestreo Aire reverso (Mediano plazo)

Nuevamente se debieron utilizar primero las escalas cuantitativas que permitieron obtener un puntaje ajustado a la ecuación para obtener los valores de S_i y una calificación dentro del rango que estas permiten, lo cual se presenta en la siguiente tabla 16.

Tabla 16. Parámetros, datos reales medidos y puntajes obtenidos para método de muestreo con perforación Aire reverso en el mediano plazo.

Aire reverso MP		
Parámetro	Dato real	Puntaje Obtenido
Tiempo de muestreo (S_t)	10,1 m/h	4
Costo de muestreo (S_c)	29,47 USD	8
Adherencia al plan de perforación (S_a)	73%	7
Calidad de la muestra (S_{qlm})	22-33%	3
Calidad de la muestra (S_{qes})	1%	1

En cuanto al punto de Calidad de la muestra con respecto a litología y mineralización (S_{qlm}) hay que considerar varios aspectos que no presenta una muestra de aire reverso con respecto a una de DDH, primero que todo la capacidad de conservar todo el material que es posible extraer del mismo pozo debido a que ya en la misma recuperación como se ha mencionado anteriormente se pierde una gran cantidad de material que no es almacenado en las bolsas y además de esto gran parte de los finos producidos de la misma perforación se pierden en el agua utilizada. Por otro lado, al tratarse de una perforación que tritura la roca y crea fragmentos pequeños los cristales de los algunos minerales presentes se

destruyen o pulverizan siendo imposibles reconocerlos a simple vista o con lupa de mano en el logueo dificultando de esta manera el reconocimiento de la litología del sector u otros minerales que no se solicitan como parte del análisis de laboratorio. Es por esto por lo que en este aspecto el método clasificó en el intervalo de entre 22 a 33 % de representatividad, siendo una muestra no confiable en su grado más alto puntuando 3 pts. Por otro lado, y refiriéndose al parámetro de Calidad de la muestra con respecto a elementos estructurales (S_{qes}), al tratarse de una roca triturada por efecto de la misma perforación no es posible identificar los elementos estructurales presentes en el macizo rocoso, si bien en ocasiones se clasifican ciertas muestras de cutting como zonas de falla no representa con certeza que sea una falla debido a que la roca está pulverizada similar a como se presenta en el rechazo. Por esta razón la representatividad de la muestra con este método está en el intervalo más bajo obteniendo un puntaje de 1.

Se utilizó la ecuación E_{em} para evaluar el método:

$$E_{em} = 2.65 \times S_t + 2.25 \times S_c + 1.37 \times S_{qlm} + 1.68 \times S_{qes} + 2.05 \times S_a$$

Donde los valores de S_i son los siguientes:

$$S_t = 4$$

$$S_c = 8$$

$$S_{qlm} = 3$$

$$S_{qes} = 1$$

$$S_a = 7$$

Reemplazando estos valores se obtiene que:

$$E_{em} = 2.65 \times 4 + 2.25 \times 8 + 1.37 \times 3 + 1.68 \times 1 + 2.05 \times 7$$

Por lo que para el método de perforación de muestreo con aire reverso en un mediano plazo la evaluación resulta:

$$E_{em} = 48,74$$

6.3.1.3 Evaluación de método de muestreo Aire reverso (Corto plazo)

Se aplicó la misma metodología en este caso para lo que es el corto plazo el cual difiere en algunos parámetros con respecto al mediano plazo y por esta razón se separan en su evaluación además de que se utilizan diseños de muestreo diferentes entre estos dos métodos. A diferencia del mediano plazo, el cual se realiza primero, donde se realizan perforaciones en abanico en un túnel cada 14 metros, en el corto se realiza un muestreo cada 7 metros en zonas donde la mineralización no se encuentra bien detallada. A continuación, en la tabla 17 se detallan los puntajes obtenidos.

Tabla 17. Parámetros, datos reales medidos y puntajes obtenidos para método de muestreo con perforación Aire reverso en el corto plazo.

Aire reverso CP		
Parámetro	Dato real	Puntaje Obtenido
Tiempo de muestreo (S_t)	12,93 m/h	5
Costo de muestreo (S_c)	29,47 USD	8
Adherencia al plan de perforación (S_a)	57%	6
Calidad de la muestra (S_{qlm})	22-33%	3
Calidad de la muestra (S_{qes})	1%	1

Para los otros dos parámetros que corresponden a costos de muestreo (S_c) y Calidad de la muestra en ambos aspectos considerados dentro de este (S_{qlm}) y (S_{qes}), el análisis de la evaluación y los puntajes obtenidos son los mismos debido a que el método de muestreo es el mismo con el mismo tipo de equipo, respectivamente los puntajes serían 8, 3 y 1.

Se utilizó la ecuación E_{em} para evaluar el método:

$$E_{em} = 2.65 \times S_t + 2.25 \times S_c + 1.37 \times S_{qlm} + 1.68 \times S_{qes} + 2.05 \times S_a$$

Donde los valores de S_i son los siguientes:

$$S_t = 5$$

$$S_c = 8$$

$$S_{qlm} = 3$$

$$S_{\text{qes}} = 1$$

$$S_{\text{a}} = 6$$

Reemplazando estos valores se obtiene que:

$$E_{\text{em}} = 2.65 \times 5 + 2.25 \times 8 + 1.37 \times 3 + 1.68 \times 1 + 2.05 \times 6$$

Por lo que para el método de perforación de muestreo con aire reverso en un mediano plazo la evaluación resulta:

$$E_{\text{em}} = 49,34$$

El resumen de las 3 evaluaciones realizadas se detalla en la tabla 18 donde el método diamantina obtiene el mayor puntaje, además cada resultado es sombreado con el color correspondiente a los rangos presentados en la tabla 7.

Tabla 18. Resumen de la evaluación de los métodos.

Método	Resultado
Método de perforación diamantina (DDH)	$E_{\text{em}} = 59,8$
Método de perforación con aire reverso utilizando equipos Simba (Mediano plazo)	$E_{\text{em}} = 48,74$
Método de perforación con aire reverso utilizando equipos Simba (Corto plazo)	$E_{\text{em}} = 49,34$

De acuerdo a los puntajes obtenidos en los resultados de la ecuación de evaluación de muestreo, se utilizaron los rangos con su color determinado, los cuales fueron presentados en la tabla 7 para proyectar en ejemplo específicamente los sondajes utilizados más adelante en el punto 6.4 para el análisis de representatividad geológica. Dichos sondajes

se exponen en la ilustración 10 y 11, donde en color verde claro se ilustra el método diamantina (largo plazo) que obtuvo un puntaje de 59,8 y en color anaranjado los sondajes de aire reverso (mediano plazo), los cuales han obtenido un puntaje de 48,74.

