



CRITERIOS GEOLÓGICOS Y TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN LA VIABILIDAD,
EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN DE YACIMIENTOS A CIELO ABIERTO

Geological criteria and emerging technologies in the feasibility, exploration, and evaluation of
open-pit deposits

Elías Camilo Brun Mercado

Monografía

Asesora

Mónica Saldarriaga Echeverri

Universidad EAFIT

Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería

Programa de Geología

Medellín, Colombia

2025

CONTENIDO

	Pág.
RESUMEN	4
ABSTRACT	5
1. INTRODUCCIÓN.....	6
2. CRITERIOS GEOLÓGICOS DE VIABILIDAD	8
2.1 GEOMETRÍA DEL YACIMIENTO.....	8
2.2 PROFUNDIDAD DEL YACIMIENTO	10
2.3 ESTABILIDAD GEOMECÁNICA.....	11
2.4 TAMAÑO DEL DEPÓSITO Y LEY MINERAL.....	13
3. TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN DE DEPÓSITOS	16
3.1 TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN LA EXPLORACIÓN MINERA.....	16
3.2 TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN LA EVALUACIÓN DE DEPÓSITOS	18
4. CONCLUSIONES.....	22
5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	23

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. <i>Incremento de relación estéril-mineral a medida que la profundidad aumenta.</i>	8
Figura 2. <i>Ilustración de un pilar de corona entre una mina a cielo abierto y una mina subterránea.</i>	10
Figura 3. <i>Rango de valores de fos aceptable.</i>	12
Figura 4. <i>Mina de hierro dagushan a cielo abierto en la ciudad de luanzhou, provincia de hebei, china.</i>	13
Figura 5. <i>Configuración de magnetometría aérea con drones para estudios geofísicos.</i>	17
Figura 6. <i>Escaneo hiperspectral de núcleos de perforación con realidad aumentada.</i>	19
Figura 7. <i>Resultados del software 3dec de itasca en los hololens2.</i>	21

RESUMEN

El desarrollo minero se orienta hacia procesos de exploración y evaluación más precisos, sostenibles y apoyados en tecnologías avanzadas que permitan optimizar la extracción de recursos. En este marco, el trabajo examina los principales criterios geológicos que determinan la viabilidad de explotar un yacimiento mediante minería a cielo abierto, así como las innovaciones que transforman su análisis y gestión. Se consideran factores clave como la geometría del depósito (forma, espesor y orientación), la profundidad y su efecto en la relación estéril/mineral, la estabilidad geomecánica del macizo rocoso y la ley (tamaño del recurso y tenor). Además, los aspectos operativos (taludes, drenaje, botaderos y restricciones ambientales/sociales). En el ámbito tecnológico, se destacan avances que incrementan la precisión y reducen la incertidumbre: teledetección satelital y aérea mediante drones, escaneo hiperspectral de testigos y digitalización del *core logging*, modelamiento geológico 3D, y planificación de tajos con diseños paramétricos que integran criterios geotécnicos, costos y condicionantes ambientales. La inteligencia artificial (IA) y el aprendizaje automático apoyan la estimación de leyes y la optimización de fases y secuencias de minado. En la evaluación económica, las simulaciones Monte Carlo y modelos estocásticos permiten cuantificar el riesgo del valor presente neto (VPN) bajo variabilidad geológica y de precios. Asimismo, realidad virtual y aumentada fortalecen la comunicación técnica y la comprensión espacial de los modelos. En conjunto, la integración de criterios geológicos con herramientas digitales convierte la evaluación de depósitos en un proceso más preciso, dinámico y responsable.

Palabras clave: Minería a cielo abierto; Viabilidad de yacimientos; Evaluación de yacimientos; Tecnologías mineras emergentes.

ABSTRACT

Mining development is moving toward more precise, sustainable, and technology-driven exploration and evaluation processes that optimize resource extraction. Within this framework, this study examines the main geological criteria that determine the feasibility of exploiting a deposit through open-pit mining, as well as the innovations transforming its analysis and management. Key factors are considered, including deposit geometry (shape, thickness, and orientation), depth and its effect on the waste-to-ore ratio, geomechanical stability of the rock mass, and ore grade (resource size and tenor). Operational aspects such as slope design, drainage, waste dumps, and environmental/social constraints are also analyzed. In the technological field, advances that increase precision and reduce uncertainty are highlighted: satellite and drone-based remote sensing, hyperspectral core scanning and digital core logging, 3D geological modeling with continuous updates, and open-pit planning with parametric designs that integrate geotechnical, cost, and environmental constraints. Artificial intelligence (AI) and machine learning support the delineation of favorable zones, grade estimation, and optimization of mining phases and extraction sequences. In economic evaluation, Monte Carlo simulation and stochastic approaches allow quantifying Net Present Value (NPV) risk under geological and price variability. Finally, virtual and augmented reality enhance technical communication and spatial understanding of geological models. Overall, the integration of geological criteria with digital tools makes deposit evaluation a more precise, dynamic, and responsible process.

Keywords: Open-pit mining; Deposit feasibility; Deposit evaluation; Emerging mining technologies

1. INTRODUCCIÓN

La creciente demanda de recursos minerales ha impulsado la exploración y explotación de yacimientos de mayor extensión y menor ley, motivando el desarrollo de nuevas estrategias y tecnologías que optimicen la extracción y el aprovechamiento de estos recursos. La minería a cielo abierto (*open pit*) se ha consolidado como el método preferido para explotar depósitos de gran volumen cercanos de la superficie, debido a su alta capacidad de producción y a sus costos más bajos en comparación con la minería subterránea (Paty & Samanta, 2025). Sin embargo, la decisión de desarrollar un yacimiento mediante este método no es trivial, pues depende de un análisis muy profundo de diversos criterios geológicos y técnicos. Un diseño inadecuado puede resultar inviable en términos económicos o ambientales y, a largo plazo, generar consecuencias financieras o sociales negativas (Torres & Rodríguez, 2022).

Desde una perspectiva geológica, factores como la forma y orientación del depósito, su profundidad con respecto al terreno, la resistencia y estabilidad de las rocas encajantes, así como el tamaño del recurso y la concentración del mineral (ley), constituyen parámetros clave de la viabilidad de una mina a cielo abierto (Alemayehu et al., 2025; Li et al., 2022). Un caso ilustrativo se observa en los yacimientos con geometrías predominantemente verticales o muy profundas, que suelen descartarse para este tipo de explotación debido a los grandes volúmenes de material estéril que deben removerse para acceder al mineral de interés, lo que vuelve la operación económicamente inviable (Salu et al., 2024). En contraste, los cuerpos mineralizados horizontalmente o cerca de la superficie presentan condiciones mucho más favorables para su explotación superficial. Asimismo, las propiedades geotécnicas del macizo rocoso determinan la pendiente máxima de las paredes del tajo; mientras más competentes las rocas se pueden tener taludes más verticales, mientras que en terrenos fracturados o débiles se requieren ángulos de talud más bajos por su estabilidad, lo que aumenta el volumen de estéril a transportar (Liu et al., 2024; Tsevegmid et al., 2025). Si el terreno resulta demasiado inestable, la explotación a cielo abierto puede quedar descartada por razones de seguridad (Li et al., 2022).

Además de los aspectos estructurales y geomecánicos, la relación entre el tonelaje del yacimiento y la ley del mineral también desempeña un papel decisivo en su viabilidad. Los depósitos de gran tamaño, pero baja ley, como pueden ser algunos pórfidos cupríferos, generalmente solo puede

explotarse de manera rentable a cielo abierto, compensando la baja concentración de metal con altos volúmenes de producción (Ahmadi, 2018). En cambio, los yacimientos pequeños, pero de alta ley suelen ser más adecuados para minería subterránea, dado que permiten una extracción más selectiva del mineral valioso. Esta relación económico-geológica refleja que la minería a cielo abierto tiende a maximizar el aprovechamiento de grandes volúmenes con bajas leyes, mientras que la minería subterránea se orienta a extraer menores volúmenes con leyes más altas (Badakhshan et al., 2024; Li et al., 2025).

