



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA INDUSTRIAL

MEJORAMIENTO ESTRATEGIA EXPLORACIÓN GREENFIELD
CASO DE ANTOFAGASTA MINERALS S.A

TESIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS

RODRIGO ALEJANDRO CABRERA OLIVERA

PROFESOR GUÍA:
ROBERTO FRÉRAUT CONTRERAS

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ENRIQUE SILVA RAMOS
ENRIQUE JEHOSSUA JOFRÉ ROJAS

SANTIAGO DE CHILE
2023

TÉSIS PARA OPTAR AL GRADO DE MAGISTER EN
GESTIÓN Y DIRECCIÓN DE EMPRESAS
POR: RODRIGO ALEJANDRO CABRERA OLIVERA
FECHA: 2023
PROFESOR: ROBERTO FRÉRAUT CONTRERAS

MEJORAMIENTO ESTRATEGIA EXPLORACIÓN GREENFIELD CASO DE ANTOFAGASTA MINERALS S.A

En las próximas décadas se prevé una fuerte demanda de cobre, con un crecimiento anual de 1,6%, debido al natural crecimiento demográfico y a los desafíos asociados al cambio climático. Esta creciente demanda debe ser satisfecha principalmente a través de nuevos descubrimientos que sean explotables económicamente. En contraparte, la eficacia de la exploración medida como descubrimientos que se transforman en operaciones mineras, ha decrecido sostenidamente desde hace décadas. A lo anterior, se agrega que los proyectos en operación o en construcción se han visto complejizados debido a regulaciones medio ambientales y comunitarias más exigentes, que se suman a leyes promedio de explotación de minerales sostenidamente menores en el tiempo.

Desarrollar una estrategia de exploración efectiva depende de una serie factores, entre ellos el tamaño de la empresa, el ciclo de precios, el tipo de mineral, la experiencia del grupo de trabajo y tamaño objetivo del descubrimiento. Este proceso debe ser dinámico, y no estático. Cada uno de los temas corporativos, organizacionales, técnicos, sociales (internos y externos), políticos, normativos, ambientales y presupuestarios requieren estrategias, metodologías adecuadas y flexibles en un entorno cada vez más incierto o variable.

El objetivo general de esta tesis es desarrollar una metodología estándar que permita gestionar la asignación de recursos a la búsqueda de nuevos depósitos de cobre para la compañía minera Antofagasta Minerals S.A. (AMSA) y mejorar la estrategia de exploración greenfield.

De los resultados de esta metodología, dado algunos supuestos de precio, tipo de procesamiento y recuperación, proyectos con alimentación a planta esperada sobre 100 Mton con una ley media de cobre mayor a 1% resultan atractivos. Depósitos con razones estéril/mineral sobre 4 son convenientes para métodos de explotación subterránea. Para la segunda región donde existe la mayor concentración de propiedad minera de AMSA, una distancia mayor a 60 km del depósito de una planta de procesamiento implica que es conveniente desarrollar el proyecto stand alone.

ABSTRACT

In the coming decades, strong demand for copper is expected, with an annual growth of 1.6%, due to natural population growth and the challenges associated with climate change. This growing demand must be met primarily through economically exploitable discoveries. In contrast, exploration efficiency, measured as discoveries that are transformed into mining operations, has decreased steadily since the last century. Likewise, projects in operation or under construction have become more complex due to tighter environmental and communities' regulations, coupled with consistently lower average mining grades over time.

Developing an effective exploration strategy depends on several factors, including the size of the company, the price cycle, the type of ore, the working group's experience, and the discovery's target size. This process must be dynamic and not static. Each of the corporate, organizational, technical, social (internal and external), political, regulatory, environmental, and budgetary issues require appropriate and flexible strategies, methodologies in an increasingly uncertain or variable environment. The exploration strategy must focus on implementing a process that aims at discovery and incorporates all the stakeholders involved in its objectives from the beginning, ultimately determining whether a project is viable and can be exploited.

This research aims to develop a methodology to manage the allocation of resources to search for new copper deposits for the mining company Antofagasta Minerals SA (AMSA). The method incorporates risk analysis, mining, and processing parameters for potential targets or third-party offers in the exploration stages. The proposed methodology is to improve the conversion rate of discoveries into exploitable mines and exploration management.

As result of this methology, given some price, processing type and recovery assumptions, projects with expected plant feed over 100 Mton with an average copper grade greater than 1% are attractive. Deposits with waste/mineral ratios above 4 are suitable for underground mining methods. For those projects located in the second region, where there is the highest concentration of AMSA's mining property, a distance greater than 60 km from the deposit to a processing plant implies that it is convenient to develop a standalone project.

DEDICATORIA

A mi familia... mi soporte.

AGRADECIMIENTOS

Deseo expresar mis agradecimientos a todos aquellos que han aportado para que este trabajo llegue a su término. Especialmente a mi familia por su incondicional apoyo y paciencia, al profesor guía don Roberto Fréaut y mis colegas por la dedicación brindada en la dirección y el rigor de sus observaciones.

TABLA DE CONTENIDO

ABSTRACT	ii
TABLA DE CONTENIDO.....	iv
INDICE DE TABLAS	v
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	vi
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Mercado y Perspectivas en Exploración Greenfield.....	1
2 DEFINICIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TEMA.....	2
2.1 Proceso de exploración.....	10
2.2 Cambio regulatorio código minería.....	17
3 OBJETIVOS.....	20
3.1 Objetivo General.....	20
3.2 Objetivos Específicos	21
4 METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	22
4.1 Análisis FODA estrategia de exploración greenfield actual AMSA.....	22
4.2 Desarrollo herramienta evaluación y priorización proyectos propios u oportunidades con terceros.....	26
9.2.1 Modelo Económico	27
9.2.2 Ecuación de exploración.....	28
9.2.3 Factor etapa de un proyecto.....	32
4.3 Elaboración de matriz de priorización de blancos u oportunidades	33
4.4 Parámetros económicamente atractivos en etapas de exploración	34
4.5 Elementos de una estrategia exploración	40
5 CONCLUSIÓN	45
6 GLOSARIO	47
7 BIBLIOGRAFÍA.....	49
8 ANEXOS	50
ANEXO A Ley 21.420 https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1172303	50
ANEXO B Técnicas Geoquímicas	50
ANEXO C Técnicas Geofísicas	50

INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Análisis FODA, Exploración Greenfield AMSA	25
Tabla 2: Escala de probabilidades para métrica (Fréaut, 2020)	29
Tabla 3: ponderación factor de mercado: Fuente Fréaut, 2020	33
Tabla 4: Supuestos económicos para evaluación económica. Fuente: Elaboración propia.....	35
Tabla 5: Rangos VAN para distintos tonelaje y ley deposito sulfuros en profundidad modalidad stand alone. Fuente: Elaboración propia	36
Tabla 6: Rangos VAN para distintos tonelaje y distancia a planta procesamiento, deposito sulfuros en profundidad. Fuente: Elaboración propia	38
Tabla 8: Rangos VAN para distintos tonelaje y leyes a planta procesamiento, deposito sulfuros open pit. Fuente: Elaboración propia.....	38
Tabla 9: Rangos VAN para distintos tonelaje y razón esteril/mineral a planta procesamiento, deposito sulfuros open pit. Fuente: Elaboración propia.....	39
Tabla 10: Parámetros proyecto sulfuros tenga un potencial económico atractivo para AMSA. Fuente: Elaboración propia.....	40

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1: Oferta y Demanda de Cobre	3
Ilustración 2: Proyectos de Cobre con capacidad anual mayor a 175 ktons.	4
Ilustración 4: Tasa de descubrimientos metales base.	6
Ilustración 5: Etapas de Exploración.	7
Ilustración 6: Cadena de Valor Negocio Minero.	8
Ilustración 7: Presupuesto Global No Ferrosos: Fuente: S&P Global Market Intelligence, 2021.....	9
Ilustración 8: Herramientas primarias usados en descubrimientos en metales base.Fuente: Minex Consulting, 2020.....	12
Ilustración 9: Grilla perforación de relleno (infill) exploración greenfield: Fuente elaboración propia.....	15
Ilustración 10: Testigos perforación diamantina.	16
Ilustración 12: Procesos críticos para formación de un depósito de mineral (Fréaut, 2020)	30
Ilustración 13: Etapas exploración para determinar probabilidad éxito económico	31
Ilustración 14: Probabilidad de proyecto en cada etapa proyecto	31
Ilustración 15: Curva de agregación de valor en un proyecto minero.	32
Ilustración 16: Matriz de priorización de activos. Elaboración propia	34
Ilustración 17: Propiedad Minera AMSA segunda región, elaboración propia.....	35
Ilustración 18: VAN v/s Ley para diferentes tamaños de alimentación a planta. Fuente: Elaboración propia.....	37
Ilustración 19: Evolución exploración en profundidad: Fuente Minex Consulting 2020.....	45

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Mercado y Perspectivas en Exploración Greenfield

La exploración y la minería comenzaron en el periodo Neolítico, precediendo al pastoreo y agricultura. Al principio, se extraían metales nativos como el oro y el cobre, pero el descubrimiento de cómo recuperar metales a través de la fundición de óxidos metálicos probablemente haya ocurrido hace al menos 7.000 años, ampliando la visión y los objetivos de la exploración.

El descubrimiento de recursos minerales y la minería ha sentado las bases de todos los grandes estados y sigue siendo esencial en nuestra civilización hoy y en el futuro. La exploración moderna está alejada de la simple prospección visual de la superficie que fue realizada durante siglos por buscadores de oro principalmente.

Los métodos de exploración se han adaptado cada vez más a elementos específicos y al tipo de depósito mineral que se busca. Se utilizan diferentes métodos, por ejemplo, para la exploración de carbón, diamantes, mineral de hierro, bauxita, metales básicos y preciosos.

En nuestra era, el uso de cobre tiene un papel fundamental en las transformaciones tecnológicas, debido a que a nivel mundial ha comenzado una transformación que promueve el uso de electricidad como fuente de energía, en reemplazo del uso de combustibles fósiles. Se espera que la demanda a nivel mundial continúe hasta 2035, en su tasa de crecimiento con un rango entre 1,6% y 2,4% de acuerdo a distintos consultores y escenarios, la que debe ser satisfecha principalmente por el descubrimiento de nuevos yacimientos que se conviertan en minas explotables económicamente.

En contraposición al escenario de aumento en la demanda, a nivel mundial existe una disminución en la eficiencia de descubrimiento de yacimientos de cobre, la cual ha descendido de 68% a 9% de eficiencia en 50 años (MinEx Consulting, 2017).

Desde este punto de vista, la exploración tiene el desafío estratégico y es un factor clave en ayudar a satisfacer la demanda futura, es decir, debe tener una participación proactiva en el negocio minero, ya que los costos de no realizar exploración pueden ser mayores, como pérdida de poder de mercado y la no sustentabilidad del negocio en el mediano y largo plazo.

Con respecto a la eficiencia del proceso de exploración (porcentaje de descubrimientos que se convierten en minas) la creciente demanda proyectada para el cobre desafía realizar una búsqueda y hallazgos exitosos. Sin embargo, la exploración tiene asociado largos periodos de inversión sin retorno sumado a un alto nivel de incertidumbre. En este sentido, el segundo desafío de la exploración minera actual es aumentar su eficiencia para compensar la disminución de recurso mineral disponible.

Para Antofagasta Minerals S.A (AMSA) y de acuerdo con su estrategia actual, la exploración es un factor clave para el crecimiento sostenible y de largo plazo del negocio cuprífero del Grupo. Actualmente se tiene intenso trabajo en desarrollar proyectos de exploración en sus diferentes etapas: tempranas, intermedias y avanzadas tanto a nivel nacional e internacional. La exploración se lleva a cabo con equipos internos y mediante asociaciones junto a terceros, de esta manera tener una cartera de opciones lo más amplia posible.

El modelo comercial de exploración internacional del grupo minero incluye la asociación con operadores locales de gran experiencia. Esto asegura que la inversión se realice de manera eficiente en los proyectos, lo que minimiza los gastos en la administración y permite disminuir riesgos de la actividad.

2 DEFINICIÓN Y JUSTIFICACIÓN DEL TEMA

El desarrollo de energías limpias, autos eléctricos y generación renovable hacen prever buenos fundamentos para una demanda con un crecimiento sostenible en el futuro para el cobre, impulsado entre otras cosas por el aumento del uso de la electricidad como fuente de energía secundaria, en reemplazo de los combustibles derivados del petróleo: "...para fabricar los autos y vehículos eléctricos, que en promedio consumen 4 a 5 veces más cobre que los a gasolina o diésel, así como para las nuevas facilidades y líneas eléctricas que suministran y transportan grandes volúmenes de energía requerida en las fábricas y hogares, así como para las piezas y partes de los parques fotovoltaicos y eólicos, que producirán la energía requerida para un mundo con menos combustibles fósiles"[1]

La proyección de la oferta de cobre en los próximos años estima una importante disminución producto del agotamiento del recurso de las actuales operaciones provocando un importante déficit considerando la proyección de demanda. A continuación, se presenta un gráfico con las proyecciones de oferta y demanda por cobre al 2035.

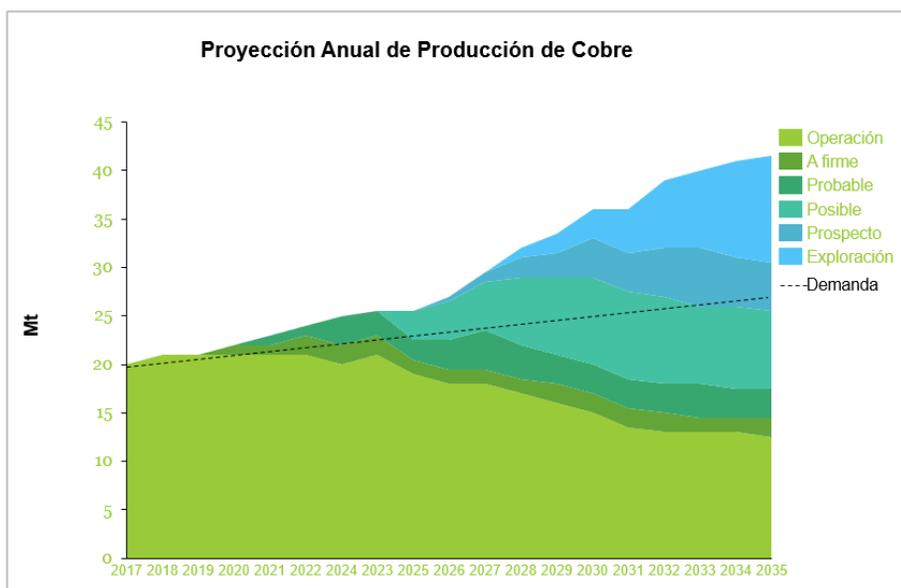


Ilustración 1: Oferta y Demanda de Cobre
Fuente: Mackenzie 2017.