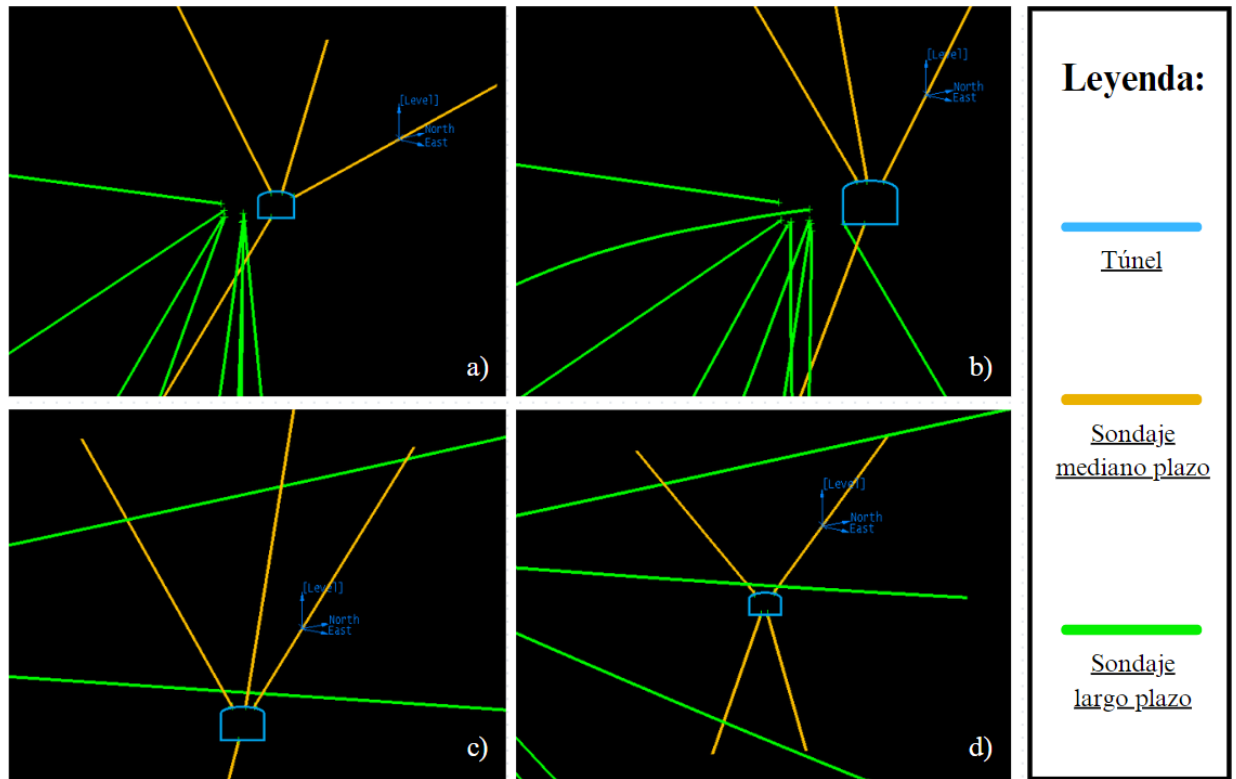


Ilustración 10. Ejemplo de sondajes coloreados de acuerdo a su resultado obtenido en E_{em} . En la sección a), ilustrados sondajes de postura ExFar7 (largo plazo), junto a sondajes de la postura FAR2MP01 (mediano plazo). Así mismo en b), ExFar8 junto a FAR2MP03; c), ExFar2-2 junto a FAR2MP04; d), ExFar2-3 junto a FAR2MP06. Todos ellos de un mismo sector (Farellones).

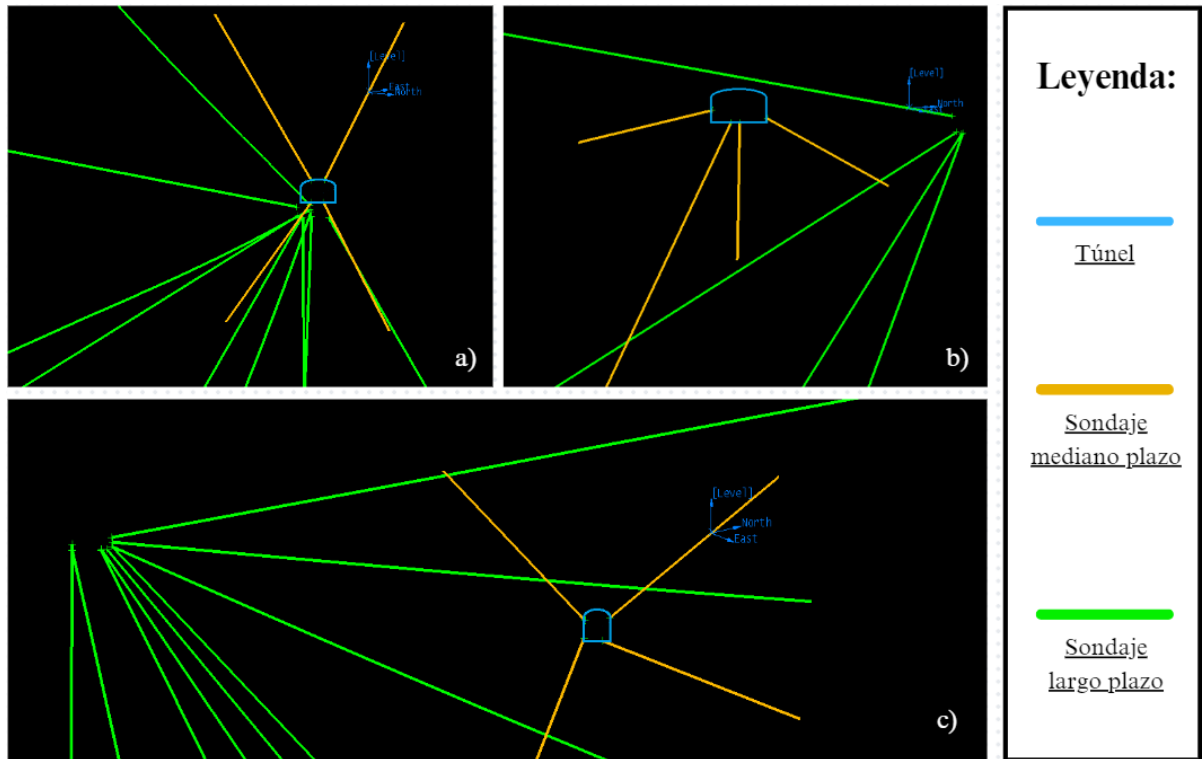


Ilustración 11. Ejemplo de sondajes coloreados de acuerdo a su resultado obtenido en E_{em} . En la sección a), ilustrados sondajes de postura ExFar8-5 (largo plazo), junto a sondajes de la postura FAR2MP0501 (mediano plazo). Así mismo en b), ExFar5-3 junto a F4MPDS0404 y por último en c), los sondajes ExFar2-3-6 junto a F3MPDR0206. Todos ellos de un mismo sector (Farellones).

6.4 Análisis comparativo de representatividad geológica.

Para ilustrar un ejemplo específico de un sector particular de la mina donde se ha llevado a cabo muestreo utilizando ambos métodos de perforación, se emplearon ilustraciones generadas a partir de los registros obtenidos de las mismas muestras de perforaciones muy próximas (menos de 2 metros de distancia), ya sea testigos o roca triturada (*cutting*), junto con los resultados de análisis de laboratorio que proporcionaron valores más precisos de la ley mineral por metro. Además de estos datos, se presentaron detalles sobre las alteraciones, la mineralogía de la roca y su litología. Al presentar esta información, se busca resaltar las discrepancias que surgen en la obtención de datos entre cada método, lo que puede indicar la necesidad de un mayor control para garantizar la representatividad geológica.