Por otra parte, la decisión entre optar por minería a cielo abierto o subterránea también está influenciada por factores geológicos adicionales y consideraciones ambientales. La presencia de agua subterránea, por ejemplo, puede condicionar la viabilidad de la mina bien sea a cielo abierto o subterránea, ya que la necesidad de bombeo constante (drenaje) para mantener seca la mina puede encarecer y complejizar la operación (Henríquez, 2019). Así mismo, si la relación estéril/mineral (stripping ratio) excede el índice de desmonte, la mina a cielo abierto deja de ser rentable (Lin, 2024). Cuando la proporción de material que debe removerse es demasiado alta en comparación con el mineral útil, o cuando la estabilidad geomecánica del terreno es deficiente, es preferible recurrir a métodos subterráneos (Li, 2025; Liu et al., 2024). Además, factores como la capacidad de disponer del estéril en botaderos seguros y el impacto ambiental en la superficie como su cercanía a zonas pobladas o ecosistemas sensibles, pueden ser determinantes en la elección del método de explotación (Cacciuttolo et al., 2023; Vriens et al., 2020).

De manera general, la evaluación de la viabilidad de un yacimiento para su explotación a cielo abierto exige la integración de diversos factores geológicos, junto con los análisis económicos y ambientales correspondientes. En este contexto, las tecnologías emergentes representan un avance en la exploración y evaluación de depósitos minerales. La incorporación de herramientas como la teledetección satelital e hiperespectral, el uso de drones equipados con sensores geofísicos, el modelamiento geológico 3D, los algoritmos de inteligencia artificial y las simulaciones estocásticas permiten mejorar la precisión en la caracterización del subsuelo y optimizar la toma de decisiones. Estas innovaciones reducen la incertidumbre en la estimación de recursos, aceleran los procesos de descubrimiento y fomentan una minería más predictiva, segura y sostenible (Dumakor-Dupey & Arya, 2021; Thiele et al., 2024; Eitzenberger et al., 2024).

La consideración conjunta de estos aspectos permite establecer el método de explotación más apropiado. En este marco, la pregunta que orienta el presente trabajo es: ¿cuáles son los criterios geológicos que determinan la viabilidad de un yacimiento para su explotación a cielo abierto y de qué manera las tecnologías emergentes están transformando los procesos de exploración y evaluación de estos depósitos?

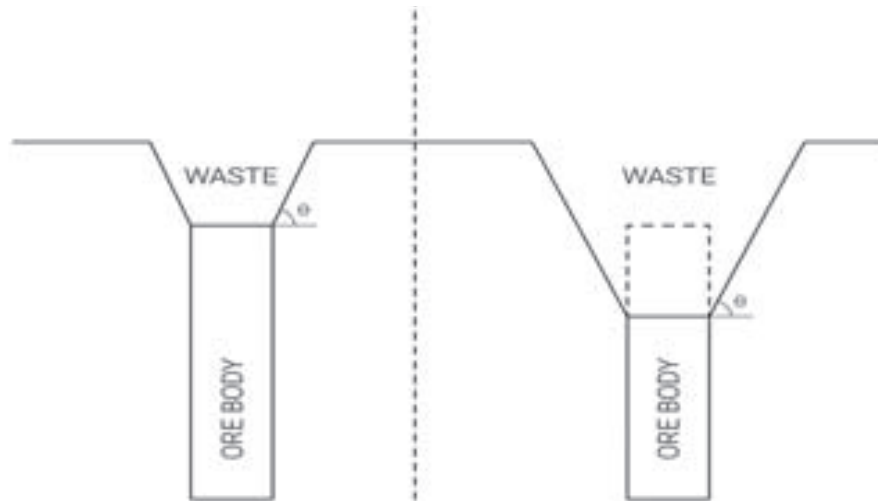
A partir de ello, el siguiente contenido profundiza en los principales criterios geológicos que intervienen en la determinación de la viabilidad minera y, posteriormente, en las tecnologías emergentes que están transformando la exploración y evaluación de los depósitos minerales.

2. CRITERIOS GEOLÓGICOS DE VIABILIDAD

2.1 GEOMETRÍA DEL YACIMIENTO

La forma y disposición espacial del cuerpo mineral es uno de los criterios geológicos primordiales para determinar su aprovechamiento a cielo abierto. La geometría del yacimiento (espesor, extensión horizontal y orientación) condiciona directamente el volumen de roca estéril que habría que remover para exponer el mineral. En términos generales, depósitos con geometrías tabulares horizontales o subhorizontales son ideales para minería a cielo abierto (Parra et al., 2018; Li et al., 2025). Un ejemplo típico son las capas de carbón o los mantos de hierro, que se extienden paralelos a la superficie; en estos casos, se puede avanzar retirando estrato por estrato desde la superficie, accediendo a grandes porciones del mineral con una relación estéril/mineral razonable. Por el contrario, cuerpos mineralizados de forma tubular o tabular vertical (como diques o vetas estrechas que se hundan en profundidad) presentan serias dificultades para su explotación superficial (Bakhtavar et al., 2009). En tales situaciones, intentar llegar al fondo del yacimiento mediante un tajo implicaría excavar una enorme cantidad de roca circundante, aumentando exponencialmente el volumen de estéril (*ver figura 1*). De hecho, para depósitos con fuerte inclinación o verticalidad, la minería subterránea suele ser la única opción técnica y económicamente factible (Li et al., 2025; Bakhtavar et al., 2009).

Figura 1. *Incremento de relación estéril-mineral a medida que la profundidad aumenta.*



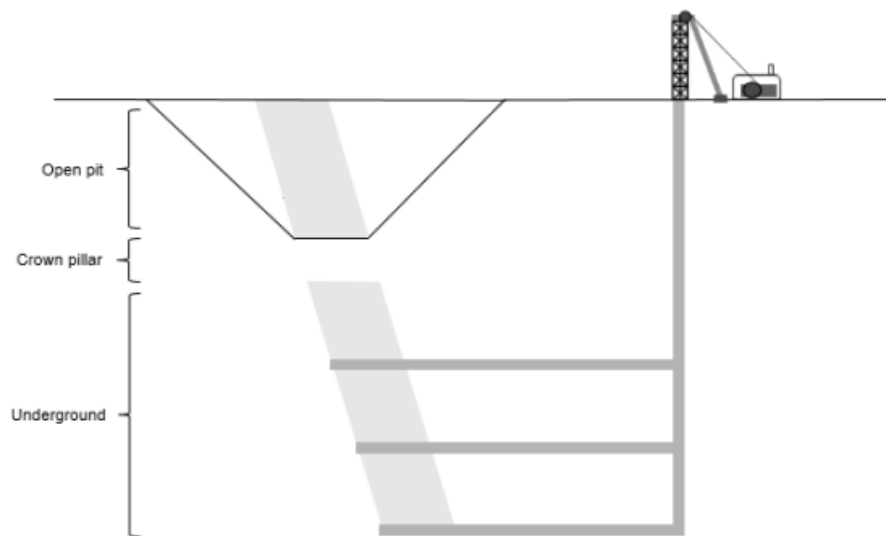
Fuente: Motta et al. (2019).

Según Mijalkovski et al. (2022), la geometría natural del depósito mineral junto con la distribución de la ley y las propiedades mecánicas del macizo rocoso son parámetros fundamentales que condicionan el método de excavación aplicable; esto refuerza la idea de que la ingeniería debe adaptarse a la forma del depósito, pues tales condiciones geológicas no pueden alterarse. Por ello, las minas a cielo abierto se diseñan con bancos y terrazas siguiendo el contorno del cuerpo mineral. Cuando el depósito tiene una forma irregular o presenta ramificaciones, la eficiencia de la extracción superficial disminuye, pues quedan zonas mineralizadas inaccesibles sin un incremento desproporcionado del estéril (Pirbalouti & Nasab, 2024). En cambio, en depósitos con bajo ángulo y formas simples y continuas (por ejemplo, un solo cuerpo masivo subhorizontal), el tajo puede planificarse de manera optimizada para exponer la mayor cantidad de mineral con el mínimo de material estéril y, en consecuencia, aumentar la rentabilidad de la minería (Abdellah et al., 2022). En resumen, la configuración geométrica del yacimiento determina el “esfuerzo” minero necesario para descubrirlo desde la superficie: geometrías favorables permiten tajos más profundos y concentrados, mientras que geometrías desfavorables pueden hacer inviable la mina a cielo abierto desde etapas muy tempranas del análisis de factibilidad (Alemayehu et al., 2025; Nancel-Penard et al., 2025).