De acuerdo con Wood Mackenzie 2017, hacia fines de esta década habrá una necesidad de cobre refinado que debe ser satisfecha por proyectos greenfield del orden de 4.6Mt. Esto significa pueden entrar en operación todos los años proyectos nuevos del orden de 700Kt.

Aun cuando las inversiones en exploración han sido significativas en las últimas décadas, y se han producido algunos hallazgos, no se han traducido en minas económicamente explotables relevantes para la industria (Fréaut, 2020). Al mismo tiempo, la tónica de los proyectos mineros cada vez tiene mayor demora en sus desarrollos, un importante factor ha sido la pandemia y restricciones medioambientales y comunitarios que hacen cada vez más difícil concretar proyectos en minería.

Adicionalmente, el entorno regulatorio cada vez más incierto del sector minero añade otro factor adicional al desarrollo de proyectos que es necesario afrontar desde un inicio con una perspectiva de largo plazo desde las etapas tempranas, previniendo requerimientos de la autoridad como monitoreos de carácter ambiental, arqueológico que puedan retrasar el desarrollo de los proyectos desde la etapa de exploración.

Lo anterior, se puede observar en el siguiente gráfico donde la tendencia es la demora en el desarrollo de los proyectos. Donde, para los años posteriores al año 2023 no se tienen proyectos a firmes, sino más bien se encuentran en calidad de posibles, probables o prospectos.

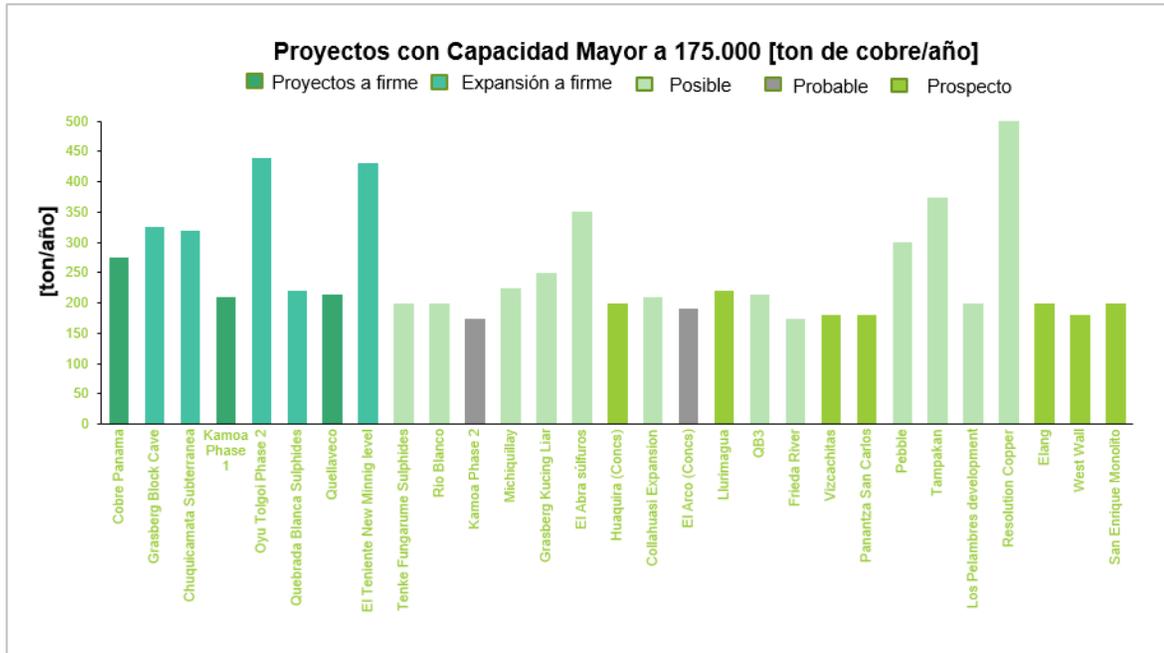


Ilustración 2: Proyectos de Cobre con capacidad anual mayor a 175 ktons.
Fuente: Mackenzie, 2020

Por lo tanto, los desafíos que se tiene actualmente se pueden resumir en los siguientes:

- Satisfacer estos recursos adicionales por cobre,
- focalizar la búsqueda para aumentar la eficiencia de conversión de hallazgos de depósitos a minas económicamente viables de explotar
- herramientas podemos implementar tanto estratégica como operativo a nivel de industria.

A continuación, se presenta un gráfico donde se muestra que la tasa de conversión por periodo es más baja y lenta en la actualidad que en periodos anteriores, esto sustenta la necesidad de mejorar los procesos asociados a la exploración y que sus descubrimientos puedan ser desarrollados considerando todos los aspectos de manera integral desde etapas tempranas.

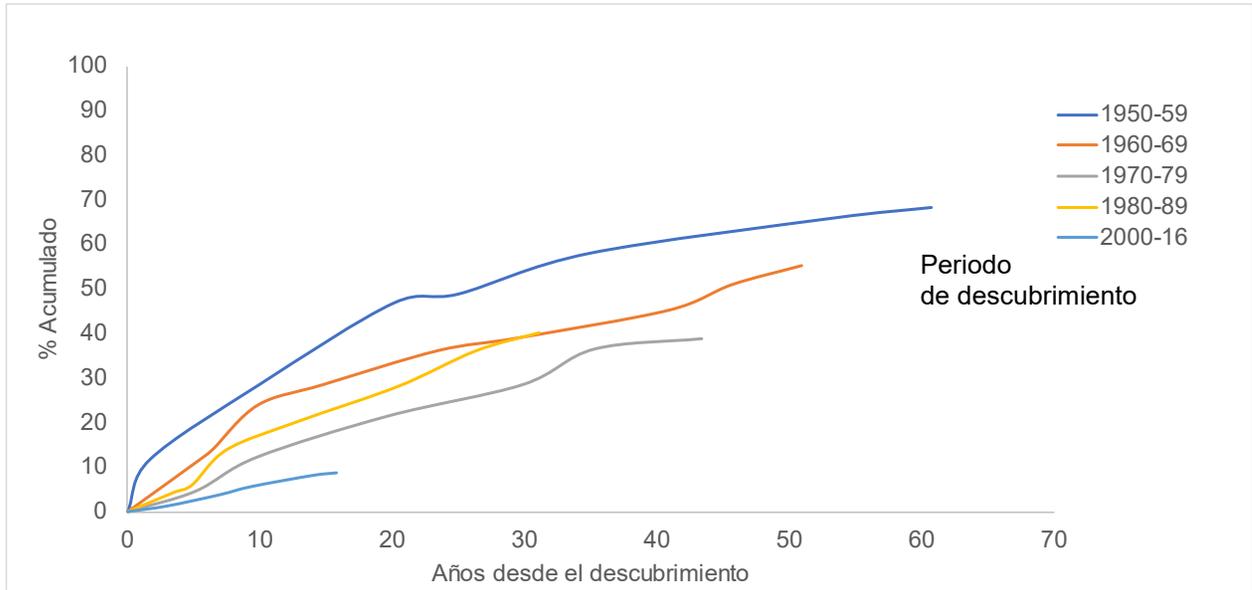


Ilustración 3: Tasa de conversión hallazgos en minas.
Fuente: MinEx Consulting, 2017

Se tiene una disminución de la tasa de descubrimiento en los años recientes en comparación de otras épocas en todos los metales base (Cobre, Zinc, Plomo, Niquel), a continuación, se muestra un gráfico donde se muestra esta tendencia. En particular, se puede observar una disminución (89%) en la última década en los descubrimientos en cobre.

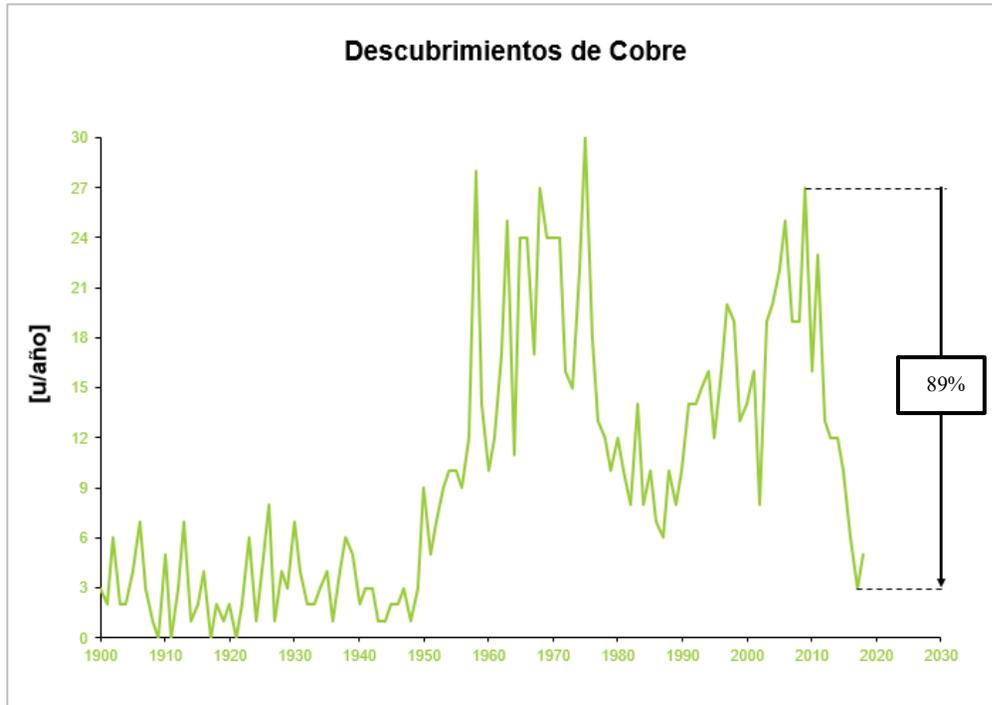


Ilustración 3: Tasa de descubrimientos metales base.
Fuente: MinEx Consulting, 2020

El negocio minero es una actividad económica, que se dedica a la venta de productos primarios de elementos metálicos y no metálicos. Se caracteriza por largos periodos de desarrollo e intensas inversiones de capitales (miles de millones de dólares), antes de la puesta en marcha; restringido además de una ubicación no flexible y específico, como es la ubicación de un depósito.

Es una industria compleja y de carácter cíclico, donde las barreras de entrada y de salida son altas; se tiende a las economías de escalas (gigantismo); variabilidad de muchos factores, calidad y cantidad del recurso minero que disminuye en el tiempo, generando importantes desafíos en la optimización de los procesos extractivos para mantener su rentabilidad (Ramirez, 2018).

En la cadena de valor del negocio minero, el incremento de los recursos geológicos donde el objetivo es mantener o aumentar la capacidad productiva es la primera etapa donde se inicia el proceso. Esta etapa se realiza a través de la exploración minera en sus diferentes niveles, las cuáles se describen a continuación (Fréaut, 2020).



Ilustración 4: Etapas de Exploración.
Fuente: Fréraud 2020

Dependiendo donde se explore, se tienen los siguientes tipos:

- **Greenfield:** Corresponde a un proyecto iniciado desde cero, generalmente en lugares sin antecedentes exploratorios previos.
- **Brownfield:** comprende a aquellas iniciativas de exploración que se realizan en el mismo distrito de una mina en explotación. Aprovechando la infraestructura ya existente.

En cuanto a la etapa de avance en la exploración se dividen en:

- **Básica:** Se caracteriza por la recolección de información, estudios fotogeológicos y de imágenes satelitales; elección de la región a explorar, reconocimiento terrestre con mapeos en general a escala: 1:10000, geofísica orientativa y geoquímica. En donde se detecta zonas anómalas de las cuales se selecciona los blancos de exploración (Ramirez, 2018).
- **Seguimiento:** Fase en la cual los blancos de exploración son testeados, en la búsqueda de un hallazgo de mineralización; a través de mapeos de detalle, geofísicas y sondajes orientados.
- **Exploración Avanzada:** Etapa enfocada en el delineamiento del yacimiento y la estimación de los recursos. Para lo cual es necesario aumentar la densidad de sondajes, mapeos, geoquímica y categorización de los recursos; corresponde a la etapa de perfil de un proyecto minero. En esta etapa los costos en la exploración se relacionan directamente a la cantidad de sondajes propuesta para llegar a una categorización adecuada de recursos en conjunto con pruebas metalúrgicas.

A continuación se presenta un resumen gráfico de la cadena de valor del negocio minero:

El proceso de exploración



Ilustración 5: Cadena de Valor Negocio Minero.
Fuente: Fréaut 2020

De la figura anterior podemos observar el carácter secuencial de las diferentes etapas de la exploración donde cada etapa agrega valor a la anterior. Desde el punto de vista de la información que se recaba en estas etapas, esta contribuye a disminuir la incertidumbre propia lo cual debe ser ponderada adecuadamente en cada etapa hasta llegar al financiamiento de un proyecto.

La continuidad operacional y sustentabilidad del negocio en el largo plazo se relaciona a la estrategia de crecimiento que tengan las compañías mineras, siendo la exploración la forma más frecuentemente utilizada (White, 1997) y donde es el primer paso en la cadena de valor del negocio minero.

