



Corporación Nacional del Cobre de Chile

Desafíos 2025-2026

Minería Profunda

Documento resumen con los principales desafíos tecnológicos en Minería Profunda, para el proceso de postulación a líneas de investigación del concurso Piensa Minería



Tabla de contenido

AGRADECIMIENTOS	3
INTRODUCCIÓN	4
DESAFÍO DE MEJORAR LA CARACTERIZACIÓN DEL MACIZO ROCOSO	5
DESAFÍOS GEOMECÁNICOS.....	5
INNOVACIÓN EN MÉTODO DE EXPLOTACIÓN, VARIANTE Y DISEÑO MINERO	6
DESAFÍO DE MECANIZAR Y AUTOMATIZAR LOS PROCESOS MINEROS	6
DESAFIAR LA PLANIFICACIÓN Y CONSTRUCTIBILIDAD	7
DESAFÍOS OPERACIONALES.....	7
ANEXO: DESAFÍOS POR DIVISIÓN.....	8
DESAFÍOS CHUQUICAMATA SUBTERRÁNEA	8
DESAFÍOS DIVISIÓN EL TENIENTE (DET)	10
DESAFÍOS TECNOLÓGICOS MINERÍA DEL CAVING.....	13



Agradecimientos

La Gerencia Corporativa de Innovación y Tecnología, a través de la Dirección Corporativa de Innovación en Planificación Minera, agradece el valioso apoyo de las gerencias corporativas y divisionales, sus directivos y profesionales técnicos en la elaboración de este documento, el cual recoge los principales desafíos que enfrenta CODELCO en materia de minería subterránea profunda, y que resulta necesario abordar para continuar generando valor para Chile y el mundo.



Introducción

CODELCO ha definido el liderazgo en minería profunda como su imperativo estratégico, estableciendo una nueva frontera tecnológica y de innovación. La seguridad operacional, bajo el principio de cero exposición del personal, constituye la premisa fundamental de este desarrollo. Esta visión se ha visto reforzada por los eventos relevantes recientemente ocurridos, como el evento sísmico relevante en División El Teniente (31 de julio de 2025) y el evento de intromisión violenta o “bombeo” de agua y barro en Grasberg (8 de septiembre de 2025), que subrayan la necesidad de una profunda comprensión de estos fenómenos. A lo anterior se suma la transición estructural de operaciones a rajo abierto hacia la explotación subterránea, lo cual demanda una investigación innovadora y multidisciplinaria centrada en estos focos de atención.

Este propósito exige una transformación estructural en la conceptualización y ejecución de la minería subterránea en profundidad, promoviendo un modelo cimentado en el conocimiento científico-tecnológico, la ciencia aplicada y la colaboración disciplinaria. Bajo la misión corporativa de desafiar a través de la innovación, los métodos, tecnologías y prácticas de exploración y explotación de futuros recursos geológicos, la minería profunda se concibe como un desafío integral que trasciende la dimensión técnica. Ello implica la redefinición de los fundamentos de diseño, planificación y operación, para avanzar hacia un ecosistema minero seguro y eficiente, donde la innovación tecnológica surge como principal habilitador de la transformación.

En este contexto, los desafíos de la minería profunda se extienden desde la comprensión e interpretación avanzada del macizo rocoso y la geomecánica, hasta el desarrollo de nuevos métodos de explotación, sistemas constructivos inteligentes y procesos altamente automatizados bajo la premisa de cero exposición, teniendo presente que la gestión del conocimiento es clave para potenciar el capital humano. La planificación integral y la eficiencia constructiva se consolidan, además, como factores decisivos para garantizar la competitividad y sostenibilidad de las operaciones futuras.

De este modo, CODELCO busca consolidar una visión estratégica de largo plazo, en la que la innovación tecnológica y el aprendizaje continuo permitan la anticipación de riesgos, el fortalecimiento de la toma de decisiones y la definición de un nuevo estándar para la minería subterránea profunda: más segura, inteligente y sostenible.

A continuación, se detallan los principales desafíos tecnológicos y de gestión que orientan esta visión estratégica y constituyen el marco referencial del programa Piensa Minería.