2.2 PROFUNDIDAD DEL YACIMIENTO

La profundidad a la que se encuentra el cuerpo mineral bajo la superficie representa un factor geológico crítico. En igualdad de condiciones, mientras más superficial esté el yacimiento, más viable será su explotación a cielo abierto. Muchos depósitos que afloran o están a pocos metros de profundidad han sido desarrollados mediante tajos abiertos, por la sencillez de acceso al mineral. A medida que aumenta la profundidad del depósito, crece exponencialmente el volumen de roca estéril que debe removerse desde la superficie para alcanzar el mineral deseado, llegando a un umbral donde la minería a cielo abierto deja de ser viable. Existe por tanto una profundidad límite, más allá de la cual la mina a cielo abierto deja de ser práctica (Badakhshan et al., 2024; Chung, 2016). En ese punto, la viabilidad económica disminuye debido al incremento de los costos operativos; por ello, para extraer la parte más profunda de las reservas minerales, se requiere reducir los costos de la minería a cielo abierto o bien recurrir a la explotación subterránea (ver figura 2) (Salehi A et al., 2025).

Figura 2. Ilustración de un pilar de corona entre una mina a cielo abierto y una mina subterránea.



Fuente: Whittle et al. (2015).

En la práctica minera, se han establecido criterios para decidir hasta qué profundidad continuar con un tajo antes de pasar a métodos subterráneos. En algunos casos, una misma mineralización se explota primero a cielo abierto hasta cierta cota y luego se continúa por minería subterránea cuando la relación estéril/mineral se vuelve desfavorable en los niveles inferiores, a esto se le conoce como

minería combinada. A nivel mundial, existen algunas minas con potencial para realizar la transición, o que ya se han realizado, como Kanowna Belle en Australia Occidental, Chuquicamata en Chile, Grasberg en Indonesia y Sunrise Dam en Australia Occidental (Chung, 2016).

Depósitos localizados cerca de la superficie son buenos candidatos para minería a cielo abierto (Henríquez D, 2019). Si el techo del yacimiento (su parte superior) está a la vista o a poco cubierto de suelo, la extracción superficial suele ser la opción principal. Conforme la mineralización se hunde más (varios cientos de metros), la única manera de acceder a ella sin remover millones de toneladas de estéril es a través de rampas o túneles (Ren et al., 2022; Henríquez D, 2019).

En síntesis, la profundidad impacta directamente en el balance entre el mineral obtenido y el estéril extraído. A una mayor profundidad se debe remover mayores cantidades de estéril, pudiendo llegar a un punto en que el proyecto ya no genera utilidad (Ren et al., 2022; Khaboushan et al., 2020). Este criterio geológico-geométrico es, por tanto, esencial en la decisión de viabilidad de minas a cielo abierto.

2.3 ESTABILIDAD GEOMECÁNICA

La estabilidad del terreno y las características geomecánicas de las rocas encajantes del yacimiento constituyen un criterio de viabilidad geológico y técnico a la vez. Una mina a cielo abierto implica crear un vacío de grandes dimensiones (el tajo) rodeado de paredes rocosas de alturas considerables. La capacidad de esas paredes para sostenerse sin colapsar depende de la resistencia intrínseca de las litologías, de la presencia de fracturas, fallas o planos de debilidad, y de las condiciones de presión y agua en los poros de la roca. Si las rocas son competentes (duras, masivas y con poca fracturación), es posible diseñar taludes más empinados, grandes y complejos, lo cual reduce la cantidad de estéril a remover para alcanzar profundidades mayores (Nizametdinov et al., 2025; Chen et al., 2025). En cambio, en rocas blandas o intensamente fracturadas, es propensa a ablandarse y desintegrarse cuando se expone al agua, los ángulos de talud deben ser menos verticales para garantizar la estabilidad, lo que puede incrementar notablemente el radio y la profundidad del tajo para extraer el mismo cuerpo mineral (Chen et al., 2025).

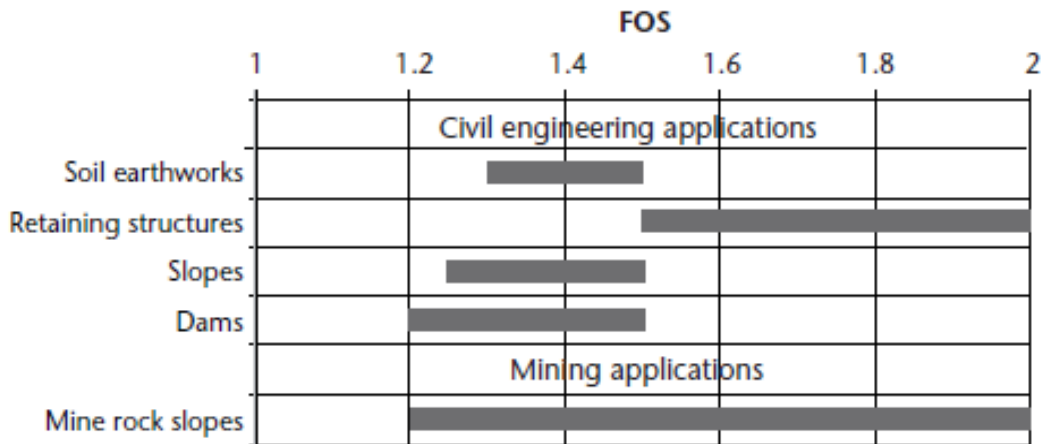
Un análisis geotécnico detallado es parte integral de cualquier estudio de factibilidad minera. Mediante sondeos, mapeo estructural y ensayos de laboratorio, se determinan parámetros como la resistencia a la compresión, cohesión, ángulo de fricción interna de las rocas, así como la

orientación y persistencia de discontinuidades geológicas (fallas, diaclasas, estratificación) (Liu et al., 2024; Wang et al., 2023). Con estos datos se modela la estabilidad de los taludes. Si los resultados indican alto riesgo de deslizamientos o colapsos, se deberán implementar bermas más anchas, taludes de inclinación reducida, o sistemas de soporte (clavado de rocas, pernos, mallas) en los bancos. Cada una de estas medidas afecta la economía del proyecto: taludes menos verticales implican extraer más estéril por cada tonelada de mineral obtenida, y los sostenimientos añaden costos significativos que deben evaluarse durante las fases previas (Tsevegmid et al., 2025; Pu et al., 2025).

Existen casos donde la geología es tan desfavorable que la minería a cielo abierto resulta inviable pese a existir un mineral valioso. Por ejemplo, en yacimientos situados bajo secuencias gruesas de material cárstico muy fracturado o suelos arcillosos expansivos, la estabilidad puede ser tan pobre que un tajo abierto no alcanzaría profundidad apreciable antes de encontrarse con incidentes graves, como problemas de derrumbes (Wang et al., 2024; Li et al., 2025). También la presencia de agua subterránea bajo presión (acuíferos) compromete la estabilidad, ya que el agua actúa reduciendo la fricción efectiva y ejerciendo presión de poros; esto puede desencadenar fallas en talud si no se controla con drenaje y/o bombeo adecuado (Rózkowski et al., 2021). De hecho, el diseño de una mina a cielo abierto requiere prever sistemas de drenaje (pozos, bombeo, canales, piscinas) para evitar que la infiltración de agua desestabilice los taludes (Moosavi et al., 2016).

Como lineamiento, se busca que los factores de seguridad de los taludes estén por encima de valores mínimos, generalmente $FoS > 1,25 - 2$ en operaciones de largo plazo o $1.3 - 1.5$ en operaciones de corto plazo (*ver figura 3*) (Read & Stacey, 2009; Priest & Brown, 1983). Cuando las condiciones geomecánicas no lo permiten se descarta la opción de tajo abierto. En esos casos, la continuidad del negocio minero depende de adaptar la explotación al entorno geológico, ya sea con métodos subterráneos más seguros para ese contexto (Henríquez D, 2019).

