LITORALPRESS

Fecha: 18-07-2025
Medio: Revista Minería Chilena
Supl. : Revista Minería Chilena
Tipo: Noticia general
Título: Minería subterránea: un modelo en profundo crecimiento

Pág. : 10
Cm2: 563,0

Tiraje: Sin Datos
Lectoría: Sin Datos
Favorabilidad: No Definida

Reportaje

Minería subterránea:

Un modelo en profundo crecimiento

El agotamiento de los yacimientos superficiales impulsa la búsqueda de nuevas formas de operar, un objetivo en el que la tecnología resulta un relevante aliado.

LITORALPRESS

Fecha: 18-07-2025
Medio: Revista Minería Chilena
Supl. : Revista Minería Chilena
Tipo: Noticia general
Título: Minería subterránea: un modelo en profundo crecimiento

Pág. : 11
Cm2: 490,7

Tiraje: Sin Datos
Lectoría: Sin Datos
Favorabilidad: No Definida

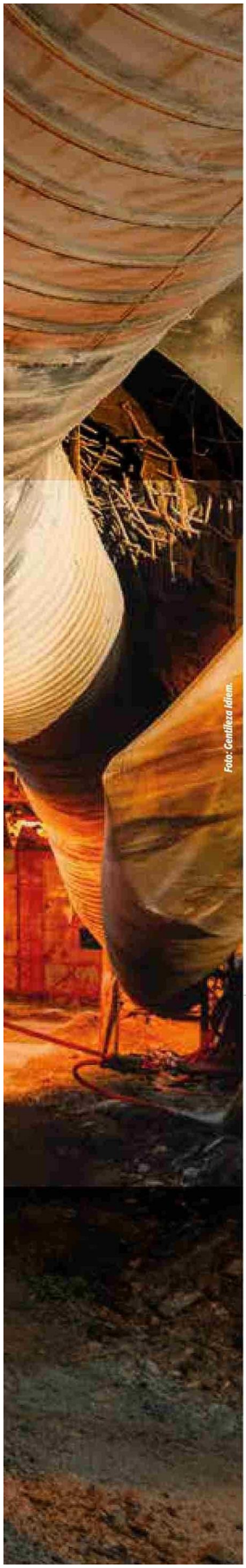
Foto: Gentileza Idiem.

Acceder a yacimientos de mayor ley de mineral explica el avance de la minería subterránea.

Una serie de beneficios en materia geológica y ambiental explican el avance de la minería subterránea a nivel global. Entre estos factores Reinaldo Salazar, gerente de Estudios de Sonami, identifica "el agotamiento progresivo de los yacimientos superficiales, el interés por reducir la huella ambiental y la necesidad de acceder a mineralizaciones profundas. Desde una perspectiva de desarrollo, también se presenta como una oportunidad para diversificar la actividad en regiones mineras y generar empleo de largo plazo en zonas alejadas".

"Las grandes compañías han liderado esta transición gracias a su mayor capacidad financiera, tecnológica y organizacional. Cuentan con estructuras robustas que les permiten dedicar equipos especializados a temas como geomecánica, automatización o planificación avanzada. Esto les da margen para implementar pilotos tecnológicos, como ocurrió en el sector Esmeralda de El Teniente, donde se probaron tecnologías autónomas sin comprometer el resultado global de la operación", menciona.

En cambio, "las medianas y pequeñas faenas enfrentan importantes barreras para adoptar este tipo de minería: altos costos de entrada, complejidad técnica, necesidad de financiamiento e infraestructura especializada. Estas brechas se acentúan a medida que aumenta la profundidad de los desarrollos", afirma Salazar.