El marco estratégico de donde explorar lo generan las empresas mineras, restringiéndose a los países donde se encuentran las mayores concentraciones del mineral de interés y a su situación política y económica. En particular Chile, tiene las mayores reservas de cobre del mundo y el grupo minero tiene una importante presencia en la segunda región por lo que es una zona interesante de seguir desarrollando exploración.

Las empresas mineras negocian y cotizan en las principales bolsas de metales (Bolsa de Metales de Londres, Nueva York y Shanghai) principalmente los cuatro grandes

commodities; cobre, oro, hierro y aluminio. También es usual que empresas juniors de exploración coticen en las bolsas de Vancouver y Sidney en busca de financiamiento.

La búsqueda de ventajas competitivas por las empresas, la etapa de exploraciones es fundamental, pues el éxito o fracaso de una empresa minera, se relaciona directamente con su capacidad de supervivencia en un mundo dinámico y globalizado y cada vez más sensible a temas de sustentabilidad (Ramirez, 2018).

Durante el 2020, la industria minera experimenta un gran desafío producto de la pandemia, las empresas en general recortaron los presupuestos de exploración global; en no ferrosos disminuye un 11% a un estimado de \$8,7 billones de dólares, comparado con los \$9,8 billones de dólares el año 2019 (S&P Global Market, 2021).

En opinión de la misma consultora la tendencia para este año es que continúe un escenario de alta incertidumbre y que la exploración recupere los niveles de presupuesto inducidas por la pandemia, si los precios de los metales se mantienen elevados.

A continuación, se presenta la evolución de los presupuestos en exploración global y como varía respecto al precio de los metales.



Ilustración 6: Presupuesto Global No Ferrosos: Fuente: S&P Global Market Intelligence, 2021

En la figura anterior, podemos observar que en épocas de bajos precios hay una disminución en los presupuestos globales de exploración. Ante escenarios de incertidumbre o efectos de mercados negativos, la actividad se ve afectada debido al alto riesgo que conlleva la actividad y baja probabilidad de hallazgos. Por esta razón, las empresas mineras focalizan su actividad en el ámbito distrital entorno a sus operaciones (exploración brownfield), pero con una baja probabilidad de encontrar un nuevo depósito de alta calidad.

Estas disminuciones en los presupuestos vienen aparejados recortes de los equipos de trabajo y una pérdida del know how geológicos que es difícil de recuperar.

La elasticidad precio de la demanda del cobre es alta, por tanto, en países como Chile; en el cual los costos de producción aún no son prohibitivos, conviene aumentar su producción. Más aun observando la fuerte tendencia al aumento de la electro-movilidad; la cual se espera genere un importante aumento de la demanda de este metal en los próximos años.

Esto significa simplemente que la minería continúe en el futuro, siendo una de las principales industrias de este país y donde la exploración tiene un rol clave, sin embargo es vital estudiar cual es el mejor modelo de negocios; reconociéndose que la industria del cobre es cíclica, teniendo periodos de altos precios y periodos de bajos precios (Ramirez, 2018).

Adicionalmente, los recortes en los presupuestos también se ven afectadas por bajo atractivo en los retornos de la inversión en la exploración debido a la caída de la tasa de descubrimientos, baja calidad y aumentos de los costos de descubrimientos (Bartrop, 2010; Groves y Trench, 2014; Wood, 2016).

Otro aspecto respecto a los desafíos que tiene la exploración greenfield, se refiere a que no solo debe estar dirigida a aumentar los recursos geológicos, sino que mejorar los ya existentes, así mejores depósitos reemplazan a minas en operación y proyectos de peor calidad teniendo los accionistas una ventaja competitiva más a largo plazo (John P. Sykes & Allan Trench, 2017). Por lo tanto, el factor clave que impulsa a desarrollar la exploración greenfield es el descubrimiento de depósitos de mejor calidad.

La exploración greenfield es más desafiante, ya que está dirigida en lugares fuera de un depósito conocido lo que implica un nivel de complejidad y desafío mayor.

2.1 Proceso de exploración

La exploración utiliza la geología y las geociencias relacionadas para descubrir anomalías relacionado con alguna mineralización, en donde se hacen observaciones de campo por geólogos, que recopilan información, para luego formular y probar una hipótesis, generalmente sobre el tipo de depósito representado por la anomalía y la posible vectorización de la mineralización.

Se espera que una exploración sistemática a grandes profundidades lleve al descubrimiento de recursos de metales explotables económicamente, debido que sólo una

pequeña porción de esta corteza superficial ha sido mayormente evaluada. Yacimientos más conocidos han sido descubiertos a menos de 100-200 metros de profundidad, en su mayoría completa o parcialmente no acotados.

El continuo mejoramiento del entendimiento de la formación de los depósitos de los minerales y los avances tecnológicos seguramente conducirá a nuevos descubrimientos a gran profundidad, principal desafío hoy en día.

El objetivo de la exploración no solo debe enfocarse en el descubrimiento de un depósito y elevar el nivel de inventario de una compañía, sino que también debe estar aparejado en que sea posible de extraer económicamente, que las variables mineras, medioambientales, comunitarios sean considerados desde el inicio en el proceso de exploración.

El descubrimiento tiene varios factores, entre ellos la capacidad para hacer preguntas dirigidas al logro de tres objetivos:

- detección de una anomalía geológica, geoquímica y/o geofísica, relacionado con un recurso potencial (que puede ser o no el producto objetivo o tipo de depósito);
- identificación y cuantificación de un posible recurso económico corroborando un blanco en una anomalía
- conversión de un recurso mineral identificado y cuantificar la reserva de mineral que proporciona la base para desarrollar una mina.

La exploración moderna ahora se lleva a cabo principalmente para un recurso objetivo específico y tipo de yacimiento, utilizando el ambiente tectónico y geológico de cada tipo como base para iniciar una búsqueda. A través del tiempo, se han desarrollados modelos geológicos conceptuales basados en depósitos actuales que son utilizados como guía para nuevos descubrimientos, teniendo presente que no hay dos depósitos exactamente iguales.

A continuación, se presenta las principales herramientas utilizadas en la exploración a través del tiempo:

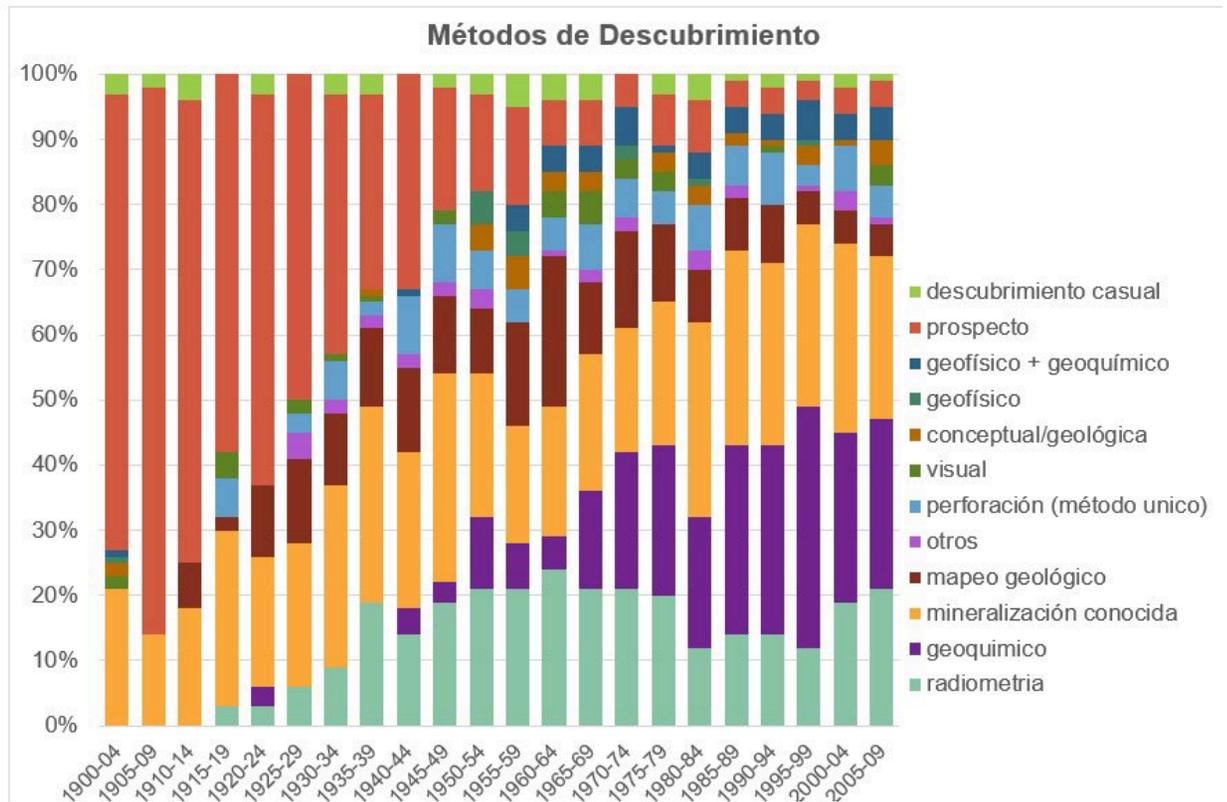


Ilustración 7: Herramientas primarias usados en descubrimientos en metales base. Fuente: Minex Consulting, 2020.

Como se puede apreciar en la figura anterior, a principios del siglo pasado la prospección de superficie representaba alrededor del 70 % de descubrimientos (Minex Consulting, 2020), muchos de los cuales no estaban cerca de yacimientos conocidos (concepto greenfield). Después de la Segunda Guerra Mundial, la geofísica, tecnología que se había desarrollado con fines relacionados con la guerra, junto a técnicas geoquímicas, desempeñaron un papel cada vez más importante en la exploración y descubrimientos de nuevos yacimientos. A continuación, se describe brevemente algunas herramientas utilizadas en el proceso de exploración:

- **Mapeo Geológico:** El mapeo geológico a varias escalas y la observación geológica son parte integral de exploración y uno de los elementos principales, el cual proporciona un medio para identificar depósitos minerales que afloran en superficie y en la creación de los primeros análisis conceptuales.

De particular uso para los geólogos de exploración son los mapas metalogénicos, estos mapas proporcionan información valiosa, relacionada con la mineralización que utilizan junto con modelos de yacimientos para evaluar cuán prospectiva puede ser un área para diferentes tipos de depósitos.

Los mapas regionales a escalas de 1:100.000 hasta 1:25.000 proporcionan un marco geológico para la planificación y ejecución de programas de exploración. Actualmente, se utilizan imágenes satelitales de alta resolución y modelos de elevación digital que apoyan fuertemente esta primera etapa.

- Geoquímica de exploración. Se emplean varios tipos de estudios geoquímicos considerando muestreos y análisis dependiendo del tipo de objetivo de depósito de mineral y su entorno geológico, utilizando el medio más apropiado: por ejemplo, suelo, roca, vegetación y agua. Es cada vez más frecuente que los métodos geoquímicos son utilizados para uso donde los depósitos de minerales pueden estar cubiertos.

Muestreo de sedimentos ampliamente espaciados (una muestra cada varios km²) se llevan a cabo primero para identificar áreas de valores anómalos de metales, con las áreas anómalas que se van reduciendo progresivamente en tamaño mediante un muestreo cada vez más selectivo (pasando de un espaciamiento de unos pocos km a uno de cientos de metros).

Las áreas anómalas son estudiadas en mayor detalle usando una combinación de muestreo de suelo, roca y análisis químico, mediante la recolección de muestras en una cuadrícula regular.

Los principales avances en química analítica en las últimas décadas se han aplicado a la exploración de minerales, con muchos laboratorios comerciales de alta calidad ahora disponible proporcionan análisis de una gama de tipos de muestras con alta exactitud y precisión, límites de detección para oligoelementos a nivel de ppb, y tiempos de respuesta rápidos.

Otras tecnologías, ahora disponibles en la geoquímica de exploración, incluyen aquellas identificados por numerosos acrónimos, que incluyen entre otros: ICP-MS, LA-ICP-MS, ICP-AES, μ LRS, TIMS, IDTIMS, SHRIMP, SIMS, GS y PIXE (Anexo B).

Para el trabajo de terreno, los desarrollos tecnológicos más significativos han sido los instrumentos analíticos portátiles herramientas que permiten el análisis en tiempo real de suelos y rocas para la concentración de un rango de elementos mayores y menores usando espectroscopía de fluorescencia de rayos X (XRF), e identificación mineralógica utilizando métodos infrarrojos de onda corta (SWIR).

- Geofísica: Corresponde a una metodología indirecta de prospección que utiliza ondas electromagnéticas para detectar anomalías. Se pueden utilizar técnicas geofísicas para medir, gravedad, la intensidad magnética, la radiactividad y varios tipos de respuestas de electricidad que estos últimos años se han hecho más sofisticados y con mayor capacidad de penetración y resolución la cual permite mejorar la exploración en profundidad.

Los levantamientos son terrestres o aéreos y en la exploración por metales, la polarización inducida (IP), magnetometría, y mediciones electromagnéticas (EM) son las más utilizadas.

La profundidad a la que se penetra depende del tipo de técnica geofísica utilizada y el tipo de roca que se está estudiando. Levantamientos sísmicos, gravimétricos y magnéticos de superficie registra datos a profundidades de muchos kilómetros, mientras que los métodos eléctricos son restringidos en su capacidad de penetración, generalmente a menos de 500 metros.

Para penetración profunda (mayores a 1km), los métodos IP se han desarrollado recientemente y la utilidad de EM e IP se puede extender utilizando pozos ya perforados.

Una de las técnicas utilizadas en AMSA es la configuración polo-dipolo, con dipolos aproximadamente cada 200 metros, las cuales tienen la capacidad de alcanzar una profundidad de al menos 600 m en el registro de datos IP, con resultados variables aún. En el anexo 13.3 se puede observar algunas técnicas de geofísico más tradicionales.