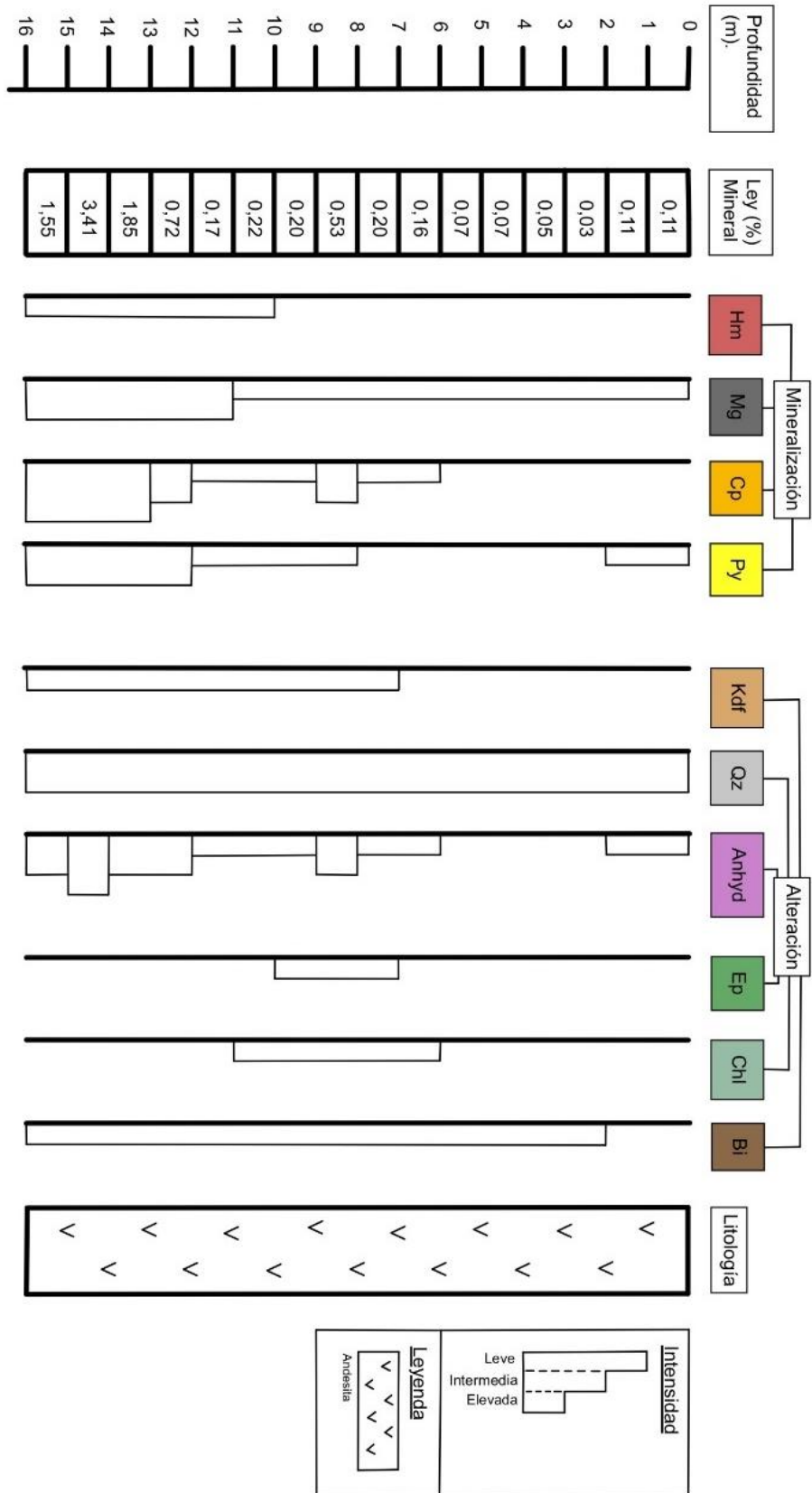


Ilustración 12. Datos ilustrados de sondaje FAR2MP0301 de mediano plazo.

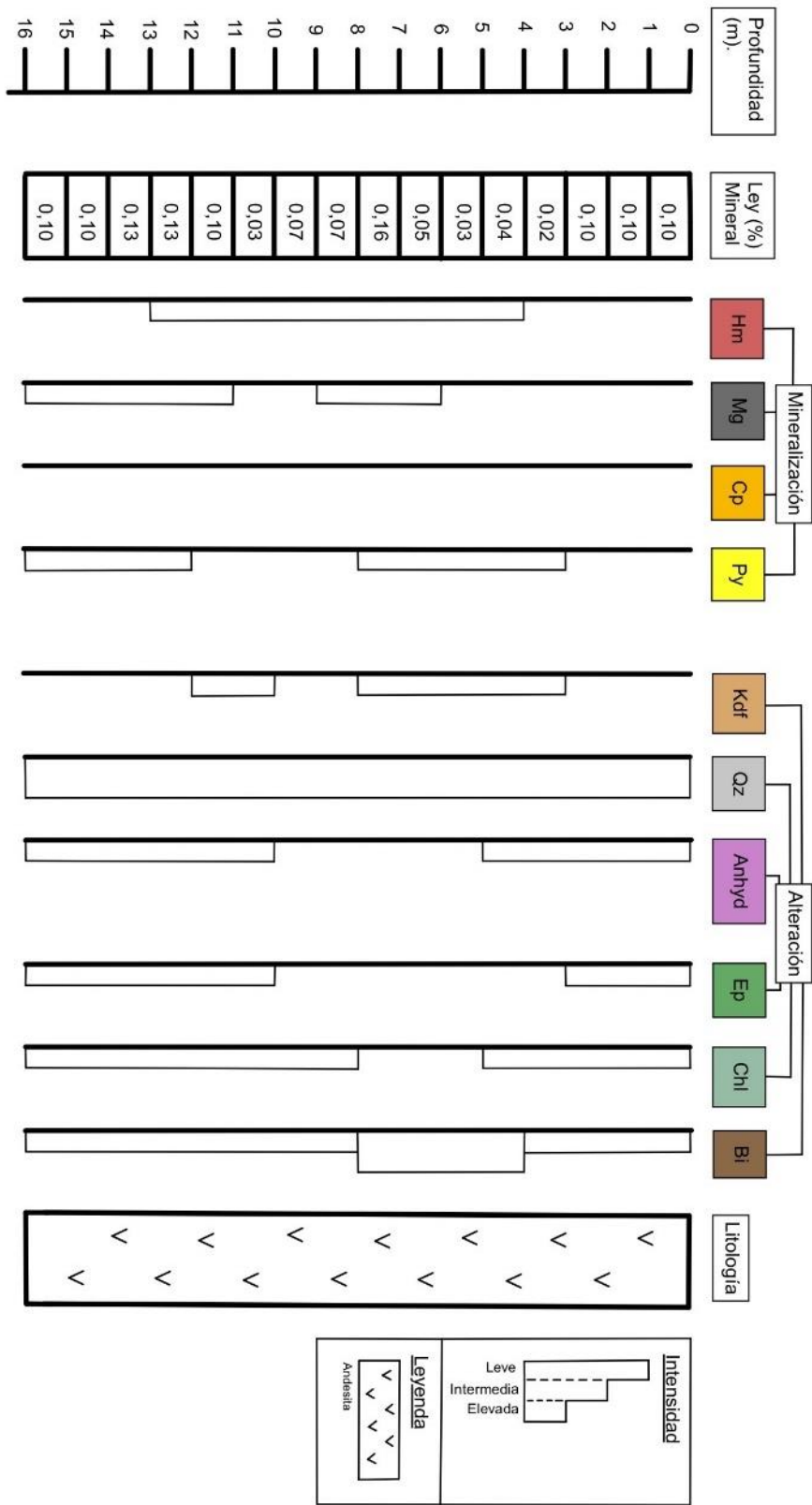


Ilustración 13. Datos ilustrados de sondaje ExFar 8-4 de largo plazo.