Respecto a esta dinámica operacional, el doctor Manuel Cánovas, académico del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Minas de la Universidad Católica del Norte (UCN), y director del Magíster en Ciencias de la Ingeniería Minera de esta misma casa de estudios, menciona que "actualmente, la producción de mineral mundial por minería subterránea supera ligeramente el 10%. Sin embargo, está previsto que este porcentaje aumente considerablemente en los próximos años, tendencia que se replicará a nivel nacional. En países como Australia, Sudáfrica, Indonesia o Chile vemos un crecimiento de la minería masiva subterránea, que podemos asociar a métodos de hundimiento, y que persigue conseguir producciones cercanas a las de minería a cielo abierto a unos costos de producción similares".

Esto es complementado por Ricardo Flores, gerente de Desarrollo en Idiem, quien declara que "alcanzar yacimientos de mayor ley de mineral es la consigna. Los yacimientos de superficie hoy son escasos o de menor ley, por lo que nos queda buscar los preciados materiales en las profundidades de la tierra; el mejor ejemplo de ello es Chuquicamata, que comenzó como rajo y avanza en la operación subterránea".

Resalta que "trabajar en profundidad tiene mayores costos, por la complejidad y el volumen de material que se debe remover, por eso se debe buscar el equilibrio adecuado entre costos de producción y valor de venta sin descuidar la seguridad o riesgos operativos", haciendo hincapié en que "el desarrollo de la tecnología y la energía facilitan la ecuación, reduciendo costos de las operaciones subterráneas; además, se han mejorado técnicas de extracción de materiales como son el block caving que aprovecha la gravedad".

Avance operativo

El profesor Cánovas explica que "gracias a que contamos con técnicas de prospección cada vez más sofisticadas y que permiten alcanzar mayores profundidades, como la geofísica, los yacimientos que se descubren se encuentran a mayores profundidades, de manera que no son rentables de ser extraídos mediante minería a cielo abierto. Podemos poner los ejemplos de la mina Oyu Tolgoi en Mongolia (entró en producción en 2023) o la mina Resolution en USA (será la explotación de block caving más profunda del mundo a más de 2.000 metros bajo la superficie)".

"De igual forma, grandes yacimientos que se han explotado, o se están explotando, a cielo abierto como Chuquicamata, Grasberg (Indonesia), Palabora (Sudáfrica) o

LITORALPRESS

Fecha: 18-07-2025
Medio: Revista Minería Chilena
Supl. : Revista Minería Chilena
Tipo: Noticia general
Título: Minería subterránea: un modelo en profundo crecimiento