- **Perforación:** Es la principal técnica de descubrimiento y evaluación utilizada en exploración (ilustración 9) y también durante las diversas etapas de desarrollo de la mina e investigación de cierre, simplemente porque proporciona factible y eficiente para recolectar un gran número de muestras y define la tercera dimensión en un prospecto. Los principales métodos son aire reverso y diamantina que en los últimos años han alcanzado mejoras en cuanto a la profundización. En el caso de aire reverso se han alcanzado profundizaciones de 800 metros y en diamantina más de 2.000 metros en exploración de metales.

Después de un descubrimiento, a medida que un depósito mineral descubierto avanza a través de las etapas de un estudio minero, el propósito de la perforación se transforma de delinear un recurso inicial definiendo los recursos mediante perforación de relleno (ilustración 9).



Ilustración 8: Grilla perforación de relleno (infill) exploración greenfield: Fuente elaboración propia

La perforación también se completa en este momento para recolectar muestras de minerales roca para pruebas metalúrgicas, determinar las propiedades geotécnicas y comportamiento mecánico esperado del mineral y de la roca estéril (no mineral), durante y después del proceso de extracción.

La perforación también se utiliza debajo de áreas de los sitios de infraestructura propuestos para corroborar la ausencia de mineral en el área del sitio a una profundidad requerida, proceso llamado condenación.

Dependiendo de su propósito, se utilizan diferentes métodos de perforación. Circulación por aire reverso y perforación diamantina (para recolectar muestras de mineralización) son los métodos más utilizados en la exploración de minerales.

Aplicación modificada de la industria del petróleo y el gas donde el método de perforación de tubos de acero enrollados en una bobina, están siendo utilizadas en exploración minera, con un peso de hasta 80 toneladas y puede que reduzca significativamente los costos asociados, no se tiene registro de una aplicación en Chile.

La recuperación de muestras de alta calidad es esencial para estimar un recurso mineral y depende del tipo de roca que se perfora y la pericia y experiencia del perforador.

Si la recuperación es menor a 95 % hay una confiabilidad muy baja, ya que parte del mineral de interés puede haberse perdido.

El producto de la perforación diamantina (testigo) (ilustración 10) es recolectado y permite orientar espacialmente el recurso. Esta información espacial es fundamental para geología, ya que entrega una correlación y determinación precisa de orientaciones estructurales y mineralización del recurso.



**Ilustración 9: Testigos perforación diamantina.
Fuente: Elaboración propia**

Otras disciplinas como Geotecnia, Geoestadística y Metalurgia también a través de los testigos de la perforación diamantina añaden un valor considerable a evaluación de recursos y sus propiedades como recuperación, comportamiento geomecánico, etc. que en conjunto van añadiendo información necesaria para el desarrollo de un proyecto minero.

2.2 Cambio regulatorio código minería

En este punto se analiza el entorno regulatorio de la exploración que recientemente ha realizado un cambio de normativa al código de minería importante y que afecta directamente la actividad de exploración minería.

Con fecha 4 de febrero de 2022, se publicó la Ley N° 21.420 (Anexo A), que reduce o elimina las exenciones tributarias, lo que genera un dinamismo y obliga a las empresas que tienen grandes hectáreas ya sea como concesión de exploración o explotación a priorizar y/o desechar hectáreas, ya que el costo involucrado de mantenerlas es significativo.

La misma establece formas de financiamiento que permitirán sustentar en el tiempo la entrega de la nueva Pensión Garantizada Universal (PGU), entre las cuales se incluyen una serie de modificaciones al Código de Minería.

➤ Concesión Minera de Exploración

- Se aumenta su duración de 2 a 4 años, eliminando posibilidad de prórroga.
- Se prohíbe al titular de una concesión de exploración extinta adquirir, por sí o por interpósita persona, una nueva concesión de exploración que comprenda la superficie de dicha concesión extinta.
- Se concede acción pública de denuncia en contra la adquisición de las nuevas concesiones de exploración sujetas a la prohibición anteriormente señalada.

➤ Concesión Minera de Explotación

- Se aumenta el plazo para que el manifestante solicite la mensura de su pertenencia de 20 a 30 días, los que se cuentan entre los 90 y 120 días desde la fecha de la presentación de la manifestación al tribunal.
- Se eliminan la operación de mensura en terreno y la colocación de hitos.
- Se reduce el plazo de presentación del acta y plano de mensura de 15 a 10 meses.

➤ Patente Anual

- La patente de la concesión de exploración aumenta de 1/50 a 3/50 UTM por hectárea.
- Se elimina la distinción entre patentes metálicas y no metálicas.
- La patente de la concesión de explotación que no demuestre labores mineras aumentará progresivamente desde 4/10 UTM por hectárea para los primeros 5 años de vigencia, hasta 12 UTM por hectárea a partir del año 31.
- La patente de la concesión de explotación que demuestre labores mineras o se encuentre bajo evaluación ambiental o cuente con una RCA será de 3/10 UTM por hectárea.

- El Servicio Nacional de Geología y Minería (“Servicio”) publicará una nómina de concesiones beneficiadas con patentes rebajadas.

➤ **Información Geología Básica**

- Al extinguirse o transcurrir su duración -en el caso de concesiones de exploración- o cada 2 años -en el caso de pertenencias-, su titular deberá remitir al Servicio toda la información geológica que hubiere obtenido de los trabajos de exploración realizados en ellas.
- Se aplicarán multas de hasta 100 UTM a quienes no entreguen la información obtenida.

➤ **Elementos Técnicos**

- Se introduce el nuevo datum SIRGAS respecto de las coordenadas geográficas o U.T.M.
- Se inicia un proceso de unificación del sistema de coordenadas al datum SIRGAS respecto de las concesiones mineras vigentes al entrar en vigencia las modificaciones al Código de Minería.

➤ **Acciones Posesorias**

- El concesionario debe acreditar ser titular de una servidumbre minera u otro derecho real que grave el predio superficial que comprenda su concesión para ejercerlas.

➤ **Vigencia**

- Las disposiciones de esta ley entrarán en vigencia a partir del primer día del mes subsiguiente a la fecha de su publicación en el Diario Oficial.
- Las modificaciones introducidas al Código de Minería entrarán en vigencia transcurrido 1 año desde su publicación en el Diario Oficial (4 de febrero de 2023).
- Dentro de los 6 meses siguientes a la entrada en vigencia de las modificaciones al Código de Minería deberá modificarse el Reglamento del Código de Minería y los demás reglamentos o normas administrativas necesarias.
- Las concesiones de exploración inscritas en el Conservador de Minas correspondiente, que se encontraren vigentes y no hubieren sido prorrogadas a la fecha de entrada en vigencia de esta ley, se entenderán constituidas por un plazo de 4 años desde la fecha de su constitución (4 de agosto del 2023).
- Los titulares de concesiones actualmente vigentes deberán entregar la información geológica básica que posean transcurridos 2 años desde la entrada en vigencia de la presente ley.

- Para el cómputo de los plazos de la patente progresiva de pertenencias no trabajadas, aquellas cuya obligación de amparo es anterior a la entrada en vigencia de las modificaciones al Código de Minería se entenderá que cumplen su primer año de vigencia el último día del mes de febrero siguiente a la fecha de la entrada en vigencia de esta ley.

Algunos impactos que se prevé son los siguientes:

- Aumenta gestión sobre portafolios de propiedad minera
- Mayor dinamismo sobre áreas congeladas
- Aumenta gasto de exploración
- Aumentan costos mantención
- Disminuye especulación
- Se generan áreas libres
- Ingresan nuevos actores al mercado
- Aumenta información geológica pública
- Riesgo en cambio Datum Sirgas

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo General

Como objetivo general se pretende en el desarrollo de esta tesis incorporar una herramienta metodológica adecuada al propósito en AMSA, que permita gestionar la asignación de recursos en la búsqueda de nuevos depósitos de cobre, incorporando análisis de riesgo en la evaluación económica de potenciales blancos u oportunidades con terceros, incluyendo elementos probabilísticos.

La idea central es mejorar la estrategia actual de exploración greenfield de AMSA Sudamérica, estandarizando criterios que pueden mejorar el índice de conversión de hallazgos a minas económicamente explotables, uno de los déficit y desafíos que tiene la exploración a nivel mundial, al mismo tiempo mejorar la eficiencia en la asignación de recursos en el desarrollo de la estrategia de exploración.

Con lo anterior, el mejoramiento de la estrategia puede ayudar a priorizar y focalizar los trabajos y medir los resultados de las actividades de exploración greenfield, optimizando los presupuestos asignados y sus seguimientos. A modo referencia el presupuesto asignado para américa es del orden de 60 millones de dólares anuales que requieren ser administrados de la mejor manera posible.

Actualmente, recibe ofrecimientos de terceros para desarrollar proyectos mineros para compra, venta o asociaciones y no se cuenta con una herramienta simple estándar y rápida que nos permita priorizarlos o compararlos con la cartera de proyectos actual de manera de rankearlos en función de la calidad de información y potencial económico.

Esta metodología incorpora a los inputs geológicos, aspectos mineros y geometalúrgicos en etapas muy tempranas que nos permitan mejorar la asignación de recursos en etapas posteriores como exploración avanzada o estudios de factibilidad.

Contar con rangos de parámetros técnicos económicos (profundidad, distancia, ley, tipo de mineral, extracción, posibilidades de procesamiento, medio ambientales, comunitarios, etc.) en la segunda región puede ayudar a evaluar de mejor manera el potencial económico de un blanco u oportunidad ofrecida.

A través de este trabajo se intenta mejorar la estrategia de exploración greenfield ayudando a identificar el potencial económico en etapas tempranas permitiendo orientar de mejor manera las campañas de exploración avanzada, aumentando la probabilidad que nuevos descubrimientos sean explotables económicamente en Antofagasta Minerals S.A (AMSA) para la segunda región.

3.2 Objetivos Específicos

- Encontrar parámetros técnicos económicos en zonas de interés exploratorio para AMSA, como rangos: distancia, toneladas, ley, profundidad por tipo de mineral que sean económicamente viables explotar que puedan ser desarrollados ya sea bajo un esquema independiente y/o utilizando instalaciones ya existentes en la segunda región
- Evaluar tempranamente la potencialidad del negocio asociado a un proyecto greenfield y sus opciones de desarrollo futuro
- Desarrollar una herramienta de priorización y recomendación de seguimientos a etapas más avanzadas de campañas de exploración greenfield con el objetivo de mejorar las tasas de conversión de hallazgos en minas económicamente explotables
- Desarrollar y proponer una mejora a estrategia actual de exploración greenfield en base a los parámetros encontrados, escenarios evaluados y otras condiciones que se requieren para desarrollar de mejor manera las actividades de exploración en AMSA.
- Medir gestión de exploración de sus proyectos en sus diferentes etapas, incorporando KPIs medibles y mejorar la asignación de recursos en sus diferentes proyectos
- Aumentar rapidez en la evaluación de proyectos de exploración y tener una cartera amplia y actualizada a través de una herramienta estandarizada.

4 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para lograr los objetivos específicos, la metodología con la que se aborda el problema consta de las siguientes actividades:

4.1 Análisis FODA estrategia de exploración greenfield actual AMSA

En un entorno cambiante y de alta incertidumbre, el establecer un ejercicio anual de esta herramienta se cree es un ejercicio que ayuda a reforzar o modificar la estrategia de exploración en función de los resultados o escenarios que se puedan presentar.

Como antecedentes preliminares, podemos mencionar que Antofagasta PLC es una empresa chilena con sedes en Santiago de Chile y en Londres, Reino Unido. Opera en los sectores de minería y ferrocarriles. Cotiza en la London Stock Exchange y posee 4 faenas operativas, estas son: Antucoya, Centinela, Zaldívar y Los Pelambres.

Su historia referida a fusiones, adquisiciones, ventas o joint venture, realizadas desde el año 2000, destaca la adquisición del 100% de Antucoya en el año 2005, la cual posteriormente vende el 30% de la participación a Marubeni, quedándose con el 70%. En el año 2015 Antofagasta adquirió el 50% de Zaldivar, adicionalmente posee participación de un 70% de mineral Centinela y el 100% de Twin Metals.

En la industria minera no existen muchos mecanismos para generar ventajas comparativas, las cuales se enfocan en la ubicación geográfica, características de los depósitos explotados, en los esfuerzos exploratorios, en la decisión de participar en joint ventures o adquisición de otras empresas.

La empresa ha definido como parte de la estrategia de exploración, focalizar su negocio en Cobre, y para obtener mejores resultados en la exploración, una vez observado el mercado; se requiere adaptar u organizar a la empresa para que consiga ventajas competitivas frente a sus competidores, reconociendo las fortalezas y debilidades propias y como resultado de aquello, generar un modelo de negocios sustentable en el tiempo.

La tendencia en la industria minera en las grandes compañías es a disminuir su concentración geográfica, promoviendo la internacionalización, ya que el impacto para aumentar la producción es mayor que invertir en los distritos ya existentes.

Este proceso debe ser dinámico y no estático, donde los temas corporativos, organizacionales, técnicos, sociales (internos y externos), políticos, normativos, ambientales y presupuestarios requieren estrategias ad hoc en un entorno cada vez más incierto o variable.

En AMSA, la exploración ha continuado realizando sus actividades a un nivel reducido en Chile y en otras partes de las Américas, ya que se ha adaptado a las restricciones requeridas bajo los nuevos protocolos COVID-19 que fueron introducidos a partir de la pandemia.

El grupo AMSA desarrolla proyectos de etapa temprana, intermedia y avanzada, gestionados por el grupo de Exploración Global con sede en Santiago. Los equipos internos llevan a cabo estos programas, manteniendo un equilibrio en la cartera de propiedades de exploración en Chile y Perú, así como una búsqueda de oportunidades para trabajar con terceros en el resto de América, con el objetivo de construir una cartera de alta calidad proyectos de cobre a largo plazo.

En cuanto a los gastos de exploración del grupo en 2020, incluidos los estudios de prefactibilidad, se redujo en un 23% a \$US 85 millones en comparación con 2019, luego de una reducción en el gasto provocado por el rápido debilitamiento del mercado del cobre en el primer semestre del año y restricciones a los viajes y otras actividades requerido bajo los nuevos protocolos COVID-19. La situación para el año recién pasado se mantuvo, pero existe una gran incertidumbre en el futuro dado el entorno normativo que regulará la actividad minera en los próximos años. Durante 2019, en sus diferentes programas se perforaron 40.000 metros de perforación, un 40% menos que en 2018.