Desafíos tecnológicos minería profunda CODELCO

Desafío de mejorar la caracterización del Macizo Rocosó

- Lograr una caracterización integral, precisa y actualizable del macizo rocoso en profundidad, considerando que constituye la base crítica para un desarrollo seguro, eficiente y sostenible de la minería profunda. Su comprensión condiciona todas las etapas de diseño, planificación y operación.
- Reducir la brecha existente en el conocimiento del macizo, la cual limita la capacidad de predicción de su comportamiento ante la explotación. Se requiere ampliar los estudios geológicos, geofísicos y geotécnicos para disminuir la incertidumbre y fortalecer la toma de decisiones desde las etapas tempranas de planificación.
- Implementar sistemas de monitoreo continuo e integrado que consoliden información de terreno y operación, permitiendo el aprendizaje permanente desde la experiencia y la revisión de zonas clave, con el fin de ajustar modelos y estrategias de manera oportuna.
- Desarrollar una caracterización dinámica y multidimensional del macizo, incorporando tecnologías avanzadas de monitoreo remoto, tomografía sísmica, instrumentación in situ y modelamiento geológico tridimensional.

Desafíos Geomecánicos

- Desarrollar métodos predictivos que permitan anticipar las condiciones del macizo rocoso y del ambiente minero, con el fin de prever eventos críticos como estallidos de roca, procesos de hundimiento, deformaciones o colapsos. Esto implica explorar y validar hipótesis que expliquen la sismicidad previa a la explotación y utilizar tecnologías avanzadas para monitorear en tiempo real la actividad sísmica y el caving mediante la recolección y análisis de datos en línea.
- Comprender y mitigar los desafíos asociados a eventos de difícil predicción, tales como el estallido de roca¹ en El Teniente y el air blast² en Chuquicamata.
- Establecer procedimientos adaptativos de mitigación que consideren las diferencias geológicas y operativas de cada mina, ajustando las estrategias según las características particulares de cada yacimiento.
- Aplicar herramientas de inteligencia artificial y analítica predictiva para analizar datos geomecánicos históricos, optimizar la toma de decisiones en tiempo real y mejorar la seguridad y eficiencia operativa.

¹ Estallido de Roca (en inglés Rockburst): los estallidos de roca consisten en fallas violentas de las paredes rocosas asociadas con proyecciones de roca con alta energía, como respuesta a la liberación instantánea de estrés en el macizo rocoso.

² Air Blast (Blown Blast / Air Gust), se conoce en español como Explosión de Aire, Tronadura de Aire, Chorro de Aire (Mx) y Pistoneo.



- Fortalecer la conexión entre la caracterización geológica y la modelación geomecánica mediante sensorización avanzada, simulaciones tridimensionales y gemelos digitales que permitan anticipar la respuesta estructural del macizo ante los procesos de hundimiento y extracción.
- Mejorar el comportamiento del macizo rocoso para optimizar los diseños y anticipar el desarrollo de nuevos sectores, abordando desafíos como la fragmentación variable, la hundibilidad y la estabilidad del terreno. Se deben perfeccionar los métodos de diseño para evitar sobreexcavaciones y colgaduras, optimizar la fragmentación y favorecer la automatización de los procesos unitarios.
- Analizar el comportamiento geomecánico a escala distrital, considerando la interacción entre distintas minas y sectores productivos, así como su influencia en la sismicidad inducida y la estabilidad global del sistema.
- Determinar cómo los factores geomecánicos y operacionales influyen en la definición de la altura de columna y cómo esta incide en la respuesta sísmica en minería profunda.
- Revisar y fortalecer los sistemas actuales de gestión sísmica frente a los desafíos de profundización y aumento de escala de las cavidades, incorporando enfoques integrales que combinen gestión operacional, tecnológica y humana.

Innovación en método de explotación, variante y diseño minero

- Desarrollar nuevos métodos de minería subterránea en profundidad que desafíen el estado del arte y mejoren la productividad, la seguridad, los costos y el impacto ambiental, tomando como referencia experiencias internacionales exitosas.
- Innovar en las técnicas de exploración, modelamiento y planificación para aumentar la eficiencia y reducir los riesgos asociados a la profundización.
- Incorporar la automatización y el diseño asistido por datos en operaciones mineras, desafiando las reglas tradicionales de operación.
- Establecer criterios técnicos y económicos que permitan determinar el tamaño óptimo de la unidad de explotación, alcanzando un equilibrio sostenible entre productividad, seguridad y riesgo operacional.