Pág. : 12
Cm2: 478,1

Tiraje: Sin Datos
Lectoría: Sin Datos
Favorabilidad: No Definida

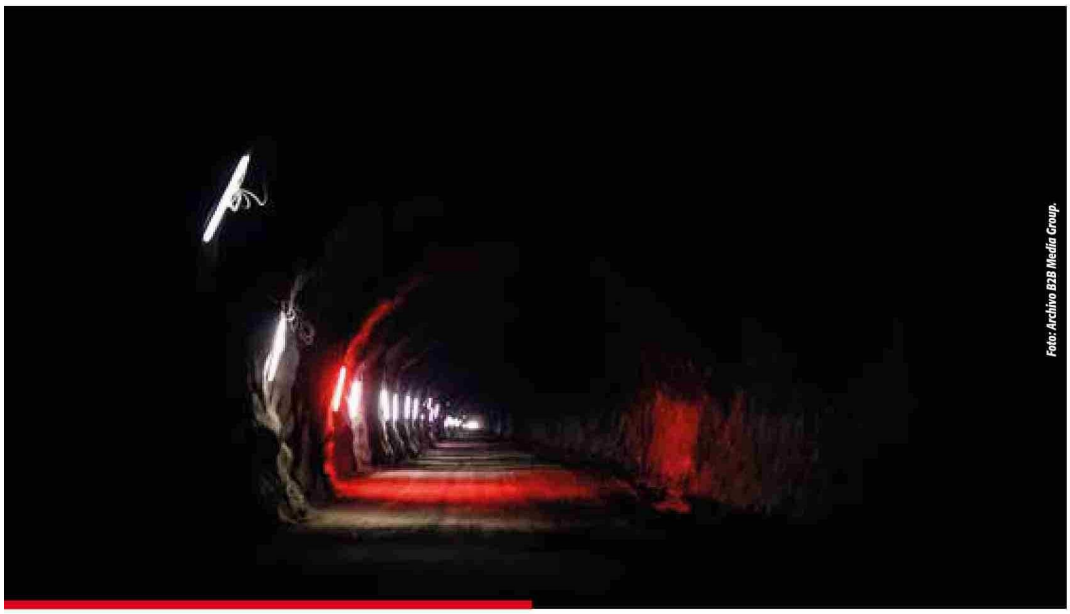

Foto: Archivo B2B Media Group.

El trabajo en profundidad implica una serie de desafíos técnicos para los trabajadores y la operación.

Bingham Canyon (USA) se encuentran en transición a grandes operaciones subterráneas mediante minería por hundimiento. Este hecho se debe al aumento de los costos de transporte y movimiento de material por el aumento de la ratio estéril/mineral al aumentar la profundización del rajo", relata el académico de la UCN.

Esto es complementado por Yesenia Marulanda, directora de Ingeniería Civil en Minería de la Universidad del Desarrollo (UDD), quien expone que "empresas como BHP, Rio Tinto y Codelco han consignado en sus reportes que el futuro de la producción minera dependerá cada vez más de operaciones subterráneas bien diseñadas y gestionadas. Además, este tipo de minería ofrece ventajas ambientales significativas, ya que reduce la huella en superficie, minimiza el movimiento de tierras y permite un mejor control de emisiones, aspectos críticos en un contexto de creciente presión regulatoria y demanda de sostenibilidad", añade.

Prevención y gestión

En tanto, Ricardo Flores recalca que "la operación subterránea tiene la complejidad de la seguridad, por la estabilidad del macizo. Además, de la logística asociada para movilizar recursos, desde el agua a la ventilación", aunque destaca el hecho que "el desarrollo de la ingeniería hoy nos permite construir prácticamente en cualquier lugar y la tecnología aporta significativamente a la seguridad de los procesos. Comenzando con los modelos digitales y la realidad virtual o aumentada, que nos permiten simular y analizar a distancia, el desarrollo y masificación de los sensores que facilitan el monitoreo de deformaciones o vibraciones en tiempo real, con modelos de datos que son capaces de anticipar eventos y generar alertas, hasta el uso de robots y drones que permiten realizar labores con presencia mínima o cero de personas".

Por su lado, el doctor Cánovas añade técnicas como "la emisión acústica, que nos permiten conocer el campo de esfuerzos. El monitoreo sísmico mediante redes de geófonos es una estrategia necesaria para conocer la localización y magnitud de los eventos. Igualmente, la elección de la mejor estrategia de fortificación, es decir, qué elementos voy a usar, es crucial para disipar la energía procedente del macizo y asegurar la estabilidad de las labores".

El académico de la UCN considera que "la ventilación es otro aspecto clave, que además representa un porcentaje muy importante de los costos de producción. Los requerimientos de ventilación aumentan con la profundidad y el tamaño de

> **Se presenta** como una oportunidad **para diversificar la actividad en regiones mineras y generar empleo de largo plazo** en zonas alejadas", Reinaldo Salazar.

LITORALPRESS

Fecha: 18-07-2025
Medio: Revista Minería Chilena
Supl. : Revista Minería Chilena
Tipo: Noticia general
Título: **Minería subterránea: un modelo en profundo crecimiento**

Pág. : 13
Cm2: 519,6

Tiraje: Sin Datos
Lectoría: Sin Datos
Favorabilidad: No Definida

Foto: Gentileza Sonami.

Foto: Gentileza UCN.