El volumen de perforación se redujo en varios de los proyectos brownfield en el distrito de Minera Centinela, con el enfoque continuo de identificar nuevos objetivos de lixiviación de óxido de alta calidad. Como resultado de las restricciones de COVID-19, se llevaron a cabo evaluaciones de gabinete que en 2019, con el fin de generar nueva adquisición de oportunidades ya sea presentando solicitud de exploración o celebrando acuerdos con terceros.

Desde el punto de vista internacional, los esfuerzos de exploración continúan concentrada en los cinturones de cobre clave del Norte y América del Sur, con un fuerte enfoque en Perú y el oeste de América del Norte, que también fueron afectados por las restricciones de COVID-19.

El grupo de exploración debe poseer características flexibles tanto lo humano como organizacional que permita enfrentar entornos dinámicos cambiantes de todo tipo. Especialmente en las campañas greenfield donde es difícil mantener una continuidad operacional por los tiempos acotados de estas campañas y resultados inciertos. En este contexto es clave disponer de una logística adecuada, tanto en infraestructura como de recursos humanos calificado de apoyo.

Otro aspecto que destacar de la estrategia en los programas de exploración actual es la incorporación desde un inicio y con una mirada de largo plazo, pensando en el desarrollo de próximas etapas de un proyecto, profesionales ligados al medio ambiente y comunitarios de manera de crear las confianzas desde etapas muy tempranas. Lo anterior,

también puede ayudar a facilitar aspectos de permisología sobre todo en la recolección de data requerida, ejemplo para obtener una resolución de calificación ambiental sin tantas demoras.

Se cree que la incorporación de nueva tecnología es clave para mejorar nuestros procesos en la exploración, sobre todo en lo que se refiere a inteligencia artificial, que todavía esta una etapa primaria, pero con un potencial enorme a igual que otras herramientas que se necesita impulsar con más fuerza para la generación de blancos de exploración.

Es importante destacar que el desarrollo de proveedores de clase mundial es aún bajo en el área de exploración, que puedan impulsar proyectos de innovación es muy relevante y se requiere trabajar en conjunto con otros actores relevantes, entre ellos también las universidades para que esta sea una práctica más habitual y constante en el tiempo. Actualmente, se desarrolla iniciativas aisladas y esporádicas con éxitos dispares y de poco impacto aún.

Algunas iniciativas que se ha implementado es la incorporación de sondajes direccionados en donde se producen ramificaciones a partir de sondajes primarios y así controlar desviaciones de estos para alcanzar intercepto definidos, en donde el principal objetivo es explorar a partir de una misma plataforma nuevas zonas de interés, ahorrando tiempo y costos de exploración. Si bien se ha utilizado, en etapas de exploración más avanzada, se cree que es una buena herramienta que puede ser implementada en etapas anteriores.

Otra iniciativa que se ha desarrollado, pero aislada es la incorporación de inteligencia artificial en los mapeos geotécnicos de sondajes de exploración, iniciativa que ayuda a mejorar la productividad y una estandarización del proceso de mapeo.

Finalmente, otros métodos usados que involucran tecnología y que se tiene incorporada es la geofísica a gran profundidad donde los resultados han sido una herramienta complementaria para definir blancos. Este método desde 1950 ha sido responsable como método principal de exploración del 10% de todos los descubrimientos realizados (KEGS, 2020). A continuación, se muestra tabla con Análisis FODA.

FODA

Fortalezas
<ul style="list-style-type: none">• Equipo consolidado, pequeño y multidisciplinario• Know How en Cobre• Presupuestos acordes a los trabajos necesarios• Continuidad operacional mediante contratos de largo plazo• Costos operacionales bajos• Experiencia en temas comunitarios y MA• Sistema de información integrada
Oportunidades
<ul style="list-style-type: none">• Buenas perspectivas en el precio del cobre a largo plazo• Propiedad minera consolidada y extensa• Sinergias con asociaciones con terceros• Interacción comunitaria moderada en zona norte en comparación otras zonas• Amplias zonas estudiadas bajo modelo conceptuales diferentes a los actuales• Prestigio del grupo de exploración e interés por desarrollar proyectos con AMSA• Avance rápido en el desarrollo tecnológico (inteligencia artificial, control a distancia)
Debilidades
<ul style="list-style-type: none">• Evaluaciones económicas no estandarizadas y poco flexibles para identificar en forma temprana de potenciales hallazgos u ofrecimientos• Bajo porcentaje de hallazgos que sean económicamente explotables• KPIs centrados más en el descubrimiento que en el desarrollo de minas explotables• Falta de continuidad en los programas de exploración generativos• Escasa flexibilidad en la disponibilidad de recursos físicos y humanos requeridos para iniciar las campañas de generativo• Resistencia a usar y dar continuidad a nuevas tecnologías a la búsqueda de nuevos yacimientos
Amenazas
<ul style="list-style-type: none">• Depósitos atractivos de mayor complejidad (mayor profundidad)• Incertidumbre política respecto a la actividad minera en general (nueva constitución, royalty, tributación, etc.)• Entrada de nuevos competidores• Sustitutos del cobre• Salida de capitales debido a la incertidumbre institucional en el país• Comunidades fuertemente empoderadas y reticencia en el desarrollo de la actividad minera• Escasez de mano de obra calificada

Tabla 1: Análisis FODA, Exploración Greenfield AMSA

4.2 Desarrollo herramienta evaluación y priorización proyectos propios u oportunidades con terceros

En este capítulo se desarrolla una herramienta para evaluar el potencial económico desde etapas tempranas de un proyecto de exploración, hasta una revisión preliminar de ofrecimientos de oportunidades que pudiera ser atractivo para AMSA avanzar en estudios posteriores. Con esta herramienta se pretende priorizar estos proyectos, realizar recomendaciones para toma decisiones respecto a la continuación o no con un proyecto y evaluar la gestión de exploración a través de Kpis.

En primer lugar, se construye un modelo de evaluación económica adecuada al propósito determinístico (exploración greenfield), que permita a través supuestos de variables como tamaño, ley, precio, distancia, profundidad, costos, inversión, etc., se pueda calcular fácil y rápidamente un VAN referencial de un proyecto de exploración. Al mismo tiempo, este modelo permite hallar rangos de estas variables donde se hace atractivo para AMSA desarrollar o continuar un proyecto.

Estos rangos, entrega información valiosa que puede ayudar a direccionar la búsqueda exploratoria de un depósito económicamente explotable y gestionar de mejor manera el presupuesto asignado, así como información que permite evaluar una estrategia definida.

En segundo término, en base a la ecuación de exploración (Aguilar, 2016) se incorpora los conceptos de probabilidad hallazgo (PH) y probabilidad éxito de exploración (PEE) que permite ponderar aspectos de la evidencia geológica respecto a la existencia de un depósito en calidad, cantidad y que la exploración a su vez tenga éxito considerando los riesgos para que un proyecto en etapa de exploración sea bancable.

Finalmente, para valorizar y priorizar (punto 8.3) la cartera de proyectos se incorpora un factor considerando la etapa de un proyecto que pueda estar en cualquier etapa del ciclo de un proyecto minero, ya sea propio o de un tercero se encuentra. Este factor se basa en la curva de agregación de un proyecto minero. La ecuación final queda de la siguiente manera:

$$(E)VAN = PH \times PEE \times f(etapa) \times VAN(PM)$$

A continuación, se detalla el desarrollo de cada uno de ellos.

9.2.1 Modelo Económico

En este punto, se desarrolla un modelo simple que nos permita encontrar rangos aproximados de tamaño, distancia, profundidad, ley que permiten establecer parámetros que identifiquen potencial económico en blancos u oportunidades para ciertas condiciones generales, lo que permite orientar y dar referencias u ordenes de magnitud que viabilizan un proyecto de exploración desde el punto de vista económico.

Otro objetivo es desarrollar un modelo adecuado al propósito y determinar de manera fácil, rápida un VAN potencial que pueda tener un proyecto bajo una herramienta metodológica estandarizada.

Los modelos económicos en general deben ser herramientas de trabajo fáciles de seguir para todos en vez de algo complejo, deben ser transparentes y auditables, consistente con el lineamiento del modelamiento de la compañía.

Otro aspecto importante que debe ser fácil el reconocimiento de un error antes de tomar cualquier decisión y tomarlo como una herramienta de trabajo que nos permite entregar información para desarrollar buenas estrategias y decisiones de inversión en cada una de las etapas de un proyecto de exploración.

El modelo debe adoptar las prácticas que se cree se ajusta mejor al propósito de la evaluación y dejarlas plasmadas en las consideraciones de la evaluación.

Como norma general un modelo económico no debe ser más complejo de lo necesario para toma de la próxima decisión.

La estructura de este modelo técnico-económico funciona a partir de parámetros físicos que se ingresan en términos reales y donde el VAN del negocio minero (Valor Actual Neto) debe obtenerse de los cuatro flujos de efectivo de producción/ingresos, opex, capex e impuestos calculados por separado y claramente identificados.

El modelo se realiza en formato Excel, donde cada hoja tiene un nombre que representa un caso específico de análisis y donde cada fila tiene el concepto y unidad asociada.

El modelamiento se realiza en bloques discretos con encabezados en negrita y una secuencia fácil de seguir para cualquier persona, en gran parte autónomo para información, completamente documentado y una fila final donde se muestre el resultado global, la idea evitar una lógica complicada y la búsqueda de datos hacia arriba y hacia abajo en la hoja de trabajo.

Cualquier persona que opere el modelo puede navegar rápidamente a su área de interés y trabajar con confianza en ese bloque, sin tener que pasar por cálculos no relacionados. Se tiene una hoja específica donde muestra una introducción y los protocolos de utilización que tiene el modelo.

9.2.2 Ecuación de exploración

La ecuación de exploración, “*Métrica y Valor de Exploración (Aguilar, 2016)*”, permite introducir los conceptos de probabilidad de hallazgo (PH) y probabilidad éxito (PEE) económico de exploración basados en el Teorema de Bayes, donde se establece los siguientes elementos:

$$(E)VAN = PH \times PEE \times VAN(PM) - C$$

(E) VAN: Esperanza de VAN del negocio

PH: Probabilidad de hallazgo

PEE: Probabilidad de éxito económico

VAN (PM): VAN potencial proyecto minero (dado por un modelo determinístico o probabilístico)

C: Capital de riesgo (Costo propiedad minera, exploración, ingeniería, etc.)

Esto se basa en los siguientes conceptos (Fréaut, 2020):

- La probabilidad total de hallazgo (PH) corresponde a la probabilidad de que un suceso ocurra en el futuro (descubrimiento), es decir que exista en los rangos de cantidad y calidad necesarios para su desarrollo económico. Se basa en el análisis de probabilidad de sucesos variables que ocurren de manera independiente. Como cada variable es independiente, la probabilidad total es la multiplicación de las probabilidades parciales de cada uno de los procesos críticos.

Estas variables son procesos geológicos identificados como críticos para la formación de yacimientos, lo cuales deben ocurrir todos.

- Fuente de metales (cámara magmática)
- Presencia de fluidos necesarios y suficientes
- Existencia de canales de circulación
- Trampa y acumulación de fluidos de minerales
- Preservación de estos de depósitos

La escala que se utiliza para la asignación de probabilidades de cada uno de estos procesos (5) se realiza en base a la presencia de evidencias geológicas concretas, se detallan a continuación:

Probabilidad (0-1)	Naturaleza del factor crítico
1	Factor crítico comprobadamente presente
0,9	Factor crítico reconocido y moderadamente dimensionado comprobadamente presente
0,8	Factor crítico reconocido, pero no dimensionado
0,7	Factor crítico con evidencia marginal positiva
0,6	Factor crítico no observado, pero se infiere presente
0,5	Sin información respecto del factor crítico
0,4	Factor crítico no observado, pero podría estar presente
0,3	Factor crítico probablemente ausente
0,2	Factor crítico ausente o de tamaño/calidad insuficiente
0,1	Factor crítico ausente, pero no totalmente probado
0	Factor crítico probadamente ausente

Tabla 2: Escala de probabilidades para métrica (Fréaut, 2020)

Procesos críticos para formación de un depósito mineral

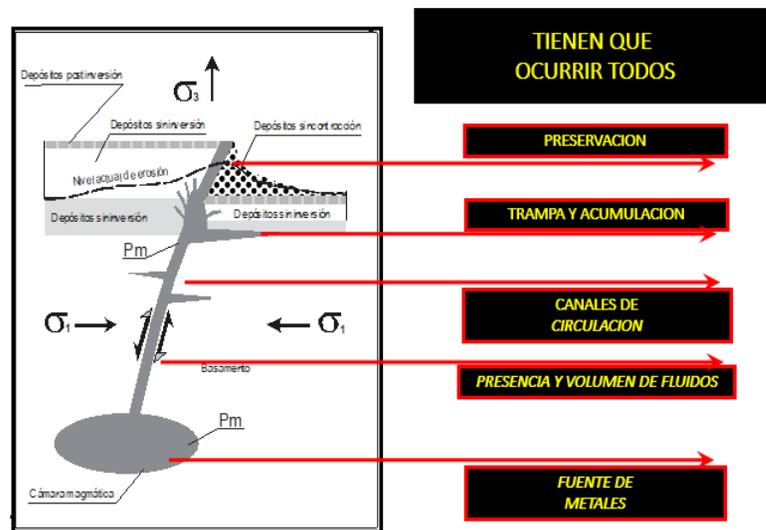


Ilustración 10: Procesos críticos para formación de un depósito de mineral (Fréaut, 2020)

Este primer elemento de la ecuación de exploración se utiliza para realizar un ranking de propiedades o prospectos que pudieran ser interés. Esto cobra especial relevancia ante posibles modificaciones a la ley minera actual, donde se prevé que se puedan liberar una gran cantidad de propiedades que deben ser evaluadas y que nos permita desistir o mantener propiedades mineras en el futuro.