Figura 3. *Rango de valores de FoS aceptable.*

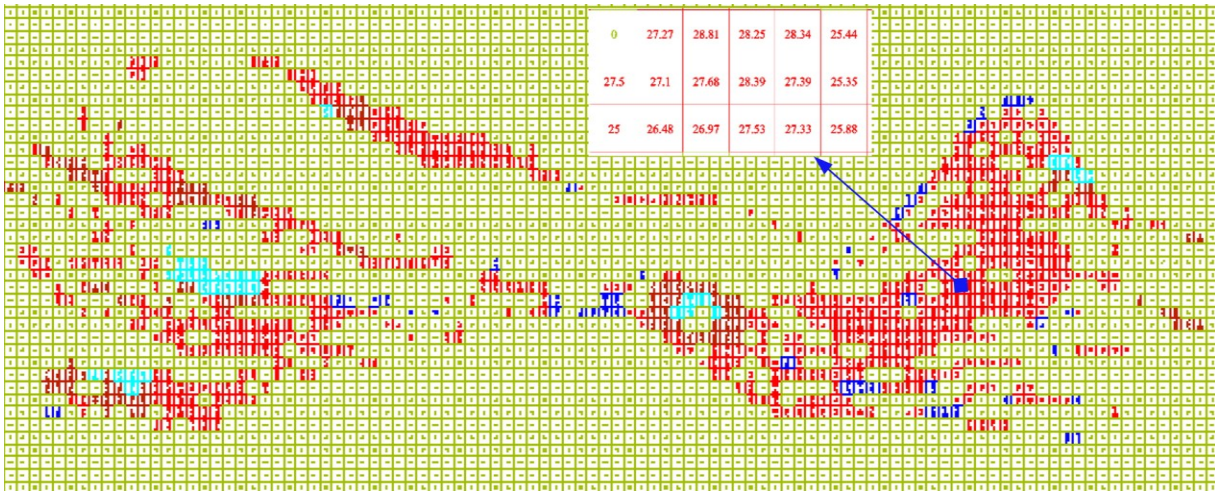


Fuente: Priest & Brown (1983).

2.4 TAMAÑO DEL DEPÓSITO Y LEY MINERAL

El último gran criterio geológico por considerar es la escala del yacimiento (sus reservas y recursos) en conjunto con la ley promedio del mineral o metal de interés. Estos parámetros definen la cantidad total de material valioso disponible y su concentración, lo cual influye en la rentabilidad potencial de la explotación (Asad & Dimitrakopoulos, 2011; Hutton, 2015). La viabilidad de una mina a cielo abierto está estrechamente vinculada a que el volumen de mineral económicamente recuperable sea lo suficientemente grande para amortizar los elevados costos iniciales de *pre-stripping* (preparación de los frentes) y de equipos de gran capacidad. Por ello, típicamente se emplea minería a cielo abierto en depósitos de gran tamaño como la mina de Dagushan (*ver figura 4*) (Asad & Dimitrakopoulos, 2011; Sabour, 2002; Xu et al., 2023). Los tonelajes de producción para minas a cielo abierto varían desde menos de 15.000 t/año en pequeñas operaciones de mineral, hasta más de 360 Mt/año en grandes operaciones de pórfido de cobre como “Escondida” en Chile, aunque sean de baja ley, mientras que depósitos más pequeños solo justifican una operación si la ley es alta (Wetherelt et al., s.f).

Figura 4. Mina de hierro Dagushan a cielo abierto en la ciudad de Luanzhou, provincia de Hebei, China.



El área minera alberga reservas de 2.300 millones de toneladas con una ley promedio del 28,13 %.

Fuente: Xu et al. (2023).

La minería a cielo abierto es un método de alta productividad, se extrae tanto mineral como roca estéril, usando maquinaria pesada, y la economía del proyecto depende de manejar altos tonelajes con costos unitarios bajos (Camus, 2003). Un depósito de baja ley, por ejemplo, 0,3% Cu o Ni puede ser rentable a cielo abierto siempre que el tonelaje sea enorme (miles de millones de toneladas) y se pueda mover en camiones y palas de gran capacidad (Hartman & Mutmanský, 2002). En cambio, esa misma ley en un yacimiento pequeño sería insuficiente para cubrir los costos, ya que la poca cantidad de metal producido no compensaría el *strip ratio* y gastos operativos (Asad, 2012). Del otro lado, un cuerpo de alta ley (por ejemplo, una veta de oro de 8 g/t) no requiere extraer grandes volúmenes para generar valor (Camus, 2003), la minería subterránea permite ir directamente al filón rico sin diluirlo con roca estéril circundante, lo que maximiza la recuperación del recurso.

En la práctica, las compañías mineras definen una ley de corte (*cut-off grade*) por debajo de la cual el material se considera estéril, el algoritmo de Lane suele ser la técnica de optimización de la ley de corte más utilizada, que se calcula teniendo en cuenta los factores técnicos y económicos de la producción. Esta ley de corte es más baja en operaciones a cielo abierto que en subterráneas, precisamente porque aquéllas pueden manejar economías de escala que toleran leyes menores (Ahmadi, 2018; Cutler & Dimitrakopoulos, 2025).

Al evaluar un proyecto, se calcula el inventario de reservas mineras bajo distintos supuestos de ley de corte y método de explotación. Si al aplicar un escenario de cielo abierto se obtienen reservas significativas a baja ley, puede ser indicativo de que el método superficial es apropiado para maximizar la recuperación total del recurso. Por el contrario, si el depósito contiene núcleos de alta ley rodeados de material de muy baja ley, quizás convenga una extracción subterránea enfocada en esos núcleos para evitar dilución ([Abdollahisharif et al., 2012](#); [Asad, 2012](#)).

3. TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN EXPLORACIÓN Y EVALUACIÓN DE DEPÓSITOS

La industria minera contemporánea está experimentando una revolución tecnológica que impacta todas sus etapas, desde la exploración inicial de yacimientos hasta la evaluación detallada para su desarrollo. En particular, la exploración mineral y la evaluación de depósitos se han beneficiado enormemente de innovaciones en sensores remotos, sistemas de información geográfica, análisis de grandes volúmenes de datos (*Big Data*) y algoritmos de machine learning. Estas herramientas emergentes están transformando la manera en que los geólogos descubren nuevos depósitos y determinan su viabilidad, haciéndolo más eficiente, preciso y seguro ([Dumakor-Dupey & Arya, 2021](#)).

3.1 TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN LA EXPLORACIÓN MINERA

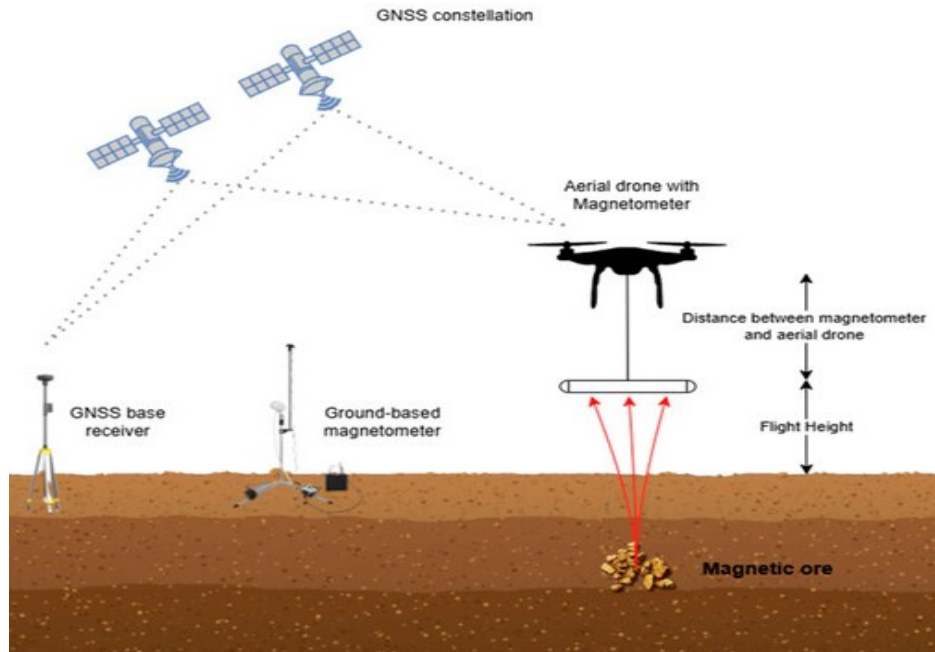
La fase de exploración mineral consiste en la identificación de zonas con potencial mineral y la delineación inicial de un depósito. Tradicionalmente, implicaba campañas geológicas prolongadas, con levantamientos de campo, muestreo geoquímico manual y geofísica básica, seguidas de perforaciones de reconocimiento. Hoy en día, las tecnologías emergentes han acelerado y optimizado significativamente, pero no reemplazado este proceso de campañas tradicionales. Una de las innovaciones más destacadas es la teledetección avanzada mediante satélites y drones. Los satélites modernos equipados con sensores multispectrales e hiperspectrales pueden mapear extensas áreas en busca de características geológicas asociadas a mineralizaciones, como alteraciones hidrotermales o anomalías en la vegetación ([Shirmard et al., 2021](#)).