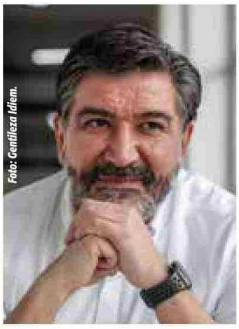
Foto: Gentileza Idiem.

Foto: Gentileza UDD.

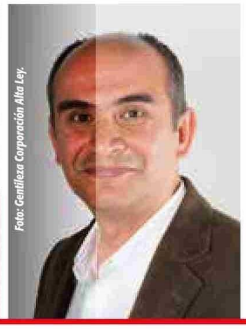
Foto: Gentileza Corporación Alta Ley.

Foto: Gentileza USS.

De Izq. a Der.: Reinaldo Salazar, gerente de Estudios de Sonami.

Manuel Cánovas, académico del Departamento de Ingeniería Metalúrgica y Minas de la UCN.

Ricardo Flores, gerente de Desarrollo en Idiem.

Yesenia Marulanda, directora de Ingeniería Civil en Minería de la Universidad del Desarrollo.

Guillermo Olivares, Líder de Proyectos Mineros de la Corporación Alta Ley.

César Arredondo, director de Ingeniería Civil en Minas y Geología Facultad de Ingeniería de la Universidad San Sebastián.

las minas. El empleo de ventilación bajo demanda (VoD) está consiguiendo reducir los costos y hacer que sea una operación mucho más segura y eficiente respecto al consumo de electricidad. Además, el uso de equipos eléctricos que elimina la generación de gases de combustión de los motores diésel genera entornos de trabajo más seguros". Junto con resaltar "otras tecnologías como iniciadores de explosivos inalámbricos, explosivos más potentes y con menor generación de gases, equipos autónomos, uso de drones y tecnologías láser escáner, etc., que hacen que la minería subterránea de hoy sea una operación segura, eficiente y respetuosa con el medio ambiente".

A ello se alinea la voz de la profesora Marulanda, quien destaca que "la automatización y la teleoperación de equipos LHD y perforadoras, implementadas por líderes como Vale y Anglo American, están permitiendo operar en entornos complejos con menor riesgo humano y mayor eficiencia".

Al mismo tiempo, "tecnologías de geolocalización, sensores IoT y drones subterráneos permiten monitorear en tiempo real la estabilidad de las labores, anticipando riesgos geotécnicos".

En definitiva, "el futuro de la minería subterránea ya no depende únicamente de asumir mayores riesgos, sino de integrar innovación, planificación estratégica y gestión responsable", concluye la académica de la UDD.

Rol de la tecnología

Reinaldo Salazar asegura que "la automatización, la operación semi-autónoma y el uso de tecnologías teleremotas están transformando la forma en que se opera en minería subterránea. Por ejemplo, los martillos picadores controlados a distancia y los sistemas de carguío automatizados permiten operar en zonas de mayor riesgo sin exponer directamente al personal".

Asimismo, "la implementación de Centros Integrados de Operaciones ha permitido centralizar el monitoreo y la toma de decisiones en tiempo real, mejorando la eficiencia operacional y reduciendo los tiempos de respuesta frente a incidentes. Estas soluciones no sólo incrementan la productividad, sino que son fundamentales para enfrentar los desafíos de seguridad que impone el trabajo a gran profundidad", añade.

Al respecto, menciona que "en algunas faenas de gran escala, se han habilitado sectores específicos para probar nuevas tecnologías sin comprometer la operación completa. Es el caso del sector Esmeralda en El Teniente, donde se ensayaron tecnologías autónomas como parte de una estrategia gradual de implementación".