- El segundo elemento, corresponde a la probabilidad de éxito económico (PEE) se fundamenta en el teorema de Bayes de la probabilidad condicional, es decir, que tuvo que ocurrir antes para que pueda ocurrir hoy.

Debido a que la exploración es un proceso secuencial, cada fase esta precedida por el éxito de la etapa anterior y se mide en base a la probabilidad de esta y su riesgo asociado.

La pregunta central que se debe responder es cuál es la probabilidad que un cuerpo mineralizado sea económicamente viable. La idea es que podamos responder en esta pregunta en fases tempranas de la exploración aportando información que agregue valor y que nos permita realizar un ranking de todas las alternativas u oportunidades en el porfolio que se maneje.

- Se apunta a medir en forma estándar un proyecto cada fase de exploración (básica, seguimiento y avanzada) calcular el valor creado, es decir a la diferencia entre la fase anterior y la actual. Para ello se definen seis etapas:



Ilustración 11: Etapas exploración para determinar probabilidad éxito económico

Donde la probabilidad de éxito económico (PEE) de un proyecto se basa también en un análisis bayesiano, para ello, si queremos calcular esta probabilidad en alguna de estas 6 etapas, se calcula multiplicando desde la ultima etapa (etapa 6) hasta la etapa donde se quiere analizar dicha probabilidad. Ejemplo, en la siguiente figura podemos observar el cálculo en cada etapa de un proyecto.



Ilustración 12: Probabilidad de proyecto en cada etapa proyecto

P[P]: Probabilidad éxito económico proyecto en cada etapa

p[B]: Probabilidad éxito económico bancabilidad

p[F]: Probabilidad éxito económico factibilidad

p[D]: Probabilidad éxito etapa delineamiento

p[S]: Probabilidad éxito económico scouting

p[T]: Probabilidad éxito económico definición blanco

p[G]: Probabilidad éxito económico definición prospecto

$$P[p] = p[F1] \times p[F2] \times p[F3] \times p[F4] \times p[F5] \times p[F6]$$

El valor creado en cada etapa de la exploración corresponde a la diferencia entre la esperanza de VAN final e inicial de cada etapa, ponderado por la probabilidad menos el costo de la etapa. Por otro lado, el valor destruido es el costo acumulado hasta el momento en que la probabilidad en cualquier etapa es cero o la diferencia es negativa (Frérault, 2020). Con esto se puede medir la gestión de exploración de una manera y si se genera valor al negocio en una determinada etapa. Elemento que puede ser incorporado como un kpi medible al grupo de exploración.

Esta ecuación de exploración permite evaluar la gestión de exploración y determinar si se agrega o no valor en alguna etapa de la exploración y el cálculo de probabilidades de hallazgo y de éxito que nos permite valorizar y priorizar un proyecto.

9.2.3 Factor etapa de un proyecto

Por último, se considera un elemento adicional, si se quiere valorizar un ofrecimiento, o un activo ponderando de acuerdo a la curva de agregación de valor de un proyecto minero. Esta ponderación incorpora los riesgos involucrados en cada fase de un proyecto y el retorno esperado del inversionista.

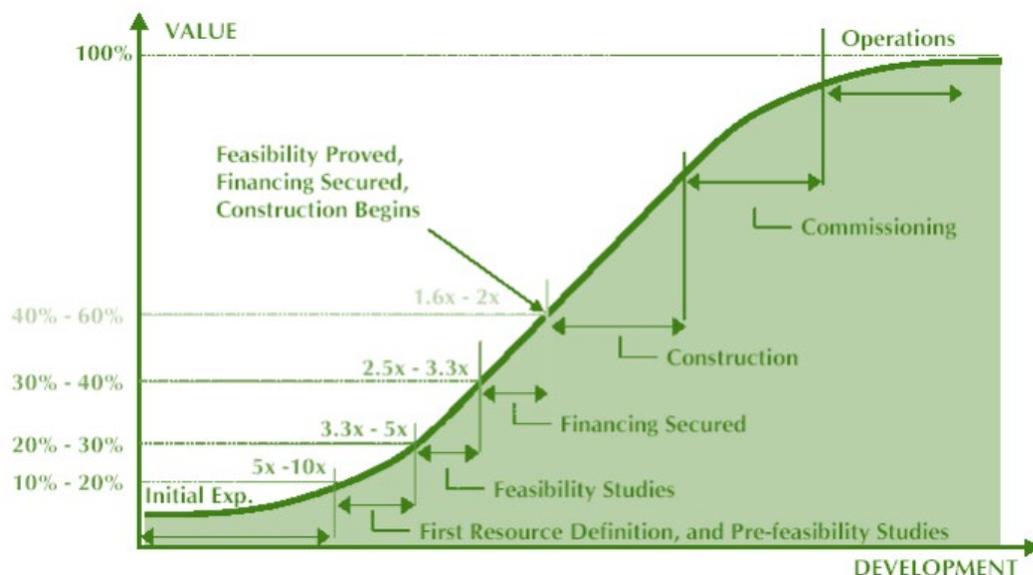


Ilustración 13: Curva de agregación de valor en un proyecto minero.
Fuente: (RFC Corporate Financing Ltda., Australia, 2001)

Se incorpora una ponderación de acuerdo con la siguiente tabla:

Factor etapa	Ponderación
Exploración Inicial	15%
Prefactibilidad	25%
Factibilidad	35%
Proyecto Financiado	50%
Proyecto en Construcción	70%
Proyecto en Producción	85%
Operación a régimen	100%

Tabla 3: ponderación factor de mercado: Fuente Fréraud, 2020

4.3 Elaboración de matriz de priorización de blancos u oportunidades

Es importante desarrollar y así complementar nuestra estrategia de exploración actual, considerando herramientas que nos permitan orientar campañas de seguimiento a blancos potenciales, mejorar la metodología actual de ranking de posibles proyectos greenfield y así evaluar el impacto potencial y su probabilidad de éxito.

Del punto 8.2 podemos considerar la siguiente ecuación para la valoración de un activo de acuerdo con un nivel de riesgo determinado.

$$(E)VAN = PH \times PEE \times f(etapa) \times VAN(Potencial)$$

Con lo anterior, se llega a una matriz de priorización de la cartera de proyectos en distintas etapas como blancos, proyectos de exploración avanzada u oportunidades ofrecidas del tipo:

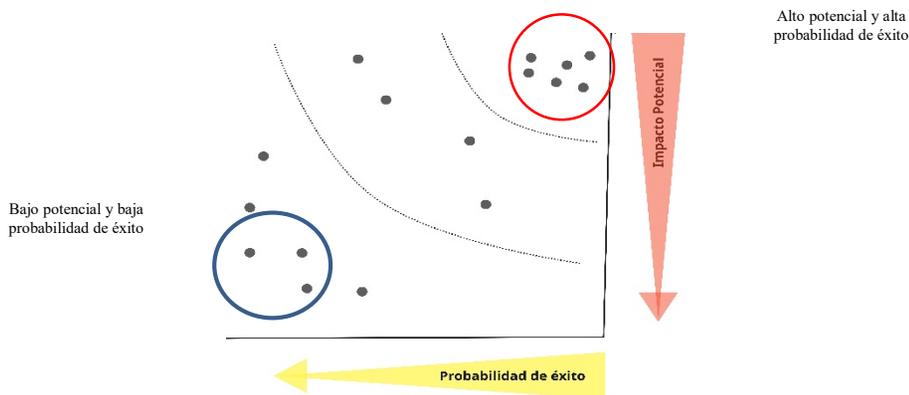


Ilustración 14: Matriz de priorización de activos. Elaboración propia

4.4 Parámetros económicamente atractivos en etapas de exploración

Luego de la construcción del modelo económico (capítulo 8. 2), se puede desarrollar un análisis que ayude en etapas tempranas de exploración evaluar el potencial económico de un prospecto, direccionar campañas de sondajes, encontrando rangos en algunos parámetros como cantidad, distancia y ley de un depósito que sea atractivo desarrollar para AMSA en la región de Antofagasta, donde se concentran las mayores propiedades mineras actualmente.

Estos análisis preliminares orientados a determinar bajo qué condiciones, escenario o caso un proyecto tiene viabilidad técnica-económica son útiles y que el equipo de exploración lo maneje y se involucren desde un inicio en un ambiente de trabajo multidisciplinario es importante.

Mas allá de los resultados obtenidos en los casos analizados en este capítulo, los cuáles pueden variar dependiendo de los supuestos y escenarios propuestos (precio, ley, costos, capex, etc.) lo que se intenta implementar es una metodología que apunte a mejorar la gestión en el proceso de exploración en AMSA incorporando información minera y económica a un proyecto en forma temprana.

A continuación, se presenta un mapa regional, donde el color verde corresponden a las propiedades pertenecientes a AMSA. Como información referencial, se cuenta con aproximadamente 700 mil hectáreas en concesiones tanto de exploración como de explotación, que deben ser gestionadas de la manera más eficiente posible.



Ilustración 15: Propiedad Minera AMSA segunda región, elaboración propia

Algunos supuestos económicos utilizados como input para los análisis de casos son los siguientes:

Precio Cu largo plazo	3,1 US\$/lb
Costo mina subterránea	15 US\$/ton mineral
Costo mina open pit	1,7 US\$/ton movida
Costo planta (concentradora)	9,3 US\$/ton mineral
Profundidad depósito	300 metros
Capex Mina Subterranea	26 KUS\$/tpd
Capex Planta (concentradora)	20 KUS\$/tpd
Ley de concentrado	30%
Costo de Tratamiento (TC)	105 US\$/ton-conc seco
% Recuperación concentrado	90%
Costo de refinación (RC)	0,05 US\$/lb
Capacidad de planta	15 ktpd
Impuestos+ Royalty	35%
Plazo	20 años

Tabla 4: Supuestos económicos para evaluación económica. Fuente: Elaboración propia

En primer lugar, definimos un caso base con un tamaño de recursos potenciales de sulfuros de cobre cuya alimentación a planta sea de 15 ktpd con una ley 1,2% de Cu, con una profundidad media de 300 metros, procesamiento mediante concentradora y se realiza un cálculo determinístico, resultando con un VAN potencial de este caso base de -261 millones de US\$.

Con el resultado anterior, se puede realizar simulaciones variando algunos parámetros (tonelaje/ley) llegando a la siguiente tabla donde se muestra rangos de Valor Actual Neto en función del tonelaje a planta y ley para un caso potencial de un depósito de sulfuro en profundidad cuya extracción se hace por minería subterránea en modalidad stand alone.

		Tonelaje (ktons)					
		46.538	93.075	139.613	186.150	232.688	
VAN (MUS\$)		(261)	50%	100%	150%	200%	250%
Ley (%)	0,9%	-874	-605	-337	-68	200	
	1,0%	-816	-490	-164	161	487	
	1,2%	-701	-261	180	620	1.061	
	1,3%	-644	-146	352	850	1.348	
	2,0%	-243	657	1.557	2.456	3.356	

Tabla 5: Rangos VAN para distintos tonelaje y ley deposito sulfuros en profundidad modalidad stand alone. Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior, se puede encontrar combinaciones de depósitos de sulfuros de cobre en profundidad con un potencial de tonelajes a planta y leyes que resultan con un VAN positivo marcados en color gris, que entrega las primeras orientaciones respecto a diferentes combinaciones (tonelaje/ley) atractivas económicamente seguir con un proyecto de exploración potencial, bajo los supuestos establecidos en la evaluación.

Por el contrario, aquellas combinaciones de color blanco son las que resultan con una evaluación negativa o de poco interés desarrollar para AMSA.

Si graficamos el VAN en función de diferentes leyes para diferentes tamaños, se obtiene:

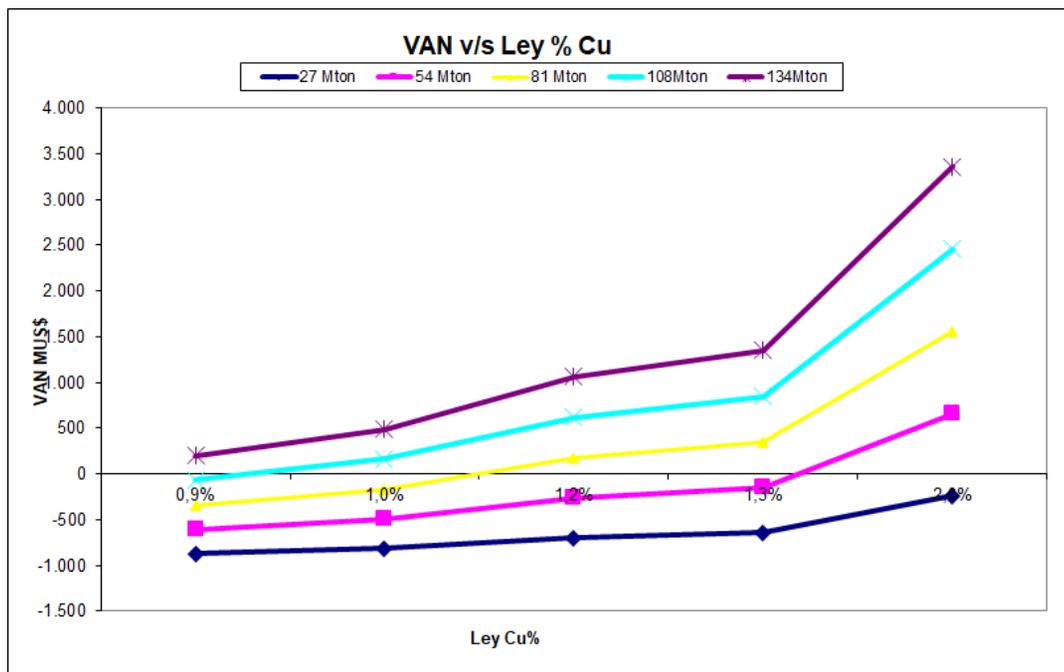


Ilustración 16: VAN v/s Ley para diferentes tamaños de alimentación a planta. Fuente: Elaboración propia

En el gráfico anterior, se aprecia el impacto que tiene la ley media para diferentes tonelajes de mineral a planta en el VAN potencial de un proyecto en profundidad de acuerdo a los supuestos considerados, produciéndose un quiebre significativo para leyes sobre 1,3% de cobre para distintos tonelajes a planta sobre el VAN.