Según [Perikleous et al. \(2025\)](#), los métodos de teledetección implementados mediante drones incluyen diversas técnicas como:

- Aeromagnéticos, los cuales interactúan con los campos magnéticos de los minerales ferreos (*ver figura 5*).
- Rayos gamma es un método de estudio radiométrico que mide el fondo radiactivo natural de rocas, minerales o contaminación radiactiva.
- Electromagnéticos aerotransportados (AEM), es un método electromagnético que utiliza una bobina transmisora para generar un campo electromagnético variable en el tiempo, induciendo corrientes de Foucault en el terreno que permiten estimar la conductividad eléctrica del subsuelo.

- Métodos GPR (Ground Penetrating Radar), que utilizan ondas electromagnéticas para identificar anomalías en el suelo, como fracturas o zonas saturadas, facilitando la reconstrucción de macizos rocosos y yacimientos.

Figura 5. Configuración de magnetometría aérea con drones para estudios geofísicos.



Fuente: Perikleous et al. (2025).

Los vehículos aéreos no tripulados (drones) se han sumado como herramienta cotidiana en exploración. Equipados con cámaras de alta resolución o sensores LiDAR, los drones pueden sobrevolar áreas de difícil acceso y producir modelos topográficos detallados, ortofotos y datos geofísicos a baja altura. Esto complementa la información satelital al ofrecer una resolución mayor y de manera más económica (Javan et al., 2024; Jackisch et al., 2022). Un dron puede, por ejemplo, volar en un lugar de difícil acceso y mapear afloramientos mineralizados con precisión, tarea que a un geólogo le tomaría días en terreno complicado. Además, los drones mejoran la seguridad al evitar exponer personal a terrenos accidentados en etapas tempranas (Parshin et al., 2018).

Junto a la recolección de datos, la inteligencia artificial y el *machine learning* desempeñan un papel transformador en la exploración moderna. Las compañías mineras están acumulando bases de datos masivas de geoquímica, geofísica, imágenes satelitales e información geológica histórica. Mediante algoritmos de aprendizaje automático, es posible detectar correlaciones y patrones en

estos datos que pasarían inadvertidos para un ser humano (Yang et al., 2024; Jung & Choi, 2021). Modelos de IA entrenados con ejemplos de depósitos conocidos pueden predecir con mayor certeza dónde existen condiciones favorables para un yacimiento. Por ejemplo, algoritmos aplicados a datos geofísicos 3D pueden sugerir la presencia de un cuerpo mineralizado en base a sutiles anomalías magnéticas y gravimétricas coincidentes, orientando la ubicación de perforaciones exploratorias con mayor probabilidad de éxito (Dumakor-Dupey & Arya, 2021).

Un beneficio inmediato del uso de IA y Big Data en exploración es la reducción de tiempos y costos para realizar descubrimientos. La IA permite descubrir correlaciones dentro de conjuntos de datos complejos, aumentando la velocidad de descubrimiento mediante un análisis más rápido y modelado geológico, acelerando la toma de decisiones, reduciendo los costos de descubrimiento (Accenture, 2025).

3.2 TECNOLOGÍAS EMERGENTES EN LA EVALUACIÓN DE DEPÓSITOS

Una vez identificado un yacimiento, la etapa de evaluación geológica y económica del depósito determina si este puede pasar a desarrollo minero. En esta fase, las tecnologías emergentes también están marcando una diferencia significativa, permitiendo caracterizar con mayor detalle el depósito y proyectar escenarios de explotación óptimos.

Una de las innovaciones más notables es la digitalización avanzada del registro geológico. La tradicional labor de *core logging* (descripción de testigos de perforación) está siendo complementada e incluso parcialmente automatizada por sistemas de escaneo de núcleo (ver figura 6). Mediante cámaras de alta resolución y sensores hiperspectrales, es posible escanear los testigos de perforación rápidamente, obteniendo un registro continuo de mineralogía y texturas a lo largo del pozo (Thiele et al., 2024; Ossandon et al., 2024). Por ejemplo, los servicios geológicos de Australia utilizan sistemas de hardware como el *HyLogger-3* generan, en minutos, perfiles mineralógicos detallados, identificando minerales de alteración, zonas de sulfuros y contactos litológicos (Schodlok et al., 2016). Estos datos alimentan directamente bases de datos 3D, reduciendo el ruido y la incertidumbre del muestreo manual y permitiendo modelar con mayor confianza la geología del depósito. Con ayuda de IA, se pueden interpretar en tiempo real estructuras o facies en los testigos, acelerando el proceso de *logging* que antes tomaba semanas (Thiele et al., 2024; Shirmard et al., 2021).

Figura 6. Escaneo hiperespectral de núcleos de perforación con realidad aumentada.



Sensor de infrarrojo de onda media Specim FX50 superpuesto a la señal de vídeo (color verdadero) de una caja de núcleo (A). Los círculos rojos son marcadores de RA ajustables. La tableta puede moverse a cualquier orientación mientras se sigue el seguimiento de la caja (B). También es posible alternar fácilmente entre diferentes visualizaciones para comparar rápidamente los resultados hiperespectrales y las observaciones visuales.

Fuente: Thiele et al. (2024).

El modelamiento geológico 3D es otra área enormemente potenciada por la tecnología actual. Software especializado (Leapfrog, Vulcan, Datamine) permite construir modelos de bloques representando la distribución espacial de las distintas litologías, mineralizaciones y leyes en el depósito. Los algoritmos geoestadísticos, reforzados ahora por *machine learning*, logran estimaciones de recursos más precisas al encontrar relaciones no lineales en los datos de leyes (Jalloh et al., 2016; Fan et al., 2025). Además, estos modelos pueden actualizarse en tiempo real a medida se obtienen nuevos datos, permitiendo que la evaluación de reservas sea un proceso continuo (Zhong et al., 2025). En casos aplicados, como en minas a cielo abierto, se han demostrado métodos 3D finos con actualización de fallas y estratos para mejorar la precisión del modelo geológico (Yuan et al., 2024). De esta forma, la evaluación de reservas es un proceso dinámico y continuo más que un ejercicio estático.

Ligado a lo anterior, las simulaciones de planificación minera se han vuelto más sofisticadas. La optimización de tajos abiertos mediante algoritmos como *Lerchs-Grossmann* ha existido desde

hace décadas; no obstante, hoy se integra con consideraciones geotécnicas, ambientales y económicas de forma simultánea gracias a una mayor capacidad computacional (Vallejo et al., 2010; Muir, 2004).

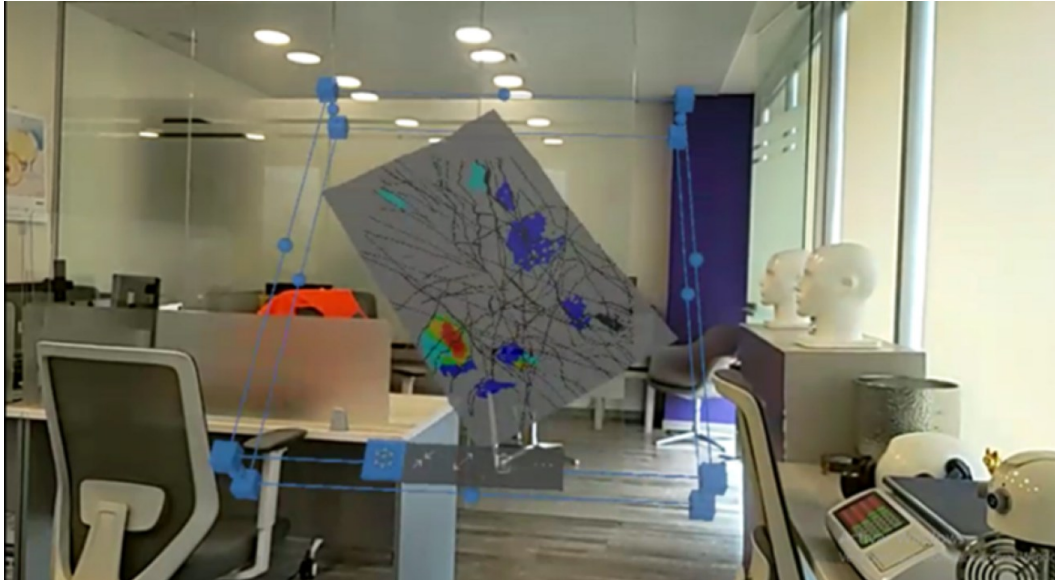
Por ejemplo, software de última generación puede generar diseños paramétricos de tajos variando automáticamente ángulos de talud según zonas geotécnicas, condiciones de rocas específicas y el factor de seguridad (FoS), incorporando costos de transporte según la topografía e incluso considerando restricciones ambientales como dejar zonas de amortiguación o corredores ecológicos (Wijesinghe et al., 2024; Agosti et al., 2021). Estas herramientas integran algoritmos geoestadísticos y de optimización que evalúan distintas configuraciones de talud en función de la estabilidad y la rentabilidad del tajo (Deng et al., 2025). Asimismo, la inteligencia artificial (IA) ha comenzado a desempeñar un papel decisivo en la planificación minera: se emplean modelos de aprendizaje automático y algoritmos multiobjetivo que analizan miles de combinaciones de fases de minado y secuencias de extracción para maximizar el valor presente neto (VPN) del proyecto, una tarea que resultaría impracticable mediante métodos manuales (Loor & Morales, 2020; Khajvandsany et al., 2025; Quelopana & Navarra, 2021).