Otra visión considerada en este reportaje es la de Cé-

> **En países** como Australia, Sudáfrica, Indonesia o Chile, **vemos un crecimiento de la minería masiva subterránea",** Manuel Cánovas

LITORALPRESS

Fecha: 18-07-2025
Medio: Revista Minería Chilena
Supl. : Revista Minería Chilena
Tipo: Noticia general
Título: **Minería subterránea: un modelo en profundo crecimiento**

Pág. : 14
Cm2: 478,6

Tiraje: Sin Datos
Lectoría: Sin Datos
Favorabilidad: No Definida

Un factor relevante es el conocimiento del macizo rocoso.

sar Arredondo, director de Ingeniería Civil en Minas y Geología Facultad de Ingeniería de la Universidad San Sebastián (USS), quien aterriza que "la automatización y la robótica han tenido un impacto significativo. Un ejemplo de aquello es el uso de vehículos autónomos o telecomandados en equipos como cargadores LHD y de perforación, además, reduce la exposición de los operadores a zonas de alto riesgo. A esto se suma la incorporación de sensores IoT, que permiten el monitoreo en tiempo real mediante la recolección de datos sobre estabilidad de túneles, deformaciones, calidad del aire y desempeño de los equipos. Esta información posibilita el análisis predictivo, la simulación de operaciones y la optimización de procesos. También se ha extendido el uso de drones y sistemas robóticos para la inspección de áreas inaccesibles o inestables, sin necesidad de exponer al personal".

De igual forma, Guillermo Olivares, Líder de Proyectos Mineros de la Corporación Alta Ley, advierte que la profundización de las minas subterráneas implica importantes desafíos de diversa naturaleza paras las compañías mineras.

"Para reducir la exposición de los trabajadores a condiciones riesgosas (riesgos de colapsos, ventilación limitada, material particulado, oscilaciones térmicas, etc.), mantener la continuidad operacional e incrementar la productividad; se viene trabajando hace algunos años en proyectos de automatización y teleoperación de equipos como perforadoras, martillos picadores, LHD, camiones de bajo perfil, etc.", detalla Olivares.

Por otra parte, "la minería digital y analítica avanzada, como, por ejemplo, el uso de sensores y los sistemas de monitoreo en tiempo real, permiten desarrollar una mejor comprensión del comportamiento del macizo rocoso y la estabilidad local de cada unidad de explotación y a nivel de todo el yacimiento. En este ámbito, los sistemas de modelamiento y el análisis predictivo apoyan la toma de decisiones de las áreas de geomecánica y diseño y planificación minera de las operaciones, para anticiparse a fallas geotécnicas y colapsos, como, por ejemplo, los estallidos de roca. Adicionalmente, se vienen desarrollando hace bastante tiempo innovaciones en elementos de fortificación como pernos, mallas y shotcrete junto con sistemas de monitoreo sísmico, de deformaciones y presión de roca que ayudan a gestionar mejor los riesgos asociados a la profundidad", enuncia el profesional de Alta Ley.

A ello se suma la incorporación de robots, drones y vehículos no tripulados que se utilizan para levantamientos topográficos in-

> **Trabajar** en profundidad tiene mayores costos, **por la complejidad y el volumen de material que se debe remover"**, Ricardo Flores

LITORALPRESS

Fecha: 18-07-2025
Medio: Revista Minería Chilena
Supl. : Revista Minería Chilena
Tipo: Noticia general
Título: Minería subterránea: un modelo en profundo crecimiento

Pág. : 15
Cm2: 473,1

Tiraje: Sin Datos
Lectoría: Sin Datos
Favorabilidad: No Definida

terior mina, inspección de zonas inaccesibles o de alto riesgo, evitando exponer al personal.

Guillermo añade que "se dispone de sistemas de monitoreo que también pueden contribuir a mejorar la comprensión del desempeño de los sistemas de ventilación, las condiciones ambientales en profundidad, sumado a la implementación de sistemas predictivos para prevenir fallas de equipos y maximizar la disponibilidad y utilización de activos".

Además de destacar el trabajo que vienen desarrollando las compañías de la gran y mediana minería con operaciones subterráneas en Chile, para incorporar equipos mineros y utilitarios eléctricos, lo que permitiría reducir los flujos de aire y los desarrollos de túneles asociados a los circuitos de ventilación.