Desafío de mecanizar y automatizar los procesos mineros

- Incrementar la flexibilidad y capacidad productiva mediante la automatización de equipos móviles e infraestructura en procesos unitarios como manejo de materiales, muestreo, perforación, tronadura y levantamiento geomecánico.
- Adaptar los diseños mineros para facilitar la implementación de tecnologías mecanizadas, incluyendo el uso de Tunnel Boring Machine (TBM) y sistemas autónomos de excavación.
- Desarrollar procesos unitarios autónomos que minimicen la exposición de las personas y fortalezcan los sistemas de soporte y fortificación frente a condiciones geotécnicas complejas.



- Aplicar la automatización a toda la cadena de valor minera, desde la exploración hasta la producción del cátodo, incrementando la seguridad, eficiencia y trazabilidad operacional.

Desafiar la Planificación y Constructibilidad

- Desarrollar un modelo de integración temprana de riesgos geotécnicos y constructivos en la planificación de minería profunda, basado en simulaciones tridimensionales y análisis multicriterio que prioricen líneas críticas y reduzcan sobrecostos durante la ejecución.
- Diseñar y validar metodologías de evaluación de constructibilidad para obras subterráneas profundas, considerando parámetros geotécnicos, secuencias de excavación y requerimientos de sostenimiento, apoyadas en modelamiento numérico y herramientas BIM minero.
- Optimizar los flujos logísticos subterráneos mediante modelamiento digital y simulación discreta, orientada a reducir interferencias y mejorar la eficiencia en transporte y abastecimiento a gran profundidad.
- Investigar soluciones modulares y materiales prefabricados, evaluando su comportamiento estructural, durabilidad y eficiencia constructiva frente a las condiciones extremas de presión, humedad y temperatura.
- Desarrollar un sistema digital de trazabilidad y control de calidad en tiempo real que integre sensores, bases de datos y analítica predictiva para fortalecer la gestión constructiva y la toma de decisiones.
- Cuantificar y modelar el impacto estratégico de los ritmos de preparación minera, simulando cómo las variaciones en los tiempos de desarrollo afectan costos, plazos, seguridad y cumplimiento productivo, para optimizar el equilibrio entre velocidad de preparación y riesgo operacional.

Desafíos Operacionales

- Aumentar la flexibilidad y eficiencia operacional mediante el rediseño de procesos que presentan altos niveles de interferencia y menor rendimiento debido a factores como el polvo, la sobreexcavación y la complejidad logística.
- Mejorar la productividad y fiabilidad de la explotación, abordando el manejo de minerales húmedos, el mantenimiento preventivo y la gestión integral de túneles para evitar interrupciones operativas.
- Fortalecer la toma de decisiones en tiempo real mediante sistemas integrados de información, big data, inteligencia artificial y machine learning que optimicen la producción, mejoren la seguridad y minimicen el impacto ambiental a través de procesos más ágiles y precisos.



Anexo: Desafíos por División

Desafíos Chuquicamata Subterránea

Categoría	Desafío	Descripción
Geomecánicos	Estabilidad	Calibrar continuamente el comportamiento real del terreno para prever nuevos diseños o sectores. Los daños al macizo rocoso y la degradación acelerada son una preocupación clave.
	Fragmentación	Fragmentación variable según la litología. Se observan grandes fragmentos hacia el oeste y fragmentación más fina al sur. Además, el polvo representa un desafío importante en toda la cadena productiva.
	Hundibilidad	Asegurar la continuidad del <i>caving</i> y evaluar mecanismos para facilitar el proceso, como preconditionamiento y optimización de la geometría de extracción.
	Variante de explotación	Adaptar las características del método de <i>block caving</i> con variantes en alturas de hundimiento, ajustando las estrategias de incorporación y extracción a las condiciones del entorno.
	Corte basal	Asegurar el corte basal, minimizando los daños en el macizo rocoso y evitando la formación de pilares remanentes.
	Malla de extracción	Aumentar el factor de seguridad en la continuidad del flujo gravitacional, con opciones de prefabricación para reducir los tiempos de preparación minera y optimizar la recuperación de reservas.
Caracterización del macizo	Mejorar la capacidad de interpretación y entendimiento	<p>Se reconoce una brecha importante en la plena caracterización del macizo en profundidad, condición que atenta en contra de todo diseño y planificación de una minería en profundidad o compleja.</p> <p>Necesidad de monitoreo continuo, el aprendizaje desde la experiencia y la revisión de túneles clave.</p>
Diseño minero	Rendimientos y distancias	Aumentar la flexibilidad operativa y la capacidad productiva, manejando materiales a mayores distancias y con mayor eficiencia.