En cuanto a la evaluación económica, las tecnologías de información permiten manejar modelos financieros complejos vinculados al modelo geológico. Por ejemplo, plataformas integradas toman el modelo de bloques del yacimiento y simulan año a año la extracción de cada bloque según un plan minero dado, calculando flujos de caja detallados. Si se aplican técnicas de optimización estocástica, se puede cuantificar la incertidumbre en el VPN debida a variabilidad geológica o de precios, dando una evaluación de riesgo más rigurosa (Cutler & Dimitrakopoulos, 2024; Findlay & Dimitrakopoulos, 2024). Este enfoque de *simulación Monte Carlo* sobre el modelo geológico es cada vez más accesible por las mejoras de hardware y software (Sauvageau & Kumral, 2018; Dimitrakopoulos & Del Castillo, 2025).

Otro aporte tecnológico importante es el uso de realidad virtual (RV) y realidad aumentada (RA) para la evaluación y comprensión del depósito. Con la RV, los geólogos e ingenieros pueden “sumergirse” en el modelo 3D del yacimiento, visualizando vetas, *pits* diseñados, rampas y posibles bancos como si estuvieran dentro de la mina futura (*ver figura 7*). Esto facilita la identificación de intersecciones complejas o áreas problemáticas que en planos 2D podrían pasarse por alto (Strzałkowski et al., 2024). La RA, por su parte, permite superponer información geológica

directamente en el terreno real; por ejemplo, proyectando en la vista de un dron o una tablet la extensión subterránea del cuerpo mineral mientras se recorre la superficie, mejorando la comprensión espacial (Eitzenberger et al., 2024).

Figura 7. Resultados del software 3DEC de ITASCA en los HoloLens2.



Fuente: Eitzenberger et al. (2024).

Todas estas innovaciones conllevan que la evaluación de un depósito sea más integral y esté mejor alimentada por datos. Los proyectos mineros de vanguardia aprovechan estas herramientas para optimizar sus diseños y minimizar riesgos. Por ejemplo, el uso de IA en la evaluación permite generar modelos 3D detallados de los yacimientos, y análisis de datos como anomalías geoquímicas, o generar mapas de alteraciones (Davies et al., 2025). Esto significa que desde etapas tempranas se pueden identificar las mejores prácticas para extraer el mineral causando el menor impacto posible y con la mayor seguridad, incorporando consideraciones ambientales y sociales al diseño técnico siguiendo indicadores de las ODS (Corrigan & Ikonnikova, 2024).

4. CONCLUSIONES

La evaluación integral de los criterios geológicos demuestra que la viabilidad de una mina a cielo abierto depende de la geometría, profundidad, estabilidad geomecánica y ley del yacimiento, junto con los factores económicos y ambientales que determinan su rentabilidad y sostenibilidad. La forma y profundidad del depósito, la resistencia del macizo rocoso y la relación estéril/mineral establecen los límites técnicos de la explotación superficial, mientras que el tamaño del yacimiento y la ley promedio condicionan la posibilidad de alcanzar beneficios que justifiquen los altos costos de *prestripping* y operación. En este sentido, los proyectos viables a cielo abierto son aquellos capaces de mantener una productividad elevada y sostenida, garantizando estabilidad estructural, eficiencia económica y responsabilidad ambiental y social.

Por otra parte, las tecnologías emergentes están transformando la forma en que se exploran y evalúan los depósitos minerales. La teledetección satelital e hiperespectral, el uso de drones equipados con sensores geofísicos, el modelamiento geológico 3D, los algoritmos de inteligencia artificial y la simulación económica estocástica permiten generar modelos del subsuelo más precisos y dinámicos. Estas herramientas incrementan la precisión de los análisis, reducen la incertidumbre en la estimación de recursos y reservas minerales, optimizan la planificación minera y favorecen decisiones fundamentadas en datos objetivos, agregando valor a las compañías mineras y a las comunidades al formar proyectos mejor estructurados

En conjunto, la integración entre la geología aplicada y la transformación digital está redefiniendo el paradigma de la minería moderna: una actividad más predictiva, automatizada y sostenible. La aplicación conjunta de estos avances tecnológicos con una interpretación geológica acertada permite optimizar el aprovechamiento de los recursos minerales, minimizar impactos ambientales y fortalecer la seguridad operativa, consolidando una minería del futuro más responsable y tecnológicamente avanzada.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdellah, W. R., Hirohama, C., Sainoki, A., Towfeek, A. R., & Ali, M. A. M. (2022). Estimating the Optimal Overall Slope Angle of Open-Pit Mines with Probabilistic Analysis. *Applied Sciences*, 12(9), 4746. <https://doi.org/10.3390/app12094746>
- Abdollahisharif, J., Bakhtavar, E., & Anemangely, M. (2012). Optimal cut-off grade determination based on variable capacities in open-pit mining. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 112(12), 1065-1069. Retrieved October 10, 2025, from http://www.scielo.org.za/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2225-62532012001200015&lng=en&tlng=en.
- Accenture. (2025). From explore to ore: How artificial intelligence is transforming the mineral exploration lifecycle. Accenture. <https://www.accenture.com/ie-en/insights/natural-resources/from-explore-to-ore>
- Agosti, A., Utili, S., Gregory, D., Lapworth, A., Samardzic, J., & Prawasono, A. (2021). Design of an open-pit gold mine by optimal pitwall profiles. *CIM Journal*, 12(4), 149–168. <https://doi.org/10.1080/19236026.2021.1979382>
- Ahmadi, M. R. (2018). Cutoff grade optimization based on maximizing net present value using a computer model. *Journal of Sustainable Mining*, 17(2), 68-75. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsm.2018.04.002>
- Alemayehu, E., Chala, E.T., Jilo, N.Z. (2025). Optimizing design and stability of open pit slopes in Tolay coal mine, Ethiopia. *Sci Rep* 15, 1570. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-86034-7>
- Andrés Parra, Nelson Morales, Javier Vallejos & Phu Minh Vuong Nguyen. (2018). Open pit mine planning considering geomechanical fundamentals, *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 32:4, 221-238, <https://doi.org/10.1080/17480930.2017.1278579>
- Asad, M. W. A., & Dimitrakopoulos, R. (2012). Optimal production scale of open pit mining operations with uncertain metal supply and long-term stockpiles. *Resources Policy*, 37(1), 81–89. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2011.12.002>