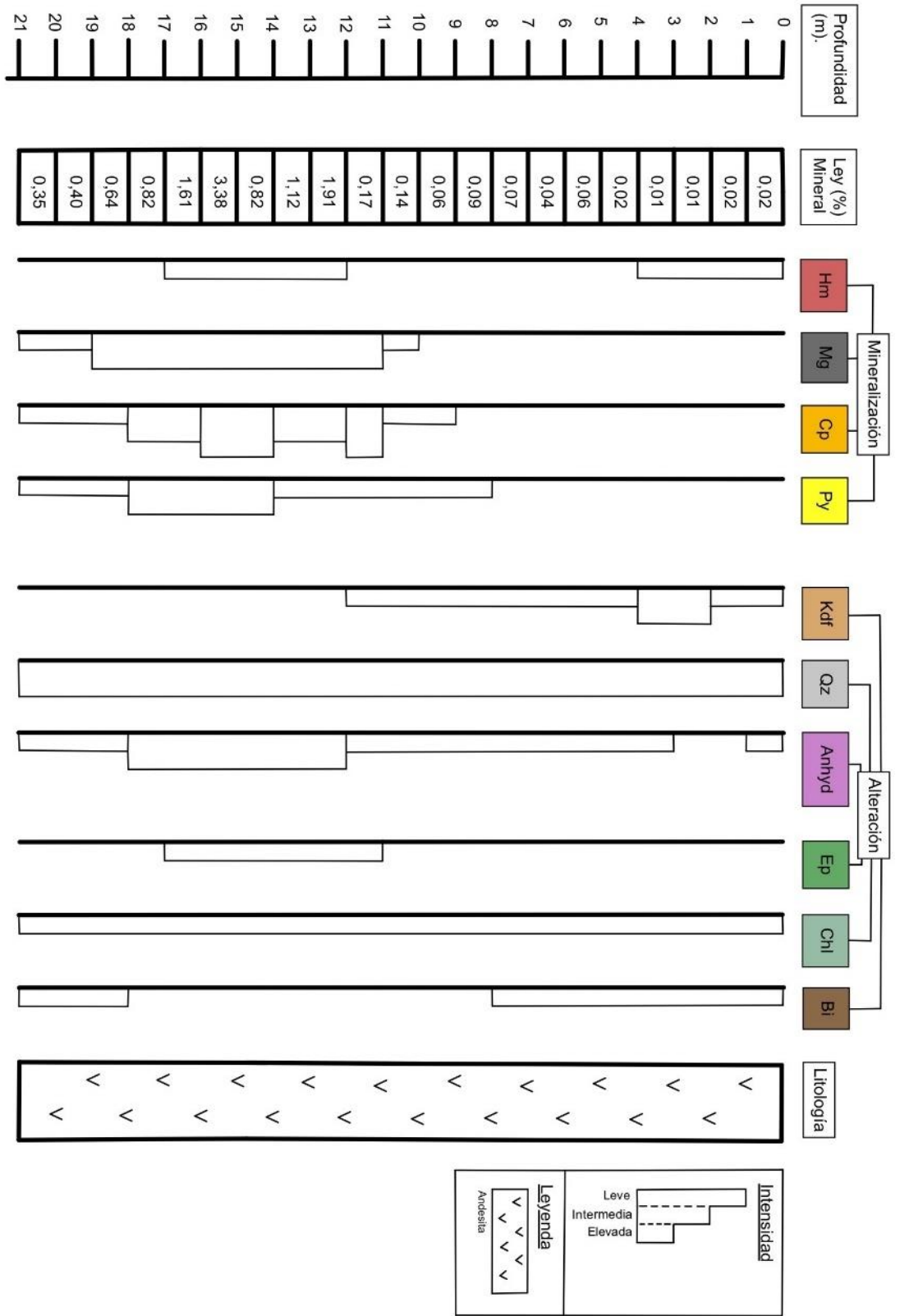


Ilustración 14. Datos ilustrados de sondaje FAR2MP0101 de mediano plazo.

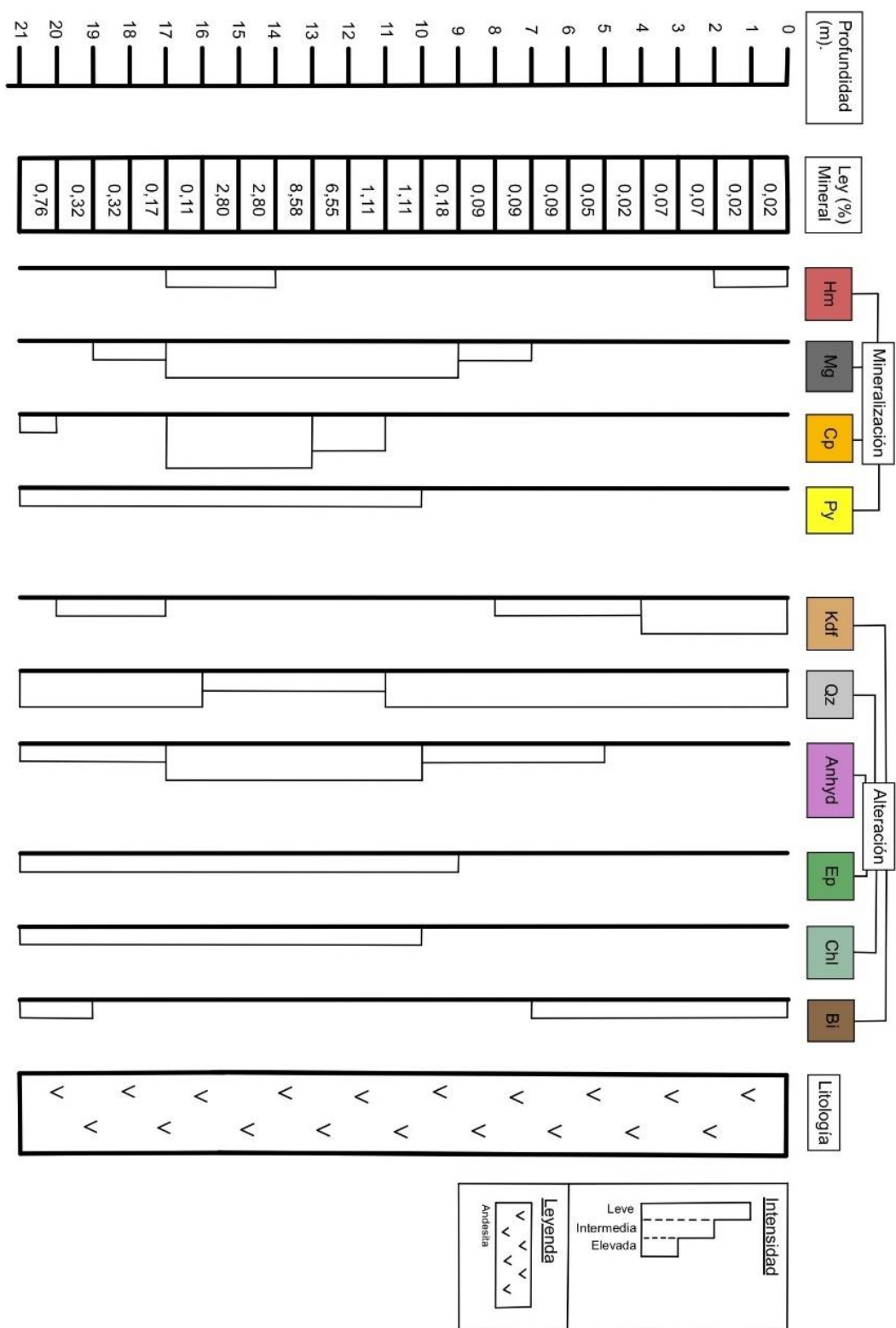


Ilustración 15. Datos ilustrados de sondaje ExFar7-3 de largo plazo.