Categoría	Desafío	Descripción
	Secciones	Ajustar las secciones de las galerías en función de la calidad del macizo rocoso, considerando un factor de seguridad adecuado y optimizando el uso de equipos mineros.
	Optimización	La profundización conlleva un desafío de logística relevante, producto que solamente los tiempos de desplazamiento se verán incrementados. Por tanto, la búsqueda de metodologías y herramientas que optimicen escenarios serán necesarias.
	Polvo y control de emisiones	La operación debe considerar, desde su etapa de diseño hasta la fase operativa, las variables de sustentabilidad más gravitantes, en particular aquellas relacionadas con el polvo, el agua y el aire, integrando medidas preventivas y de control que aseguren condiciones adecuadas de ventilación, calidad ambiental y cumplimiento normativo.
	Rendimiento y distancias	Comprender los límites técnicos de producción en minería profunda, considerando las capacidades actuales de equipos, infraestructura y ventilación, e identificar las principales restricciones que condicionan el aumento de productividad en operaciones como El Teniente y Chuquicamata.
Operacionales	Continuidad operacional	Mejorar la flexibilidad de los sistemas operacionales, reducir interferencias y optimizar el manejo del polvo y el nivel de acopio en caso de fallas operativas.
	Gestión de marinas y RISES	Independizar las rutas de marina y producción para reducir interferencias, y gestionar adecuadamente los RISES para optimizar el uso de galerías.
	Rendimientos en preparación minera	Mejorar la interacción entre áreas productivas y en preparación, acelerando el rendimiento mediante desarrollos más rápidos (e.g. Rapid Development).
	Materiales y estrategias de constructibilidad	La problemática de estabilidad observada en Chuquicamata Subterránea impulsa la necesidad de buscar nuevas técnicas de manejo de materias primas como el hormigón y el acero, entre otros.



Desafíos División El Teniente (DET)

Categoría	Desafío	Descripción
Geomecánicos	Preacodicionamiento del macizo en ambientes de altos esfuerzos	<p>Dado que el fracturamiento hidráulico (FH) constituye una herramienta clave para mitigar la sismicidad y abordar los desafíos asociados a la profundización en DET, resulta necesario investigar su aplicación en ambientes de altos esfuerzos, evaluando su efectividad y seguridad en dichas condiciones.</p> <p>En paralelo, es fundamental analizar los posibles efectos secundarios del FH, tales como la concentración de esfuerzos y su impacto en el entorno geomecánico, con el fin de establecer criterios de diseño y operación que garanticen la estabilidad del macizo.</p> <p>Asimismo, se propone explorar el uso de fluidos alternativos al agua en los procesos de FH, orientados a optimizar la propagación de fracturas, reducir el consumo hídrico y minimizar los impactos ambientales asociados al uso intensivo de agua.</p>
	Interacción de cavidades	<p>Es necesario comprender la interacción en 3D de las cavidades de explotación y cómo las reglas actuales aplican en profundidades mayores. El desarrollo de herramientas de modelamiento numérico es crucial para gestionar estas interacciones, con modelos que representen los ambientes de desarrollo y operación actuales de DET.</p>
	Deterioro del sistema de soporte	<p>Entender el deterioro de los sistemas de soporte después de eventos sísmicos es clave para garantizar la seguridad. Es necesario implementar mantenimiento preventivo de los sistemas de fortificación y determinar dónde hacerlo considerando el tamaño de la mina.</p>



Categoría	Desafío	Descripción
	Detección de patrones sísmicos	Se requiere mejorar la analítica avanzada para detectar patrones de sismicidad y emplear estos datos como alertas tempranas. Esto es crucial para reducir el riesgo de eventos sísmicos mayores.
	Mejora en la fragmentación	Se requiere mejorar la fragmentación en los puntos de extracción para aumentar la productividad. Las pruebas iniciales han mostrado resultados preliminares positivos, pero aún no concluyentes.
Planificación y Constructibilidad	Automatización de procesos unitarios	Se busca desarrollar procesos unitarios autónomos (más allá de camiones y martillos) que minimicen la exposición de las personas y mejoren la eficiencia operativa. Por ejemplo: manejo de materiales, muestreo, perforación y tronadura y levantamiento geomecánico.
	Flexibilidad	Necesidad de una visión más flexible y adaptativa, considerar métodos alternativos, accesos innovadores y métodos constructivos disruptivos Valor económico como norte, las soluciones deben alinearse con un objetivo de creación de valor sostenible y competitivo para el negocio. Se reconocen desafíos inevitables en costos, lo que obliga a compensar con mayor eficiencia logística y operativa.
Operacionales	Explotación de minerales húmedos (Agua-Barro)	La explotación de minerales húmedos representa un desafío significativo en términos de manejo y procesos productivos.
Diseño minero	Sobreexcavaciones	Las sobreexcavaciones en la construcción de túneles y dificultades en la geometría de las explotaciones son desafíos recurrentes que impactan tanto en la productividad como en la seguridad. Por ello se buscan métodos y herramientas que ayuden a los ejecutores a tener mejor resultado en la