Otra conclusión que podemos observar es que para tamaños de depósitos en profundidad menores a 81 millones de tonelaje con leyes menores a 1,3% de alimentación a planta no son atractivos para AMSA bajo las suposiciones iniciales, que pueden variar dependiendo del caso en particular que se analice.

Utilizando el mismo caso base anterior, se puede analizar una alternativa diferente al stand alone, pero donde el mineral es transportado para su procesamiento a una planta ya existente en un radio cercano (60 km) mediante chancador primario y correa transportadora (overland), la evaluación indica un VAN de – 247 millones de US\$, es decir un orden de magnitud similar al caso de stand alone. Encontrándose en este radio un límite económico para esta alternativa, ya que para radios mayores el VAN se hace menor que en el caso stand alone. Por el contrario, para radios menores el VAN es mayor (marcadas en plomo) como se puede observar en la siguiente tabla.

		Tonelaje a planta (ktons) @1,2% Ley				
		46.538	93.075	139.613	186.150	232.688
VAN (MUS\$) (247)		50%	100%	150%	200%	250%
Distancia a planta (km)	20,0	-754	-95	564	1.222	1.881
	40,0	-800	-171	458	1.087	1.716
	60,0	-846	-247	353	952	1.551
	80,0	-892	-322	247	817	1.386
	100,0	-938	-398	142	682	1.221

Tabla 6: Rangos VAN para distintos tonelaje y distancia a planta procesamiento, deposito sulfuros en profundidad. Fuente: Elaboración propia

Esta alternativa (chancador primario/correa overland) presenta mejores perspectivas económicas que la modalidad stand alone para distancias menores a 60 km marcadas en plomo en la tabla anterior. Para casos de mayor distancia conviene desarrollar proyectos en modalidad stand alone. Encontrándose un radio límite (60 km), ya que para radios mayores el VAN se hace significativamente (variación sobre el 40%) menor que en el caso stand alone. Por el contrario, para radios menores el VAN se hace significativamente mayor.

También se puede analizar la conveniencia respecto al método de explotación minera, si consideramos el caso base con algunos supuestos generales para una mina a rajo abierto se puede el ver el impacto del tamaño y ley en el VAN de un potencial proyecto de exploración.

A continuación, presentamos simulaciones de una alternativa de open pit a una profundidad de 300 mts con una razón estéril/mineral de 4:1 para diferentes tamaños y leyes, los resultados fueron los siguientes:

		Tonelaje a planta (ktons)				
		46.538	93.075	139.613	186.150	232.688
VAN (MUS\$) 227		50%	100%	150%	200%	250%
Ley (%)	0,9%	-837	-199	440	1.078	1.716
	1,0%	-766	-57	652	1.362	2.071
	1,2%	-624	227	1.078	1.929	2.780
	1,3%	-553	369	1.291	2.213	3.135
	2,0%	-57	1.362	2.780	4.198	5.617

Tabla 7: Rangos VAN para distintos tonelaje y leyes a planta procesamiento, deposito sulfuros open pit. Fuente: Elaboración propia

De la tabla anterior, se puede ratificar el gran impacto que tiene la ley en el resultado de VAN en un proyecto minero. En plomo se marcan las alternativas (tonelaje/ley) atractivas a desarrollar en un proyecto de exploración por medio de extracción minera a rajo abierto, procesamiento por medio de una concentradora en modalidad stand alone. Estos resultados, es posible mejorarlos si se pudiera aprovechar una planta de procesamiento como vimos en el caso anterior a una distancia menor a 60 km.

Otro análisis interesante para desarrollar es el impacto que tiene la razón estéril/mineral en un proyecto minero, si tomamos el caso anterior y se realiza una simulación con varias razones de estéril mineral y tamaños de mineralización con una ley 1,2% de cobre se obtiene:

		Tonelaje a planta (ktons)				
		46.538	93.075	139.613	186.150	232.688
VAN (MUS\$)		50%	100%	150%	200%	250%
216		3,0	4,0	6,0	8,0	9,0
Razon estéril mineral	3,0	-522	329	1.180	2.031	2.883
	4,0	-635	216	1.067	1.918	2.769
	6,0	-853	-2	849	1.700	2.551
	8,0	-1.065	-214	637	1.489	2.340
	9,0	-1.156	-305	546	1.397	2.248

Tabla 8: Rangos VAN para distintos tonelaje y razón estéril/mineral a planta procesamiento, deposito sulfuros open pit. Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que para depósitos con leyes de 1, 2% con razones estéril mineral menores a 6 los resultados (marcados en plomo) son significativamente mejores bajo una minería a rajo abierto.

De los ejercicios anteriores, hemos tenido algunos rangos de parámetros críticos que hacen que un proyecto de exploración de sulfuros tenga un potencial económico atractivo. Esta información relevante para definir, priorizar, diferentes blancos u ofrecimientos y entregar input para definir campañas de exploración. Estos análisis son dinámicos y dependen de las suposiciones que se den y que son variables (precios, tecnología, costos, etc.).

		Razón Esteril/Mineral	Método Extracción	Distancia procesamiento (Km)	Stand alone
>100 Mton	>1%	<6	Open Pit	<60	No
		>6	Subterránea	>60	Si

Tabla 9: Parámetros proyecto sulfuros tenga un potencial económico atractivo para AMSA. Fuente: Elaboración propia

El modelo económico y los parámetros encontrados son a nivel conceptual con un nivel de precisión de un +-40%, resultan útiles para orientar, priorizar blancos potenciales, que en conjunto con estos análisis estratégicos desde etapas muy tempranas resulta una herramienta de gestión potente que ayuda a focalizar las tareas de exploración donde se tenga mayores probabilidades de éxito económico. En definitiva nos entregan algunas referencias de ordenes de magnitud que son necesarias tener y que sean un input en la toma de decisiones.

4.5 Elementos de una estrategia exploración

El desarrollar una estrategia de exploración depende de una serie factores, uno de esos factores es el tamaño, una empresa minera mayor, tiene actividades relacionadas con la extracción minera, obtiene ingresos y la capacidad financiera interna/externa para financiar desarrollo de un proyecto minero. Las empresas pequeñas en cambio generalmente carecen de ingresos relacionados con la minería y dependen de su capacidad de endeudamiento para su financiación.

En el medio, están las empresas medianas con actividades relacionadas con la minería. ingresos, pero en una escala mucho menor que una empresa mayor. Ambos, pequeñas y las medianas empresas carecen de la capacidad financiera para financiar por ellos mismos el desarrollo de la mina, excepto en pequeña escala en el caso de una empresa mediana, y para desarrollar una mina ambos necesitarán recaudar capital adicional y financiamiento.

Cualquier estrategia debe considerar también los efectos del ciclo de precios del cobre; en periodos de ciclos bajos hay más ofertas de proyectos y propiedades mineras con menores costos y más disponibilidad de proveedores y por tanto precios más baratos en general.

Adicionalmente, hay más probabilidades de desarrollar proyectos que terminen en producción en periodos de ciclos altos. Por tanto, es importante considerar mantener o aumentar los presupuestos en ciclos bajos, aun cuando esto sea difícil; las empresas como lo vimos anteriormente tienden a disminuir los presupuestos en exploración cuando la tendencia es a la baja en los precios.

Otros factores que determina la estrategia y táctica de exploración, corresponde a la experiencia con que se cuente en el grupo de exploración, el grado de apoyo respecto a la importancia de la exploración por parte de la empresa, tipo de commodity, depósito buscado, profundidad, métodos y tecnología de exploración con que se disponga, tipo de extracción minera, posibilidad de financiamiento, tiempo disponible, régimen tributario local, aspectos legales, medioambientales y comunitarios para una eventual producción.

Elemento importante, es si la empresa dispone de flujo de caja o si depende de los inversionistas para financiar las actividades de exploración, ya que dependiendo de la fuente de financiamiento es el riesgo que puede asumir la empresa.

La estrategia de una empresa mayor en el caso de AMSA, por ejemplo, puede ser mantener o aumentar los recursos y reservas de mineral de sus principales productos, durante un período determinado, mediante el descubrimiento de yacimientos en distritos conocidos o nuevos distritos mineros.

Para una empresa junior por ejemplo su estrategia puede ser descubrir un solo depósito con el objetivo de vender el depósito y devolver a los inversionistas lo invertido o financiar otra exploración futura, asociarse con una empresa con un prospecto con potencial, o a una empresa más grande que financiará el proyecto.

Las empresas mineras exploran solo unos pocos productos específicos, principalmente porque tienen minas que producen una o más de esos minerales y en las que controlan una cuota de mercado y se han especializado en unos pocos productos.

Las empresas mineras grandes también tienden a concentrarse principalmente en productos que puedan extraer a gran escala, como: mineral de hierro (Rio Tinto, BHP y Vale), o Cobre (Codelco, Freeport, Glencore, BHP, AMSA.).

Como se ha mencionado anteriormente el desarrollo de minas a gran escala implica grandes desembolsos de capital: miles de millones de dólares, y por lo general toma un tiempo considerable para que una mina sea puesta en producción después del descubrimiento.

Estas consideraciones tienen una gran influencia a la hora de definir una estrategia de exploración de una empresa.

Un desafío adicional para la exploración en empresas mayor es el tamaño del yacimiento que se pretende descubrir, el cual debe tener un impacto significativo en la rentabilidad de la empresa para hacer viable el proyecto.

Debido a lo anterior, es que las empresas mayor complementan las actividades de exploración propia (o incluso algunas veces reemplazan) con fusiones y/o adquisiciones (M&A) y así poseen mayores oportunidades de ampliar sus recursos minerales en sus diferentes categorías (inferidos, indicados y medido) o reservas (probables, probadas).

Se asume en la industria minera, que las fusiones y adquisiciones son más costosas que incorporar recursos minerales y reservas a través de una exploración exitosa. Se requiere un due diligence exhaustivo para comprobar la oportunidad de agregar valor real a la empresa. Hay veces que estas fusiones o adquisiciones se hacen en periodo de ciclos altos, cuando hay expectativas mayores en los precios a futuro.

En muchos casos, las fusiones y adquisiciones la actividad se lleva a cabo cuando los precios de las materias primas son altos, impulsada en parte por el mercado con buenas expectativas a futuro o una estrategia agresiva y mostrar un crecimiento de la empresa.

La estrategia en exploración debe estar enfocada en implementar un proceso que no solo tenga como objetivo el descubrimiento, sino desde un principio incorporar en sus objetivos a todos los stakeholders involucrados que determinan finalmente que un proyecto sea viable.

Una decisión crucial en el desarrollo de la estrategia en una empresa mayor es la elección entre realizar exploración brownfield y greenfield. La exploración brownfield se realiza como hemos dicho en el entorno a una mina.

La probabilidad de descubrir un yacimiento greenfield es generalmente menor que uno brownfield, pero la recompensa potencial puede ser bastante mayor (a mayor riesgo se espera una mayor retribución).

De acuerdo con la experiencia obtenida, se recomienda mantener una mezcla en los presupuestos entre los proyectos brownfield y greenfield y mantener una disciplina en este sentido durante al menos un período presupuestario de mediano a largo plazo, dependiendo del grado de riesgo que se quiera tomar.

Se requiere tiempo para construir un equipo exitoso, para llevar a cabo la exploración inicial y capturar lecciones aprendidas de procesos anteriores.

Los programas de exploración deben planificarse y ejecutarse con el objetivo de aumentar las posibilidades de éxito lo más rápido posible. El descubrimiento es un resultado desconocido e imposible de predecir con algún grado de certeza.

Otro punto importante, es que los equipos de exploración deben tener al menos un conocimiento básico de los métodos comunes de minería y también ser consciente del

desarrollo de la mina costos y el impacto de la ubicación geográfica en estos. Este conocimiento se convierte en un elemento cada vez más importante a medida que los depósitos más profundos son objeto de descubrimiento.

Actualmente, la mayoría de los yacimientos a gran escala operan a rajo abierto, los cuales en un futuro con una alta probabilidad se explotarán de manera subterránea, por lo que los equipos de exploración deben estar preparados. Estos métodos de minería colocan algunas restricciones sobre el tipo de yacimiento que se puede explotar con éxito: uno con una geometría regular, el conocimiento de estas limitaciones es necesario tener como guía el descubrimiento y la perforación de definición de recursos.

Dado que ha habido poca exploración sistemática de yacimientos profundos (por debajo de varios cientos de metros en la mayoría de las áreas), una parte poco explorada en su mayoría de la corteza terrestre se puede abrir oportunidades más allá de los actuales límites actuales.

Para que la extracción de un recurso mineral pueda tener éxito, la empresa necesita contar con el apoyo de la comunidad local y dado que el equipo de exploración es casi siempre el primero en llegar al área de interés, este tiene un papel crucial y determinante en el apoyo o no apoyo al proyecto. La forma que se haga en esta primera etapa entre la comunidad local y el grupo de exploración de la empresa suele ser fundamental para la relación a largo plazo entre la comunidad y la empresa.

La mayoría de los proyectos de exploración no superan las etapas iniciales de trabajos de exploración; este trabajo por lo general proporciona también oportunidades laborales para la población local, que puede también producir un apoyo local inicial.

Desde un inicio debe realizarse un plan comunitario en la zona de interés, identificando los principales stakeholders con quienes se debe tomar contacto y desarrollar un plan establecido, esta etapa es tan importante como los estudios geológicos. Este plan comunitario debe saber gestionar las expectativas y dar a conocer bien el proyecto y sus alcances todavía muy inciertos, ya que la gran mayoría de los proyectos no terminan en la construcción de una mina.

Es importante que la comunidad sea consciente de esta probabilidad desde el principio, por eso es que el equipo de exploración debe ser multidisciplinario, y sean especialistas en esta área específica la que lleve el liderazgo en este tema y abordar la exploración de manera integral.