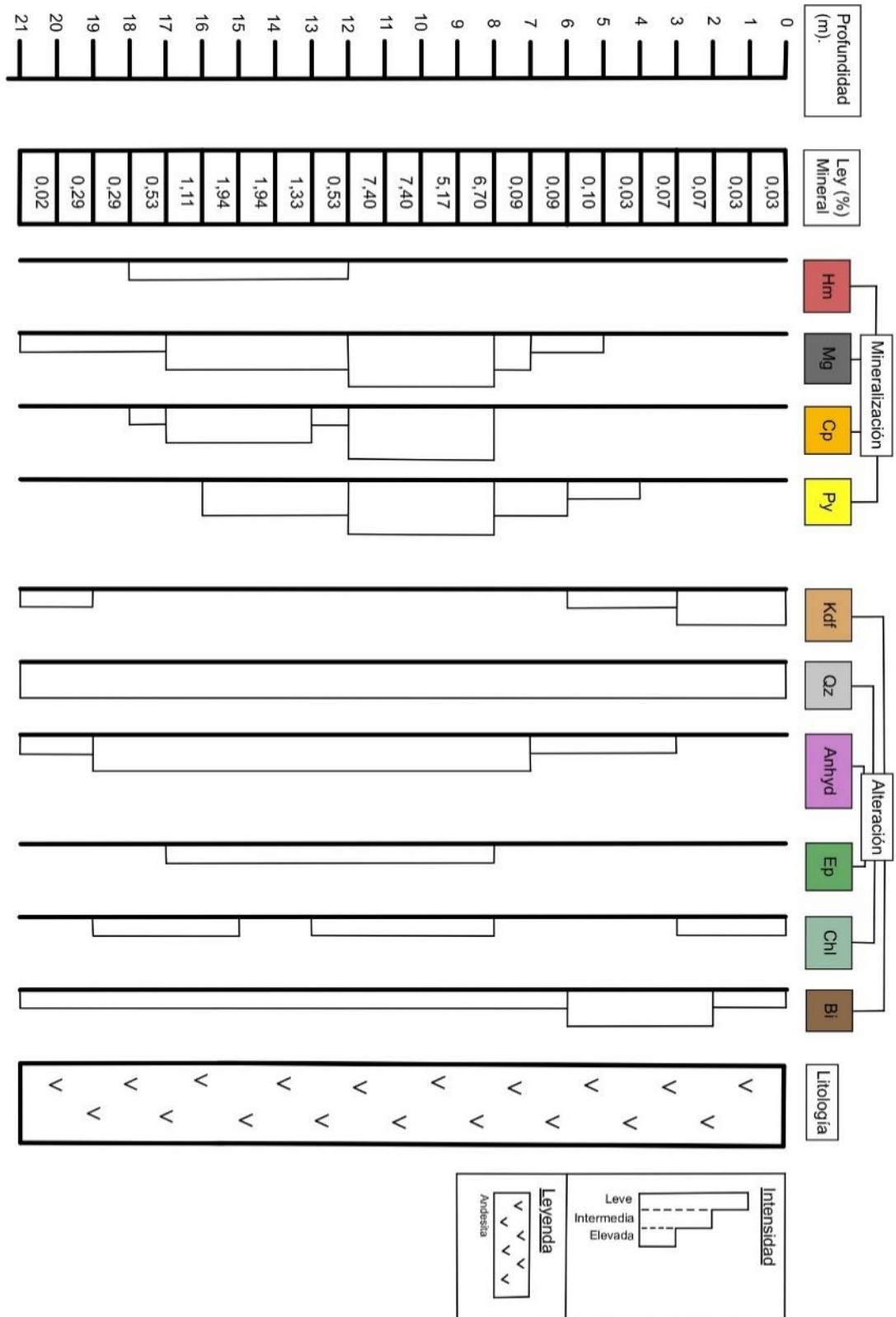


Ilustración 16. Datos ilustrados de sondaje ExFar 7-4 de largo plazo.

Sobre las ilustraciones se dividen en dos casos, el primero corresponde a la N°12 y N°13 donde se considera una extensión de 16 metros para ambas perforaciones, la primera corresponde a una de mediano plazo y su código es el FAR2MP0301, la segunda es un sondaje de largo plazo de código ExFar 8-4 del cual se toman los metros que coinciden en paralelo precisamente con la perforación de mediano plazo. Entre estas dos la diferencia más evidente es la ley mineral la cual en el primer caso entre los metros 12 a 16 y el 8 obtiene valores considerables al contrario de la ilustración N°13 la cual en toda la extensión no presenta leyes siquiera similares.

En el Segundo caso se trata de las ilustraciones N° 14, 15 y 16. Entre ellas la N°14 corresponde a una perforación de mediano plazo y su código es FAR2MP0101, las otras dos son sondajes de largo plazo, donde la N°15 tiene por código ExFar 7-3 y se encuentra totalmente en paralelo a la N°14, entre ellas se puede notar una similitud en cuanto a los metros en donde se encuentran las leyes más altas pero se diferencian notoriamente en los valores que alcanzan estas leyes donde en la N°15 se alcanzan valores máximos de 8,58% y 6,55% de ley en cambio en la N°14 tiene una ley máxima de 3,38%. Por otro lado, en la ilustración N°16 de código ExFar 7-4, con respecto a las dos anteriores también presenta ley mineral de calcopirita en metros muy similares, sin embargo, los valores de ley mineral se asemejan al sondaje de la ilustración N°16 llegando a tener leyes de 7,4% y 6,7% de cobre, manteniéndose alejado aún de lo que se presenta en la ilustración N°14. A diferencia de la ilustración N°15 esta última se interseca con la perforación de mediano plazo FAR2MP0101 dejando en cuenta que si se trata de un mismo método de perforación las leyes son más similares que entre dos métodos diferentes.

Entre todas las ilustraciones se puede notar una similitud en cuanto a la mineralogía y la alteración presente en los metros en donde haya ley de cobre considerable. Sobre la mineralogía en estos metros la forma de ocurrencia de calcopirita es en general acompañada de pirita y magnetita y levemente hematita. Por otro lado, en referencia a la alteración es típico que los espacios en la roca y el transporte de mineral de interés ha ocurrido mediante anhidrita por lo cual esta acompaña a la mineralización en gran cantidad. Los demás minerales de alteración como el feldespato potásico, la clorita y epidota afloran ocasionalmente siendo más notorios en puntos donde no hay bastante

mineralización. Por último, el cuarzo de la silicificación y la biotita son los que más se presentan en todas las perforaciones en distintas intensidades.

Capítulo 7: Discusiones

La eficacia operativa de cada método se examina más adelante y se abordan las complicaciones inherentes al uso del método de aire reverso con equipos Simba, destacando los desafíos técnicos y logísticos que pueden surgir durante su implementación.

Un aspecto destacable de este estudio es el análisis de la representatividad geológica de las muestras obtenidas mediante ambos métodos. Se ha realizado un análisis comparativo de columnas de información geológica extraídas de las respectivas perforaciones de muestreo.

7.1 Comparación de resultados

En la tabla 19 se presentan los resultados de los datos recolectados y las evaluaciones realizadas, en dicha tabla con las cifras se puede notar la superioridad en el muestreo con el método diamantina, respecto a los distintos parámetros utilizados para comparar y evaluar. Además, en la tabla 19 se presenta una síntesis de los resultados obtenidos al evaluar y comparar los métodos. Cabe destacar que los equipos de perforación diamantina utilizados durante el año 2023 no presentaron mayores problemas mecánicos ni fallas que signifiquen grandes pérdidas de tiempo, logrando mayor cumplimiento de lo esperado. Por otro lado, los equipos que operan con aire reverso fueron 4, respectivamente los equipos 302, 304, 305 y 306, de los cuales la mayor parte del año 2023 sólo funcionaron 2 y en ocasiones no se contaba con ninguno disponible para operar por encontrarse en taller mecánico por fallas o incluso sin operador disponible, lo que se sumó en tiempo e incumplimiento para este método.

Tabla 19. Realizado por el autor, datos recuperados de Atacama Kozan. Se destaca en verde el método con mayor ventaja por sobre el otro en el aspecto analizado.