Categoría	Desafío	Descripción
		implementación.
	Integración de herramientas de diseño	La necesidad de optimizar el diseño debe desafiar la integración de las distintas herramientas de uso actual para el diseño minero.
	Ventilación y refrigeración	La profundización de la minería conlleva a necesidad de ventilación de calidad, a lo que se deberá sumar un evento que actualmente no es del todo considerado en el diseño de la ventilación como lo será el gradiente térmico
	Rendimiento y distancias	Comprender los límites técnicos de producción en minería profunda, considerando las capacidades actuales de equipos, infraestructura y ventilación, e identificar las principales restricciones que condicionan el aumento de productividad en operaciones como El Teniente y Chuquicamata.
Mantenimiento	Mantenimiento preventivo de túneles	<p>Asegurar un mantenimiento preventivo efectivo de túneles, así como mejorar el manejo de "inchancables", para mantener la continuidad operativa.</p> <p>Otro desafío asociado a este tema es la búsqueda de nuevos materiales de soporte.</p>



Desafíos tecnológicos minería del *caving*

Categoría	Desafío	Descripción
Geomecánica	Estabilidad del macizo rocoso	Calibrar el comportamiento del terreno y anticipar la subsidencia y otros eventos críticos para optimizar el diseño minero y garantizar la seguridad.
Fragmentación	Control de fragmentación	Mejorar la predictibilidad de la fragmentación y ajustar los métodos de extracción para aumentar la productividad, considerando la variabilidad litológica.
Automatización	Automatización de procesos	Desarrollar tecnologías avanzadas que permitan la automatización de procesos en áreas críticas como perforación, tronadura y carguío, mejorando la seguridad y reduciendo costos operativos.
Fracturamiento	Fracturamiento hidráulico	Incorporar el fracturamiento hidráulico como una técnica para mejorar la eficiencia del <i>caving</i> , reduciendo la sismicidad inducida y mejorando la productividad en sectores con alta resistencia del macizo rocoso.
Sismicidad	Monitoreo y control de eventos sísmicos	Implementar sistemas avanzados de monitoreo en tiempo real para detectar patrones sísmicos y mitigar el riesgo de eventos catastróficos.
Diseño minero	Optimización de mallas de explotación	Evolucionar el diseño de las mallas para optimizar la extracción de mineral, considerando las diferencias geológicas entre los sectores.
Reparaciones de infraestructura	Optimizar el proceso	La reparación de infraestructura debe ser considerado como una operación básica necesaria para llevar un “caving” ordenado.



Categoría	Desafío	Descripción
Construcción	Mejora de los piques de traspaso de mineral	Optimizar el diseño y la construcción de piques para mejorar la eficiencia del traspaso de mineral y reducir los tiempos muertos asociados a su mantenimiento.
Mantenimiento	Mantenimiento predictivo de túneles y galerías	Implementar sistemas de mantenimiento predictivo para reducir fallas en túneles y galerías, asegurando la continuidad operativa y la seguridad en las zonas de producción y desarrollo.
Riesgos operacionales	Control del agua y polvo en las operaciones subterráneas	Gestionar el bombeo de agua y polvo en las operaciones, que representan riesgos operacionales significativos en minería subterránea, afectando la visibilidad, la salud de los trabajadores y la eficiencia de los equipos.
Innovación tecnológica	Preacondicionamiento y reducción secundaria para mejorar la eficiencia del <i>caving</i>	Implementar el preacondicionamiento del terreno y técnicas de reducción secundaria para mejorar la eficiencia de los procesos de hundimiento y extracción.