En ese contexto, Olivares recuerda que se han desarrollado proyectos que consideran sistemas de transporte continuo como correas transportadoras subterráneas y diseños que incorporan la eficiencia energética y el uso de energías renovables, complementado con sistemas de respaldo energético híbridos.

De igual forma, se han introducido tecnologías de comunicación subterránea para mejorar el monitoreo, control y seguridad de las operaciones, como también se ha mejorado el estándar en vías de escape, refugios mineros y la utilización de dispositivos electrónicos insertos en los elementos de protección personal de los trabajadores para su ubicación en tiempo real en interior mina.

"En cada una de las implementaciones y proyectos tecnológicos asociados a desafíos de la profundización de la minería subterránea, las compañías mineras han invertido esfuerzos importantes en el desarrollo de competencias y capacitación del capital humano. La tecnología también ha jugado un rol importante en las capacitaciones y entrenamientos", afirma el vocero de Alta Ley.

En este escenario, advierte que "si bien se observan esfuerzos importantes para incorporar tecnologías y modalidades de operación ante la profundización de las minas subterráneas de la gran y mediana minería chilenas, existen desafíos equivalentes que deberían motivar de manera urgente, la implementación de tecnologías, modalidades de operación y buenas prácticas en las operaciones subterráneas de la pequeña minería, con un foco prioritario en seguridad laboral y productividad". mch

> **El futuro** de la minería subterránea ya no depende únicamente de **asumir mayores riesgos, sino de integrar innovación, planificación estratégica y gestión responsable"**, Yesenia Marulanda

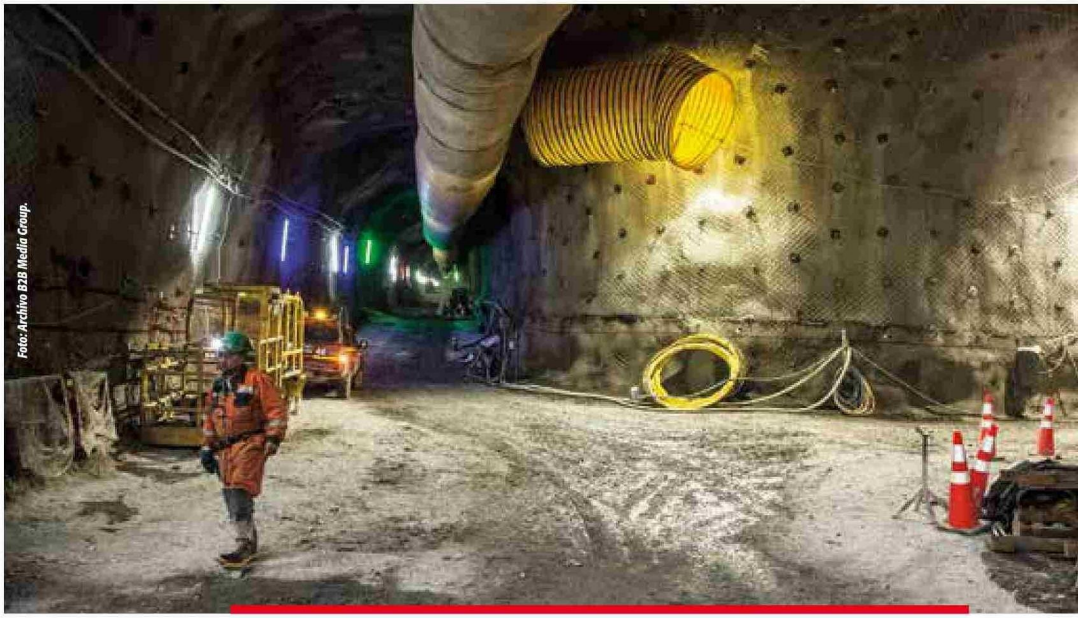
Foto: Archivo B2B Media Group.

La ventilación representa un porcentaje relevante de los costos de producción.