Parámetro	Método de muestreo diamantina	Método de muestreo aire reverso
Cumplimiento de plan de perforación	Para un total de 11027 metros de programa de perforación del año 2023, se perforaron 11724,45 metros en total cumpliendo el programa en un 106% considerando únicamente el equipo DDH Multipower, el cual ha perforado durante todo el 2023.	En el mediano plazo les correspondía lograr un programa de perforación de 16.725 metros, de los cuales fueron perforados realmente 12.287 metros cumpliendo el programa anual total en un 73%. Por otro lado, en el muestreo de corto plazo que contaba con un programa de perforación anual total de 24.250 metros, de los cuales lograron perforar 13.765,71, cumpliendo en un 57%.
Tiempo de perforación de muestreo	Considerando el equipo Multipower de perforación utilizado el 2023 completo se calcula que por turno promedia 21,66 metros, por ende, considerando las 6 horas efectivas de perforación se obtiene que perforan 3,61 metros por hora llegando a un máximo de 9,4 metros por hora en el mejor turno del año y un mínimo de 0,15 metros por hora en el peor turno.	Para el caso del mediano plazo promedian un total de 60,61 metros por turno en el 2023, logrando un avance de 10,1 metros por hora, siendo 25,33 metros por hora el máximo avance y 0,9 metros por hora el mínimo. En cuanto al corto plazo, este promedia 77,69 metros por turno en el año, obteniendo un avance de 12,93 metros por hora, teniendo como máximo 29,45 metros por hora

		y como mínimo avance la cifra de 1 metro por hora.
Costos de perforación de muestreo	Los costos de perforación de muestreo con DDH se expresan en US dólar por metro, variando los valores de acuerdo con la profundidad deseada del pozo promediando 95,58 USD y el valor es otro si el equipo este stanby que es de 74,48 USD.	Los costos de perforación con equipo simba el costo es uno solo y corresponde a 0,75 UF por metro perforado, llevando este valor a US dólar para poder ser comparable con los valores de perforación por metro de un sondaje diamantina se traduce a 29,47 USD el metro.
Calidad de la muestra	La calidad de la muestra obtenida de una perforación DDH en este caso en particular mantiene las características de la roca de muy buena forma y permite identificar distintos elementos estructurales como también la mineralogía y ley visual de cobre. En resumen, la muestra obtenida de este método es bastante representativa cercana al 100%.	En resumen, el muestreo con Simba en primer lugar la recolección y recuperación de la muestra no es la adecuada para obtener una que sea representativa. Por otro lado, al ser un detritus la roca se tritura bastante quedando fragmentos pequeños perdiendo totalmente la posibilidad de distinguir elementos estructurales de una manera correcta y también genera una gran cantidad de finos de Cu que se tienden a

		lavarse de la muestra dificultando la estimación de ley visual de cobre como también pasa en general con la mineralogía de la roca en sí.
<p>Síntesis: En color verde se puede notar en qué parámetro resulta mejor cada método de muestreo respecto al otro. Dando en cuenta que considerando sólo estos 4 parámetros se igualan 2 a 2. Es por esto último que fue necesario recurrir a la ecuación de evaluación de muestreo en la cual una vez evaluados los métodos el resultado apunta a que es superior el muestreo con perforación diamantina, el cual obtiene un puntaje de 59,8 sobre 48,74 (mediano plazo y 49,34 (corto plazo).</p>		

Según los resultados obtenidos y presentados además en el Capítulo 6 (tabla 18), el método de perforación diamantina (DDH) tiene el E_{em} más alto, con un valor de 59,8. Esto demuestra que el método DDH es más seguro en sumados términos de tiempo, costos, calidad de la muestra y adherencia al plan de perforación en símil con los métodos de aire reverso utilizando equipos Simba, ya sea en el mediano o corto plazo.

El método DDH supera a los métodos de aire reverso en varios aspectos clave, como la capacidad para identificar litología, mineralización y elementos estructurales, así como un mayor cumplimiento del programa de perforación y costos más bajos por metro de perforación. Por lo tanto, en base a la evaluación del E_{em} , el método de perforación diamantina sería considerado como el mejor método para el muestreo en las operaciones de Atacama Kozan.

7.2 Complicaciones en el muestreo con equipos de perforación Simba

El primer punto a considerar es sobre el posicionamiento del equipo, sobre ello se sabe que al operador se le entrega un programa que contempla varios aspectos importantes, como es uno de estos el ángulo de inclinación en el que debe posicionarse el brazo del equipo Simba y para encontrar este ángulo se utiliza un inclinómetro el cual entrega aproximadamente la inclinación correcta, luego se ajusta el brazo del equipo cambiando

esta inclinación y ángulo, por ende con el fin de encontrar una posición cómoda para perforar lo que provoca que no se realice el muestreo en la dirección correcta al no seguir por completo el programa de perforación.

Continuando con algunas otras complicaciones detectadas, el equipo al perforar en las zonas de techo y caja donde la perforación se realiza con un ángulo sobre la horizontal perfora únicamente agua, esto por el motivo que por gravedad cae el agua del pozo sin necesidad de un impulso que puede ser ejercido por el aire, no ocurre así cuando la inclinación del brazo del equipo tiene un ángulo que apunta por debajo de la horizontal donde se debe implementar el uso de aire y agua para expulsar la roca triturada del fondo del pozo. El agua que cae debería ser recolectado por un dispositivo especial para esto llamado ciclón el cual es alimentado por una manguera de diámetro ancho y cumple la función de recolectar todo el material expulsado y separar partículas de roca de agua y/o aire, sin embargo, en este caso se utiliza un cajón metálico con una abertura en la zona inferior la cual proyecta una canaleta donde se posiciona la bolsa tivex (bolsa que permite filtrar el agua de la perforación) y este cajón es llenado con la muestra transportada por una plancha de goma la cual no concentra el flujo en un punto para recuperar todo el detritus. Es por lo anterior que la recuperación de muestra no se considera completa ni la correcta y se pierde información importante para procesos posteriores como puede ser para realizar el cutting y posteriormente un análisis de laboratorio adecuado el cual luego será utilizado para realizar modelos geológicos y por el mismo motivo ocurre que algunas bolsas de muestra pueden llegar a pesar aproximadamente 20 kilogramos y otras que no sobrepasan 1 kilogramo. Otro punto importante en este proceso de recuperación que interfiere en la calidad de la muestra es el uso de agua y la generación de finos de mineral por efectos de la misma perforación, estas dos acciones juntas provocan que los finos se pierdan en la circulación del agua, es decir, que estas partículas de mineral son lavadas de los demás fragmentos de mayor tamaño, siendo una dificultad no menor para juntar la muestra completa perforada por la barra ya sea de 1,8 o 1,5 metros dependiendo del tipo de muestreo y en un diámetro de 3 pulgadas.

Otros problemas comunes que ocurren o complicaciones comunes en la perforación que pueden generar un retraso no menor o una paralización completa de la operación de perforación, entre varios otros menos frecuentes son el rompimiento de las barras, la falta

de agua, aire o energía eléctrica por no alimentación hacia la postura, donde el equipo depende de la disponibilidad de dichos elementos para su funcionamiento, de faltar alguno de ellos no puede continuar el muestreo, por otro lado, frecuentemente ocurre la falla o averío de la perforadora(s) Simba.