- Badakhshan, N., Shahriar, K., Afraei, S., & Bakhtavar, E. (2024). Optimization of transition from open-pit to underground mining considering environmental costs. *Resources Policy*, 95, 105178. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2024.105178>
- Bakhtavar, E., Shahriar, K. & Oraee, K. (2009). Transition from open-pit to underground as a new optimization challenge in mining engineering. *J Min Sci* 45, 485–494. <https://doi.org/10.1007/s10913-009-0060-3>
- Cacciuttolo C, Cano D, Custodio M. (2023). Socio-Environmental Risks Linked with Mine Tailings Chemical Composition: Promoting Responsible and Safe Mine Tailings Management Considering Copper and Gold Mining Experiences from Chile and Peru. *Toxics*. May 16;11(5):462. <https://doi.org/doi:10.3390/toxics11050462>
- Camus, F. (2003). *Geología de los sistemas porfiricos en los Andes de Chile*. <https://repositorio.sernageomin.cl/items/a8faf057-5764-4d2d-a6eb-5c9c152fbe50>
- Chen, H., Wang, B., & Dou, Z. (2025). Multiscale Analysis and Preventive Measures for Slope Stability in Open-Pit Mines Using a Multimethod Coupling Approach. *Applied Sciences*, 15(19), 10367. <https://doi.org/10.3390/app151910367>
- Chung, J. (2016). Where to make the transition from open-pit to underground? Using integer programming. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 116(8), 801–808. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2016/v116n8a13>
- Corrigan, C. C., & Ikonnikova, S. A. (2024). A review of the use of AI in the mining industry: Insights and ethical considerations for multi-objective optimization. *The Extractive Industries and Society*, 17, 101440. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101440>
- Cutler, J., & Dimitrakopoulos, R. (2024). Joint stochastic optimization of open-pit mine production scheduling with ramp design. *International Journal of Mining, Reclamation and Environment*, 38(6), 480–495. <https://doi.org/10.1080/17480930.2024.2335709>
- Cutler, J., & Dimitrakopoulos, R. (2025). Optimizing multi-element cut-off grades for a strategic production plan under geological uncertainty. *International Journal of Mining Reclamation and Environment*, 1–15. <https://doi.org/10.1080/17480930.2025.2455567>

- Dadrass Javan, F., Samadzadegan, F., Toosi, A., & van der Meijde, M. (2025). Unmanned Aerial Geophysical Remote Sensing: A Systematic Review. *Remote Sensing*, *17*(1), 110. <https://doi.org/10.3390/rs17010110>
- Davies, R. S., Trott, M., Georgi, J., & Farrar, A. (2025). Artificial Intelligence and Machine Learning to enhance critical mineral deposit discovery. *Geosystems and Geoenvironment*, 100361. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2025.100361>
- Deng, T., He, J., Sun, J., Peng, S., Pang, X., Chen, T., & Zhang, X. (2025). Intelligent optimization of slope step parameters in open pit mines containing weak interbedded layers based on machine learning and multi-objective optimization methods. *Frontiers in Earth Science*, *13*. <https://doi.org/10.3389/feart.2025.1666375>
- Dimitrakopoulos, R., & Del Castillo, M. F. (2025). Adaptive simultaneous stochastic optimization of mining complexes: Where is the value coming from? *Resources Policy*, *103*, 105549. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105549>
- Dumakor-Dupey, N. K., & Arya, S. (2021). Machine Learning—A review of applications in mineral resource Estimation. *Energies*, *14*(14), 4079. <https://doi.org/10.3390/en14144079>
- Eitzenberger, Andreas & Edelbro, Catrin & Åhlin, Hans. (2024). Augmented rock mechanics reality in underground mining. 1227-1237. https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2435_N-02.
- Fan, W., Azevedo, L., Liu, G., Chen, Q., Wu, X., & Li, Y. (2025). Automatic reconstruction of 3D geological models based on Recurrent Neural Network and predictive learning. *Computers & Geosciences*, 105996. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2025.105996>
- Findlay, L., Dimitrakopoulos, R. Stochastic Optimization for Long-Term Planning of a Mining Complex with In-Pit Crushing and Conveying Systems. *Mining, Metallurgy & Exploration* **41**, 1677–1691 (2024). <https://doi.org/10.1007/s42461-024-01005-2>
- Hartman, H. L., & Mutmansky, J. M. (2002). *Introductory Mining Engineering* (2nd ed.). Hoboken, NJ: John Wiley & Sons.

- Henríquez Inzulza, D. C. (2019). *Evaluación del límite óptimo entre minería cielo abierto y sublevel stopping* (Tesis de pregrado, Ingeniería Civil de Minas, Universidad de Chile). <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/170206>
- Hutton, C. (2015). The economics of exhaustible mineral resources - concepts and techniques in optimization revisited. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 115(11), 1083–1096. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/2015/v115n11a13>
- Jackisch, R., Heincke, B. H., Zimmermann, R., Sørensen, E. V., Pirttijärvi, M., Kirsch, M., Salmirinne, H., Lode, S., Kuronen, U., & Gloaguen, R. (2022). Drone-based magnetic and multispectral surveys to develop a 3D model for mineral exploration at Qullissat, Disko Island, Greenland. *Solid Earth*, 13(4), 793–825. <https://doi.org/10.5194/se-13-793-2022>
- Jalloh, A. B., Kyuro, S., Jalloh, Y., & Barrie, A. K. (2016). Integrating artificial neural networks and geostatistics for optimum 3D geological block modeling in mineral reserve estimation: A case study. *International Journal of Mining Science and Technology*, 26(4), 581–585. <https://doi.org/10.1016/j.ijmst.2016.05.008>
- Jung, D., & Choi, Y. (2021). Systematic Review of Machine Learning Applications in Mining: Exploration, Exploitation, and Reclamation. *Minerals*, 11(2), 148. <https://doi.org/10.3390/min11020148>
- Khaboushan, A. S., Osanloo, M., & Esfahanipour, A. (2020). Optimization of open pit to underground transition depth: An idea for reducing waste rock contamination while maximizing economic benefits. *Journal of Cleaner Production*, 277, 123530. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123530>
- Khajvandsany, T., Khalili, H. A., Rezaeyan, R., & Nemati, K. (2025). Multi-Objective optimization of an Open-Pit mining system to determine safety buffer using the modified NBI method and the Meta-Model approach. *Results in Control and Optimization*, 100536. <https://doi.org/10.1016/j.rico.2025.100536>
- Li, S., Su, W., Yin, T., Dan, Z., & Peng, K. (2025). Research Progress and Typical Case of Open-Pit to Underground Mining in China. *Applied Sciences*, 15(15), 8530. <https://doi.org/10.3390/app15158530>

- Li, S., Zhao, Z., Hu, B., Yin, T., Chen, G., & Chen, G. (2022). Hazard Classification and Stability Analysis of High and Steep Slopes from Underground to Open-Pit Mining. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(18), 11679. <https://doi.org/10.3390/ijerph191811679>
- Lin, Z. (2024). Stripping Ratio in Open-Pit Mining. In *Open Pit Mine Planning and Design* (Springer). https://doi.org/10.1007/978-981-99-2086-0_37
- Liu, W., Sheng, G., Kang, X., Yang, M., Li, D., & Wu, S. (2024). Slope Stability Analysis of Open-Pit Mine Considering Weathering Effects. *Applied Sciences*, 14(18), 8449. <https://doi.org/10.3390/app14188449>
- Loor, V & Morales, N. (2020). 'Applying artificial intelligence for optimal production scheduling and phase design in open pit mining', in R Castro, F Báez & K Suzuki (eds), *MassMin 2020: Proceedings of the Eighth International Conference & Exhibition on Mass Mining*, University of Chile, Santiago, pp. 1451-1466, https://doi.org/10.36487/ACG_repo/2063_111
- Mijalkovski, S., Despodov, Z., Mirakovski, D., Adjiski, V., & Doneva, N. (2022). Application of UBC methodology for underground mining method selection. *Underground Mining Engineering*, 40, 15-26.
- Moosavi, E., Shirinabadi, R., & Gholinejad, M. (2016). Prediction of seepage water pressure for slope stability at the Gol-E-Gohar open pit mine. *Journal of Mining Science*, 52(6), 1069–1079. <https://doi.org/10.1134/s1062739116061601>
- Motta, R., Porto, C., Machado, D., & Souto, O. (2019). Parametric analysis of the optimal depth of an open-pit gold mine. In *CRC Press eBooks* (pp. 264–271). <https://doi.org/10.1201/9780429320774-30>
- Muir, D. C. W. (2004). Pseudoflow, new life for Lerchs-Grossmann Pit optimisation. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/280082017_Pseudoflow_New_Life_for_Lerchs-Grossmann_Pit_Optimisation