En muchos aspectos, decidir si continuar o terminar un proyecto de exploración o programa es una decisión difícil de tomar, hay muchos ejemplos donde la constancia finalmente rinde fruto y se llega finalmente al descubrimiento de un yacimiento, incluso perforando el mismo sector ya descartado pero más profundo. Aquí se agrega también un

factor que es necesario también exponer que es replantearse o revisar modelos conceptuales en zonas ya perforadas.

Sin embargo, también hay ejemplos de proyectos donde las razones para persistencia no se materializan por un periodo de tiempo y se continua con predicciones demasiado optimistas de tiempo u otros donde la ubicación geográfica todavía hace que no sea posible su extracción.

Es bueno mencionar, que toda la información de exploración generada en algunos países (por ejemplo, Chile Canadá, Australia, Nueva Zelanda es solicitada por el gobierno y existe una ley que obliga a informar. Los organismos gubernamentales (Sernageomin en el caso de Chile) luego lo hacen públicos esta información y accesible a través de sus plataformas.

En el pasado la exploración por Cobre se ha dirigido en gran medida a descubrir yacimientos preferentemente para la explotación a rajo abierto. En general, esto ha limitado la búsqueda a menos de 200 m bajo la superficie y ha sido guiado principalmente por una evidencia superficial de mineralización.

Como hemos visto, si se tiene razón estéril/mineral 1:3 de roca estéril para acceder al mineral para minería, el depósito normalmente no se explota a cielo abierto. Dado que las técnicas modernas de minería subterránea masiva ahora se puede extraer grandes yacimientos de forma regular a grandes profundidades.

Actualmente hay una tendencia hacia una exploración más profunda en aquellos distritos mineralizados actualmente conocidos, la probabilidad cada vez menor de éxito en el descubrimiento de depósitos superficiales en distritos que han sido anteriormente explorados, y se tiene existe un potencial de exploración de mineral más profundo que no ha sido estudiado adecuadamente aún en estos distritos.

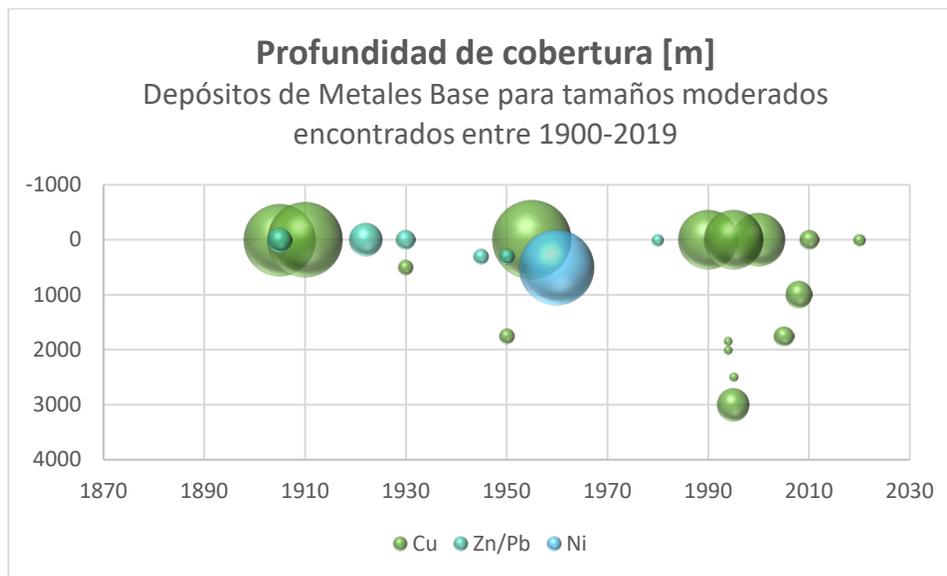


Ilustración 17: Evolución exploración en profundidad: Fuente Minex Consulting 2020

5 CONCLUSIÓN

La sustentabilidad del negocio minero en el tiempo requiere de exploración minera fuerte. Por tanto, la estrategia corporativa de AMSA debe siempre, independiente del ciclo económico considerarla dentro de sus lineamientos estratégicos y considerar focalizar los recursos donde se tenga mayor probabilidad de éxito económico. La estrategia de exploración debe considerar aspectos mineros, económicos, medio ambientales y comunitarios desde un inicio con una mirada de largo plazo con equipos multidisciplinarios pequeños y estables.

La dificultad de traducir descubrimientos relevantes a minas económicamente explotables es un problema que debemos enfrentar desde varios ángulos, uno de ellos es implementar herramientas de gestión en etapas tempranas de exploración que nos ayuden medir la eficiencia en la asignación de recursos, valorizar y ranquear proyectos de manera estandarizada y encontrar parámetros (tonelaje, ley, distancias, profundidad) que nos permita direccionar búsqueda de blancos o campañas de sondajes, son los dos aspectos centrales de esta tesis.

Sistematizar una metodología que aporte información valiosa a la toma de decisiones tanto a nivel estratégico como operativo en exploraciones, incorpora una mirada multidisciplinaria al proceso de exploración que si bien no asegura el éxito de un descubrimiento económicamente explotable, si nos acerca a ese objetivo.

Del análisis FODA realizado al proceso de exploración en AMSA, se puede observar como fortalezas principales el know how en Cobre y la posibilidad de abordar esta actividad a través de un grupo multidisciplinario, en cuanto a las debilidades expuestas, se puede mencionar la falta de alineamiento de los kpi de exploraciones hacia descubrimientos económicamente explotables y no solamente enfocados en los descubrimientos.

En la estimación de los parámetros, es un ejercicio que ayuda identificar rango de variables claves (tonelaje, ley, distancia, profundidad, etc.) que hacen que descubrimiento pueda ser viable. Focalizar una búsqueda con estos rangos de acuerdo a los supuestos establecidos, aporta con información relevante a considerar por la estrategia de exploración en AMSA.

De los ejercicios realizados para la búsqueda de yacimientos en profundidad (mayor potencial) tamaños mayores a 100 Mton a planta con leyes de cobre sobre 1% resultan ser atractivos.

Se logra identificar que para distancias sobre 60 kilómetros de una planta concentradora conviene desarrollar un proyecto minero en modalidad stand alone bajo los supuestos establecidos en el modelo. Así como razón estéril/mineral menores a 6 resulta más atractivo desarrollar un proyecto en forma de rajo abierto.

Más allá de estos rangos, que pueden variar dependiendo de los supuestos establecidos y el grado de precisión y detalle en el modelo de evaluación, lo valioso es que este tipo de análisis se hagan al interior del grupo de exploración de manera sistemática y que el grupo de geólogos maneje cada vez más información relacionada con la extracción minera, aspectos medio ambientales y comunitarios.

Otro aspecto por considerar corresponde a la implementación de tecnología de manera constante y sistemática como una práctica habitual, dando la oportunidad de equivocarse como parte de un proceso de aprendizaje natural.

Se observa un potencial de exploración no desarrollado en yacimientos con profundidades mayores a 200 metros y gracias al avance de la tecnología, herramientas como la geofísica (IP) a gran profundidad abre la posibilidad entre otras herramientas expuestas en este documento a detectar anomalías que antes era difícil de detectar. Tecnologías con inteligencia artificial tiene un futuro prometedor en exploraciones, a mediano plazo en la búsqueda de yacimientos estará fuertemente influenciada por esta herramienta, incorporando más y mejor información a la toma decisiones.

El desarrollo de esta tesis apunta directamente a unos de los pilares estratégicos definidos en la compañía y en la industria minera como es la expansión de la producción de cobre en los próximos años y que sustente la viabilidad en el largo plazo de la compañía.

La permanente evaluación de la cartera de oportunidades que tiene Antofagasta Minerals, hace necesario tener una herramienta estandarizada que nos permita sobre todo en etapas de ciclos bajos de precio del cobre mantener equipos en exploración permanentes en el tiempo, focalizando el gasto en aquellas oportunidades que tengan un potencial económico.

Con lo anterior podemos gestionar de mejor manera los presupuestos asignados y desarrollar los mejores proyectos que garanticen sostenibilidad del negocio en el largo plazo.

Finalmente, se ha desarrollado una metodología que permite contribuir a mejorar la tasa de descubrimientos en exploración que se convierten en minas explotables económicamente. Este es uno de los grandes desafíos que hoy en día tiene la exploración, que permite hacer frente a una demanda creciente con un continuo agotamiento de los yacimientos actuales.

6 GLOSARIO

- Exploración Greenfield: este concepto se basa en trabajos de exploración para encontrar depósitos minerales en áreas previamente inexploradas. Estos proyectos de exploración son los más riesgosos del negocio minero.
- Exploración Brownfield: actividad de exploración de alto riesgo cercana a la mina de explotación con el objetivo de extender su vida operativa y aprovechar la infraestructura establecida.
- KPI: Key Performance Indicator; indicador de rendimientos claves. Tiene como finalidad establecer una métrica de medición de los objetivos planteados.
- Empresas Grandes (Major): Ventas: mayores o iguales a US\$ 500 millones; Productores; Capacidad financiera para desarrollar una mina de tamaño importante por su cuenta: Fuente: S&P Global Market Intelligence.
- Empresas pequeñas (Junior): Ventas: Entre US\$ 0 y US\$ 49 millones. Por lo general son compañías de exploración, pero también pueden ser productoras pequeñas. Dependen del financiamiento del mercado de capitales. Fuente: S&P Global Market Intelligence.
- SIRGAS: El acrónimo original de SIRGAS (Sistema de Referencia Geocéntrico para América del Sur) cambió en 2001 a Sistema de Referencia Geocéntrico para las

Américas siguiendo la recomendación de la 7ª Conferencia Cartográfica de las Naciones Unidas para las Américas (Nueva York, 22 - 27 de enero de 2001).

7 BIBLIOGRAFÍA

ROBERTO FRÉRAUT, Curso Fundamentos del negocio Minero. Universidad de Chile (2020). Clase N°1. Lamina N°12, 20.

S&P GLOBAL MARKET INTELLIGENCE. World Exploration Trend 2020-2021.

JOHN P. SYKES AND ALLAN TRENCH, 2017. The business of greenfield minerals exploration.

YERKO FRANASOVIC BRAINE, 2017. Análisis de elementos competitivos que inciden en la exploración minera de cobre.

MARCELO RAMÍREZ MELLADO, 2018. Estrategias de exploración minera en Chile y estimación de costos.

CODELCO MEMORIA, 2020. Exploraciones en Chile y extranjero.

ANGELO AGUILAR CATALANO, 2016. Métrica y Medición de valor de la Exploración.

MINEX CONSULTING, 2020. The Challenge and opportunities for geophysics for making discoveries under cover

CAREY, 2022. Modificaciones al Código Minería

ANTOFAGASTA MINERAL, ANNUAL REPORT, 2020

COCHILCO, 2017. Crecimiento y desarrollo de las grandes empresas minera de cobre.

8 ANEXOS

ANEXO A Ley 21.420

<https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1172303>

ANEXO B Técnicas Geoquímicas

- ICP-MS: Espectrometría de masas con plasma acoplado inductivamente: es muy sensible y capaz de determinar de forma cuantitativa casi todos los elementos presentes en la tabla periódica que tengan un potencial de ionización menor que el potencial de ionización del argón a concentraciones muy bajas (nanogramo/litro o parte por trillón, ppt).
- LA-ICP-MS: Espectrometría de masas de plasma acoplado inductivamente por ablación láser, es una tecnología analítica potente que permite realizar análisis elementales e isotópicos de alta sensibilidad directamente en muestras sólidas.
- ICP-AES: Es una técnica de espectroscopia de emisión atómica de plasma acoplado por inducción, se basa en la radiación emitida cuando un átomo o ión excitado por absorción de energía de una fuente caliente, se relaja a su estado fundamental. La cantidad de energía emitida dependerá de la cantidad de átomos presentes del metal correspondiente.
- μ LRS: Espectroscopia Micro Láser, análisis in situ de mineralogía.
- TIMS: Colector múltiple de ionización térmica, medición de isótopos radiogénicos a partir de partículas de tamaño de nanogramos
- IDTIMS: Espectrometría de masas de ionización térmica por dilución de isótopos, para la separación de monocristales.
- SHRIMP: Microsonda de iones sensible de alta resolución de masas, elemento in situ y análisis de isótopos radiogénicos
- SIMS: Espectrometría de masas de iones secundarios, para análisis sub- μ m de alta resolución de minerales e inclusiones fluidas
- GS: Cromatografía de gases
- PIXE: Análisis de emisión de rayos X inducidos por protones

ANEXO C Técnicas Geofísicas

- Gravedad: se utiliza para identificar cuencas sedimentarias en busca de acumulaciones de petróleo y gas, y depósitos de carbón, así como en la delineación de estructuras principales, ígneas intrusiones y algunos tipos de cuerpos minerales con variaciones significativas en la densidad debido a las diferencias mineralógicas
 - La reflexión sísmica: Es la principal técnica geofísica utilizada en la búsqueda para acumulaciones de petróleo y gas, utilizando el tiempo de viaje bidireccional de las ondas P, para registrar datos en levantamientos sísmicos 3D y en líneas sísmicas 2D.
 - La intensidad magnética: Tiene varias aplicaciones detección de mineralización con un registro magnético relacionada y ayuda al mapeo geológico. El registro magnético de la mineralización puede deberse a un aumento o disminución en el contenido de minerales magnéticos, típicamente magnetita o pirrotita.

- IP (cargabilidad-resistividad) es un método geofísico de fuente controlada, particularmente en la búsqueda de pórfido de cobre, plomo-zinc estratificado y yacimientos de mineral de oro relacionados con sulfuros, así como en geotermia e hidrocarburos exploración y para estudios ambientales.
- Los métodos EM (inducción electromagnética) se utilizan para medir resistividad de la Tierra haciendo uso de la Ley de Inducción de Faraday. Un primario campo magnético generado por la corriente eléctrica que fluye a través de un bucle transmisor induce corrientes eléctricas secundarias en un conductor (cuerpo mineral), que generan un campo magnético secundario que es detectado.