7.3 Análisis de representatividad geológica.

En este estudio, se evidenció una discrepancia significativa en las leyes de mineral de cobre obtenidas mediante diferentes métodos de muestreo, particularmente entre los equipos Simba de aire reverso con la obtención de muestras de cutting y los equipos de perforación diamantina de los cuales se obtiene el testigo. Los resultados muestran que la representatividad geológica de cada sector de estudio podría no ser completa debido a esta disparidad en las leyes minerales de Cu. Se recomienda encarecidamente a la empresa minera implementar un seguimiento o plan de perforación de muestreo para obtener una información más completa con respecto a la representatividad geológica de cada sector. Además, este seguimiento permitiría calcular un error aproximado en las leyes obtenidas en relación con el método de muestreo empleado. Esto es crucial para garantizar una evaluación más precisa de los recursos minerales y tomar decisiones informadas en la planificación y operación minera. La similitud en la mineralogía y la alteración entre las diferentes perforaciones y ejemplos sugiere una consistencia en la geología subyacente, lo que resalta la importancia de obtener datos de muestreo correctos en cuanto a ley mineral se trata.

7.4 Desafíos Potenciales.

Uno de los desafíos potenciales se centra en la dependencia exclusiva de la perforación diamantina. Para abordar este desafío, es crucial realizar una evaluación exhaustiva de la diversidad geológica presente en la zona de exploración. La adaptabilidad de la perforación diamantina a diversas condiciones geológicas deberá ser monitoreada continuamente para asegurar su eficacia a largo plazo.

Un segundo desafío se presenta en el análisis financiero. Aunque la perforación diamantina es más costosa por metro, los sondajes son espacialmente más confiables, por lo que su utilización conlleva los ahorros correspondientes asociados al desarrollo de túneles y costos operativos, así se puede justificar esta inversión. Se recomienda realizar un análisis de retorno de inversión a largo plazo para evaluar la sostenibilidad financiera de esta estrategia.

7.5 Estrategia empleada para la confección de la E_{em}

En esta investigación, se utilizó una metodología compuesta por encuestas para desarrollar una ecuación de evaluación de muestreo, seguida de escalas cualitativas y cuantitativas. Esta metodología fue seleccionada por la necesidad de asignar un peso adecuado a cuatro parámetros clave en la evaluación y comparación de métodos de muestreo. La encuesta permitió dar importancia a cada parámetro y facilitó una evaluación efectiva de los métodos de perforación.

Los métodos se aplicaron mediante entrevistas a profesionales del área de geología e ingeniería en minas, la recolección de datos históricos de la empresa, la evaluación de muestras y visitas a sitios de perforación. Las categorizaciones, definidas en función de la relevancia y aplicabilidad práctica, permitieron un análisis relevante y útil para comparar métodos de muestreo. Sin embargo, se identificó la necesidad de ajustes en las escalas cuantitativas, que podrían mejorarse con una mayor recolección de datos en diversas faenas mineras.

Entre las fortalezas de la metodología, se destaca su capacidad para proporcionar un análisis claro y concreto, facilitando la comparación de métodos de muestreo y la toma de decisiones informadas. Las debilidades incluyen la necesidad de mejorar la precisión de las escalas cuantitativas y la aplicabilidad en diferentes tipos de faenas y litologías, lo cual se podría solventar con una mayor cantidad y variedad de datos.

Para futuros estudios, se recomienda acceder a una mayor y diversa cantidad de información y realizar la metodología en distintas faenas mineras. Esto permitirá un análisis más detallado y robusto, mejorando la precisión de la ecuación de evaluación de muestreo y su aplicabilidad general.

7.6 Análisis de la metodología implementada para la comparación de los métodos de perforación

La metodología propuesta para la comparación entre los métodos de muestreo en minería resulta óptima, ya que aborda de manera integral los aspectos clave para diferenciar dichos métodos. Esta metodología no solo facilita una comparación efectiva en el contexto de este estudio específico, sino que también es aplicable a otros contextos mineros, lo que le otorga un valor añadido.

En términos de aplicabilidad, la metodología es relevante para su uso en otras faenas mineras debido a que se diseñó considerando dos de los métodos de muestreo más comúnmente empleados tanto en minería subterránea como a cielo abierto. Aunque puede requerir ajustes en los rangos de las escalas cuantitativas, la metodología tiene el potencial de adaptarse a diferentes contextos y proporcionar resultados confiables.

Entre las ventajas de la metodología se destaca la capacidad de combinar un análisis interpretativo, que se basa en la experiencia geológica para identificar muestras representativas, con un análisis retrospectivo que utiliza una base de datos para evaluar los métodos de muestreo. Sin embargo, existen algunas desventajas. La falta de datos suficientes para evaluar los métodos mediante esta metodología podría limitar su efectividad. Además, la ausencia de un geólogo que se encargue de analizar las muestras y asignar puntajes podría afectar la precisión de la evaluación.

Para mejorar la propuesta metodológica, sería beneficioso realizar pruebas adicionales en otras faenas mineras para validar los posibles resultados. También se podría llevar a cabo un estudio más detallado para establecer rangos más precisos en las tablas de asignación de puntaje para cada parámetro, lo que incrementa la exactitud de la evaluación. Asimismo, se podría considerar la inclusión de otros métodos de muestreo que no fueron abordados en este estudio, ampliando así el alcance de la metodología.

7.7 Proyección de la eficiencia operativa con la implementación exclusiva de sondajes diamantina

La propuesta de cambiar la metodología de muestreo en la exploración minera, migrando de un enfoque combinado de perforaciones diamantinas y aire reverso a la utilización exclusiva de la perforación diamantina, conlleva una evaluación detallada que abarca aspectos geológicos, financieros y operativos. Esta transformación busca optimizar la obtención de datos geológicos cruciales para la toma de decisiones en la industria minera. Proyectando hacia el futuro, la implementación exclusiva de la perforación diamantina parece prometedora. El énfasis en la calidad de los datos geológicos proporciona una base sólida para la toma de decisiones estratégicas. La inversión adicional en equipos de perforación diamantina puede traducirse en ahorros operativos a largo plazo y en una mayor confiabilidad en los resultados geológicos.

La gestión proactiva de riesgos, especialmente en términos de adaptabilidad a diversas condiciones geológicas, será crucial para mantener la eficiencia operativa a medida que se implementa y evoluciona esta estrategia.

Capítulo 8: Conclusión

En esta investigación, se ha analizado la eficiencia y eficacia de los métodos de muestreo mediante perforación a aire reverso y diamantina con el objetivo de mejorar la calidad de la información geológica para el modelamiento geológico de mediano y corto plazo. Se ha desarrollado una metodología específica para comparar estos métodos, centrándose en los costos, precisión y confiabilidad de las muestras.

Los resultados muestran que el método de perforación diamantina ofrece una mayor precisión y calidad en las muestras en comparación con el aire reverso. Esto tiene importantes implicaciones para la toma de decisiones en la selección del método de muestreo, ya que la calidad de la muestra es crucial para el diseño de modelos geológicos representativos y precisos. Este enfoque permitirá una toma de decisiones más informada y una exploración minera más eficiente y precisa.

Se recomienda la preferencia por la perforación diamantina en proyectos donde la precisión y la calidad de los datos sean esenciales, aunque se debe considerar el costo asociado. También se sugiere el desarrollo de protocolos estandarizados para la evaluación de métodos de muestreo en diversas condiciones geológicas y la inversión en capacitación y tecnología para mejorar la precisión y confiabilidad. Además, se aconseja realizar investigaciones adicionales para confirmar estos hallazgos y refinar la metodología en función de la retroalimentación práctica.