- Nancel-Penard, P., Jelvez, E., Mancilla, D., & Morales, G. (2025). Open-pit phase design considering operational constraints: Towards the generation of high adherence production planning policies. *Resources Policy*, *103*, 105546. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2025.105546>
- Nizametdinov, F., Nizametdinov, R., Akhmaturov, D., Zamaliyev, N., Mussin, R., Ganyukov, N., Skrzypkowski, K., Korzeniowski, W., Stasica, J., & Rak, Z. (2025). Geomechanical Basis for Assessing Open-Pit Slope Stability in High-Altitude Gold Mining. *Applied Sciences*, *15*(15), 8372. <https://doi.org/10.3390/app15158372>
- Ossandon, Julio & Pizarro, Camila & Voisin, Leandro. (2024). Hyperspectral Mineralogical Characterization for Geometallurgy. *Journal of Mineral and Material Science (JMMS)*. *5*. 1-4. <https://doi.org/10.54026/JMMS/1102>
- Parshin, A. V., Morozov, V. A., Blinov, A. V., Kosterev, A. N., & Budyak, A. E. (2018). Low-altitude geophysical magnetic prospecting based on multicopter UAV as a promising replacement for traditional ground survey. *Geo-spatial Information Science*, *21*(1), 67–74. <https://doi.org/10.1080/10095020.2017.1420508>
- Paty, S., Samanta, B. (2025). A Sustainable Multi-Criteria Decision Framework for Optimizing Open-Pit to Underground Transition Depth in Copper Mines. *J. Inst. Eng. India Ser. D*. <https://doi.org/10.1007/s40033-025-00916-8>
- Perikleous, D., Margariti, K., Velanas, P., Blazquez, C. S., & Gonzalez-Aguilera, D. (2025). Aerial Drones for Geophysical Prospection in Mining: A Review. *Drones*, *9*(5), 383. <https://doi.org/10.3390/drones9050383>
- Pirbalouti, S. M., & Nasab, H. A. (2024). An optimization approach for ultimate pit and Push-Back design in an Open-Pit mine planning. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.36758.25929>
- Priest, S. D., & Brown, E. T. (1983). *Rock Mechanics for Engineering Geology*. London: George Allen & Unwin.

- Pu, C., Zhan, J., Zhang, W., & Peng, J. (2024). Characterization and clustering of rock discontinuity sets: A review. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2024.03.041>
- Quelopana, A., & Navarra, A. (2021). Integration of strategic open-pit mine planning into hierarchical artificial intelligence. *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, 121(12), 1–10. <https://doi.org/10.17159/2411-9717/1367/2021>
- Read, J., & Stacey, P. (2009). Guidelines for open pit slope design. In *CSIRO Publishing eBooks*. <https://doi.org/10.1071/9780643101104>
- Ren, Si-Tong, Liu, Yang, Yang, Xin-Yi, Tong, Ding-Gui, Ren, Gao-Feng. (2022). Extended Ultimate-Pit-Limit Methodology for Optimizing Surface-to-Underground Mining Transition in Metal Mines, *Advances in Civil Engineering*, 2022, 2753991, 9 pages. <https://doi.org/10.1155/2022/2753991>
- Rózkowski, K., Zdechlik, R., & Chudzik, W. (2021). Open-Pit Mine Dewatering Based on Water Recirculation—Case Study with Numerical Modelling. *Energies*, 14(15), 4576. <https://doi.org/10.3390/en14154576>
- Sabour, S. A. (2002). Mine size optimization using marginal analysis. *Resources Policy*, 28(3–4), 145–151. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2004.01.001>
- Salehi A, Afraei S, Shahriar K. (2025). Optimizing the transition from open-pit to underground mining by simultaneously considering price and cost uncertainties. *Mining Technology*. <https://doi.org/10.1177/25726668251360472>
- Salu, S. Poalahi and Bima, B. (2024). Impact Of Open-pit Mining Expansion on Slope Stability at Pt. Hikari Jeindo, Langgikima, North Konawe, Indonesia. *Journal of Mining and Environment*, 15(3), 943-959. <https://doi.org/10.22044/jme.2024.13924.2595>
- Sauvageau, M. y Kumral, M. (2018). Valoración del flujo de caja en riesgo de un proyecto minero mediante simulaciones de Monte Carlo con procesos estocásticos calibrados con datos históricos. *The Engineering Economist*, 63 (3), 171–187. <https://doi.org/10.1080/0013791X.2017.1413150>

- Schodlok, Martin & Whitbourn, L.B. & Huntington, Jon & Mason, P. & Green, Andrew & Berman, Mark & Coward, David & Connor, Philip & Wright, W. & Jolivet, M. & Martinez, R. (2016). HyLogger-3, a visible to shortwave and thermal infrared reflectance spectrometer system for drill core logging: functional description. 1-12. <https://doi.org/10.1080/08120099.2016.1231133>
- Shirmard, H., Farahbakhsh, E., Müller, D., & Chandra, R. (2021). A review of machine learning in processing remote sensing data for mineral exploration. *ResearchGate*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.07678>
- Strzałkowski, P., Bęś, P., Szóstak, M., & Napiórkowski, M. (2024). Application of Virtual Reality (VR) Technology in Mining and Civil Engineering. *Sustainability*, 16(6), 2239. <https://doi.org/10.3390/su16062239>
- Thiele, S. T., Kirsch, M., Lorenz, S., Saffi, H., Alami, S. E., Acosta, I. C. C., Madriz, Y., & Gloaguen, R. (2024). Maximising the value of hyperspectral drill core scanning through real-time processing and analysis. *Frontiers in Earth Science*, 12. <https://doi.org/10.3389/feart.2024.1433662>
- Torres Batista Y., Rodríguez Córdova E., (2022). Las externalidades producidas en la minería a cielo abierto en yacimientos lateríticos y vías para su internalización. Universidad. Revista Universidad y Sociedad, 14(3), 589-596.
- Tsevegmid, T., Kim, Y., Lee, S., & Kim, B. (2025). A Comparative Analysis of Slope Stability Methods for an Open-Pit Mine in Mongolia. *Applied Sciences*, 15(18), 9984. <https://doi.org/10.3390/app15189984>
- VALLEJO GARCÍA, M. N., BAQUERO CHIQUIZA, J. G. & FRANCO SEPÚLVEDA, G. (2010). Análisis de los algoritmos de optimización minera: cono flotante y lerchs-grossmann utilizando gemcom surpac y upl. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, (28), 15–26. <https://revistas.unal.edu.co/index.php/rbct/article/view/19713>
- Vriens, B., Plante, B., Seigneur, N., & Jamieson, H. (2020). Mine Waste Rock: Insights for Sustainable Hydrogeochemical Management. *Minerals*, 10(9), 728. <https://doi.org/10.3390/min10090728>

- Wang, H., Wang, Y., & Jin, F. (2024). Stability of Expansive Soil Slopes under Wetting–Drying Cycles Based on the Discrete Element Method. *Water*, 16(6), 861. <https://doi.org/10.3390/w16060861>
- Wetherelt, A., & van der Wielen, K. P. (s.f.). *Introduction to open-pit mining*. <https://pdfcoffee.com/introduction-to-open-pit-mining-pdf-free.html>
- Whittle, D., Brazil, M., Grossman, P. A., Rubinstein, J. H., & Thomas, D. A. (2015, September 17). *Determining the open pit to underground transition: A new method*. arXiv.org. <https://arxiv.org/abs/1509.05129>
- Wijesinghe, Dakshith & Perera, Ethmadalage & Ooi, Ean & Natarajan, Sundararajan & Sherizadeh, Taghi & Ooi, Ean Tat. (2024). Optimisation of open pit slope design considering groundwater effects using particle swarm optimisation and scaled boundary finite element method. *Engineering Analysis with Boundary Elements*. 169. 105976. <https://doi.org/10.1016/j.enganabound.2024.105976>.
- Yang, F., Zuo, R., & Kreuzer, O. P. (2024). Artificial intelligence for mineral exploration: A review and perspectives on future directions from data science. *Earth-Science Reviews*, 104941. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2024.104941>
- Yuan, J., Liu, G., & Chai, S. (2024). 3D geological fine modeling and dynamic updating method of fault slope in open-pit coal mine. *Scientific Reports*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-81872-3>
- Zhong, D., Wu, Z., Wang, L., & Chen, J. (2025). Dynamic updating of geological models by directly interpolating geological logging data. *Technologies*, 13(9), 406. <https://doi.org/10.3390/technologies13090406>