Capítulo 9: Recomendaciones para la empresa

Durante la evaluación de los métodos de muestreo mediante perforación a aire reverso (RC) y diamantina (DDH) en la presente investigación, se ha identificado una serie de consideraciones que podrían optimizar la eficiencia y eficacia en la obtención de información geológica. A continuación, se presentan recomendaciones clave:

9.1 Adopción Estratégica de Métodos:

- **Perforación Diamantina (DDH):** Se recomienda priorizar el uso de perforación diamantina para la exploración de recursos y el modelamiento geológico a mediano plazo. La calidad superior de las muestras obtenidas respalda un modelamiento más completo y confiable del cuerpo mineralizado.
- **Perforación a Aire Reverso (RC) con Equipos Simba:** En situaciones donde se busca rapidez y eficiencia en el corto plazo, se sugiere considerar únicamente la perforación a aire reverso con equipos Simba. Sin embargo, se aconseja la implementación de un ciclón en las perforadoras Simba para mejorar la recuperación de la muestra y aumentar la certeza en el modelamiento geológico.

9.2 Posibles Cambios en el Método de Muestreo:

- **Exclusividad de Perforación Diamantina:** En caso de considerar un cambio en el método de muestreo, la adopción exclusiva de perforación diamantina puede generar ahorros significativos en costos y tiempo, especialmente en procesos como logueo de cutting, extracción y transporte de muestras, así como en análisis de laboratorio.
- **Uso Exclusivo de Equipos Simba en Corto Plazo:** Para muestreos de corto plazo, se podría implementar exclusivamente la perforación a aire reverso con equipos Simba, mejorando así la eficiencia y eficacia, superando las posibles complicaciones asociadas con el cumplimiento del programa anual.

9.3 Implementación Estratégica de Ambos Métodos:

- En conclusión, se sugiere la implementación de ambos métodos, aislando la utilización de cada uno para garantizar su correcta aplicación. La perforación diamantina se reserva para exploración de recursos y desarrollo a mediano plazo, mientras que la perforación a aire reverso con equipos Simba se emplea estratégicamente para muestreos de corto plazo.

Referencias bibliográficas

Castaño, M., Rodríguez, A., & García, A. (2018). Caracterización de parámetros en la concentración de circones para andesitas, monzogranitos, riolitas, cuarcitas y cuarzomonzonitas. *Boletín Geológico Núm. 44*.

Chica, M. (1987). Análisis geoestadístico en el estudio de la explotación de los recursos minerales. *Univ. Granada, Departamento de Geodinámica*.

Del Real, I., Reich, M., Simon, A. C., Deditius, A., Barra, F., Rodríguez-Mustafa, M. A., Thompson, J. F. H., & Roberts, M. P. (2021). RETRACTED ARTICLE: Formation of giant iron oxide-copper-gold deposits by superimposed, episodic hydrothermal pulses. *Communications Earth & Environment*, 2(1), 1–9. <https://doi.org/10.1038/s43247-021-00265-w>

Del Real, I., Thompson, J., Carriedo, J. (2018). Lithological and structural controls on the genesis of the Candelaria-Punta del Cobre Iron Oxide Copper Gold district, Northern Chile. ResearchGate.

https://www.researchgate.net/publication/327315862_Lithological_and_structural_controls_on_the_genesis_of_the_Candelaria-Punta_del_Cobre_Iron_Oxide_Copper_Gold_district_Northern_Chile

Espinoza, K. (2019). Estudio Hidrogeológico de la Minera Aurífera Retamas.

Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión.

doi:<http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1633>

García, R., & Rodríguez, L. (2023). Impacto de la actividad minera sobre la calidad del aire en el Distrito de Morococha - Oroya - Junin, 2017-2018. *Universidad Nacional del Centro de Perú*. doi:<http://hdl.handle.net/20.500.12894/9861>

Geotec. (2005). Curso: Conocer los aspectos relevantes del sistema perforación diamantina.

Geotec. (2006). Curso: Sistema de perforación áire reverso.

González, N. (2020). Zonificación geomecánica y calibración de métodos de evaluación de estabilidad y divulgación en base al comportamiento historico de SCM Atacama Kozan. *Universidad de Atacama*, 16.

Hapugoda, S. (2010). A Comparison of Drilling and Sampling Techniques as They Relate to Base and Precious Metal Exploration in the Mt Isa Inlier of North West Queensland and the Southern Lachlan Fold Belt in New South Wales. *PERTH WA AUSTRALIA Volume: SAMPLING*.

Lambert, A. (2006). Manual de Muestreo para Exploración, Minería Subterránea Y Rajo Abierto. 5-20.

Larisch, M. D. (2012). Comparison of different hard rock drilling methods for bored piles. *16th Australian Geomechanics Symposium, Advances in Geotechnics of Roads and Railways*.

LA CANDELARIA AND THE PUNTA DEL COBRE DISTRICT, CHILE: EARLY CRETACEOUS IRON-OXIDE CU-AU(ZN-Ag) MINERALIZATION. (2000).

Marschik, R. Et Al. <https://www.geokniga.org/bookfiles/geokniga-13candelaria-and-punta-del-cobremarschik.pdf>

Nuñez, R. (2018). EVALUACIÓN DEL EFECTO DE MATERIAL PARTICULADO EN SUSPENSIÓN ORIENTADO A LA OPERACIÓN MINA A PARTIR DE LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA RED DE MONITOREO AMBIENTAL EN MINERA ESCONDIDA. <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/169965/Evaluacion-del-efecto-de-material-particulado-en-suspension-orientado-a-la-operacion-mina-a-partir.pdf>

Nwanwe, O., & Teodoriu, C. (2020). Matrix selection and comparison for selecting drilling methods and technologies for a wide range of applications . *Journal of Petroleum Science and Engineering*.

PEREZ, H. (2019). EStudio petrográfico, mineralógico y estructural de las unidades de andesitas superiores y el manto mineralizado del sector norte de la sociedad contractual minera atacama kozan, tierra amarilla, region de atacama, chile. *universidad de atacama*, 14.

Rojo, Á. (2016). Optimización en la prospección de sondeos en minería, mediante técnicas de geoestadística multivariante. *Universidad de León*.

Serra, M. E., & Gómez, A. T. (2003). *Topografía subterránea para minería y obras*. Barcelona: Ediciones de la universidad de Catalunya.

Capítulo 10: Anexo

Anexo 1: encuesta parámetros por considerar para la selección adecuada de un método de muestreo.

La siguiente encuesta tiene como objetivo la acumulación de datos para obtener un valor cuantificable en la evaluación sobre qué método de perforación con respecto al muestreo es el más adecuado para aplicar en una determinada circunstancia, asignando valores numéricos a una serie de parámetros que están directamente relacionados a un muestreo efectivo y eficiente. Se pretende brindar una fórmula para considerar aplicar a la hora que se deba seleccionar o diferenciar entre métodos perforación de muestreo disponibles para minería. La encuesta está dirigida a personas que se encuentren implicadas en el proceso de muestreo y perforación.

Para poder asignar un valor a cada parámetro se utiliza una medida de rango en porcentaje de 0 a 100%, siendo 0% como el valor que considera al parámetro como menos relevante y 100% el valor que representa que el parámetro es de la mayor relevancia. Este valor se asigna distribuyendo el total del porcentaje (100%) entre la cantidad de parámetros disponibles.

1. Considerando los 4 parámetros juntos como un 100%, ¿qué porcentaje de importancia le daría a cada uno de ellos según su criterio?

- **Tiempo de muestreo:** _____%
 - Tiempo de perforación.
 - No considera (Preparación de la muestra - Tiempo de Logeo - Análisis de laboratorio).
- **Costos de muestreo:** _____%
 - Costos operativos de perforación.
 - No considera (Insumos - Análisis de laboratorio - Operaciones mina; acuñadura, fortificación, ventilación, Servicios).
- **Calidad de la muestra:** _____%

- Calidad de la muestra respecto a litología y mineralización.
- Calidad de la muestra respecto a elementos estructurales.

- **Adherencia al plan de perforación: _____%**

- Cumplimiento del programa de perforación (metros y plazos).
- No Considera (diámetro de perforación - profundidad de la perforación).