



MINERÍA SUBTERRÁNEA MODERNA

MODERN UNDERGROUND MINING

Para acceder al título de:

Grado en Ingeniería de los Recursos Mineros

Autor: Laura Valero Sánchez

Director: Santiago Salguero Pereda

Convocatoria: Febrero 2025



ÍNDICE

ÍNDICE.....	1
INDICE imágenes.....	¡Error! Marcador no definido.
1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Contexto histórico de la minería subterránea.....	9
2. OBJETIVO y alcances del trabajo	12
3. PRINCIPIOS DE LA MINERÍA.....	13
3.1. Diferencias entre minería a cielo abierto y minería subterránea	19
3.2. Principales métodos de explotación subterránea	23
3.2.1 Métodos autosoportantes:	23
3.2.2 Métodos soportados.....	32
3.2.3 Métodos de hundimiento	34
4. TECNOLOGÍA EN MINERÍA SUBTERRÁNEA MODERNA	37
4.1. Automatización de equipos y maquinaria:.....	37
4.1.1. vehículos autónomos	37
4.1.2. Equipos de perforación y carguío autónomos:.....	42
4.2. Monitoreo remoto y sistemas de control.....	43
4.3. Drones para inspección y cartografía	47
4.4. Aplicación de gemelos digitales en minería subterránea	49
5. GEOTÉCNIA APLICADA A LA MINERÍA SUBTERRÁNEA	52
5.1 Estabilidad de túneles y galerías	54
5.1.1 Condiciones geológicas del macizo	55
5.1.1.1 Tipo de roca:	55
5.1.1.2 Estructuras geológicas.....	55
Una falla es una discontinuidad que se forma debido a la fractura de grandes bloques de rocas en la Tierra cuando las fuerzas tectónicas superan la resistencia de las rocas. Existen tres tipos de falla de acuerdo con su movimiento:.....	55
5.1.1.3 Estado de meteorización.....	59
5.1.2 Esfuerzos naturales e inducidos	60
5.1.3 Aguas subterráneas.....	62
5.1.4 Geometría y tamaño de las excavaciones	63



Minería Subterránea Moderna

5.2 Métodos de soporte: pernos, mallas y hormigón proyectado.	64
5.3 Métodos de excavación en túneles.....	70
5.3.1 Métodos convencionales	70
5.3.1.1 Método austriaco tradicional	70
5.3.1.2 Método Belga.....	71
5.3.1.3 Método Alemán	71
ILUSTRACIÓN 51. MÉTODO ALEMÁN EN LA MINERÍA. (FUENTE: VICTORY EPES, 2023).....	72
5.3.2 Métodos mecanizados modernos	72
5.3.2.1 Nuevo método austriaco.....	72
5.3.2.2 Método excavación con tuneladora.....	73
5.3.2.3 Método perforación y voladura	73
5.4 Gestión de riesgos geológicos en túneles	74
6. VENTILACION	77
6.1 Principios de la ventilación subterránea	77
6.2 Sistemas modernos de ventilación	79
6.3 Ventiladores de alta eficiencia y altas tecnologías limpias.....	81
7. Impacto Ambiental y Gestión Sostenible	83
7.1 Eficiencia energética en minería subterránea.....	84
7.2 Reducción de emisiones en procesos subterráneos	86
7.3 Gestión de aguas residuales.....	87
7.4 Rehabilitación de galerías	88
8. Seguridad en la minería subterránea moderna.....	91
8.1 Principales riesgos en minería subterránea	91
8.2 Sistemas de detección y alerta temprana	94
8.3 Protocolos de emergencia y rescate	95
8.4 Formación y capacitación del personal	97
9. Economía y productividad	98
9.1 Costos de operación.....	98
9.3. Optimización de procesos para aumentar la productividad.....	100
10. Perspectivas futuras.....	104
10.1 Aplicación de inteligencia artificial y bigdata	104



10.2 Hacia la minería subterránea 100% ELECTRIFICADA	105
11. Conclusiones	107
12. BIBLIOGRAFIA	109



Minería Subterránea Moderna

ILUSTRACIÓN 1. MÉDULAS, LEGADO ROMANO EN LA COMARCA DEL BIERZO, LEÓN. (FUENTE: EUROPA PRESS, 2020)

ILUSTRACIÓN 2. LA MINERÍA DEL CARBÓN EN LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL. (FUENTE: WORLD HISTORY, 2023)

ILUSTRACIÓN 3. TECNOLOGÍA MODERNA EN MINA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: TECNOLOGÍA MINERA, 2023)

ILUSTRACIÓN 4. PROSPECCIÓN Y EXPLORACIÓN EN MINERÍA. (FUENTE: TELEMÁTICA, 2023)

ILUSTRACIÓN 5. EXTRACCIÓN SUBTERRÁNEA EN MINERÍA. (FUENTE: CCM ELEVA, 2023)

ILUSTRACIÓN 6. PLANTA TRITURADORA MÓVIL DE PIEDRA. (FUENTE: AIMIX, 2023)

ILUSTRACIÓN 7. LA MOLIENDA EN LAS INSTALACIONES DE TRATAMIENTO DE ÁRIDOS. (FUENTE: VICTORY EPES, 2023)

ILUSTRACIÓN 8. A LA IZQUIERDA UNA REPRESENTACIÓN DE MINERÍA SUBTERRÁNEA Y A LA DERECHA UNA EXPLOTACIÓN DE MINERÍA A CIELO ABIERTO. (FUENTE: ADRIAN MERCADO, 2023; DEBATE, 2024)

ILUSTRACIÓN 9. MÉTODOS DE MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: GEOLOGÍA VENEZOLANA, 2011)

ILUSTRACIÓN 10. MÉTODO DE EXPLOTACIÓN A CIELO ABIERTO. (FUENTE: RESEARCHGATE, 2020)

ILUSTRACIÓN 11. SUBSIDENCIA CAUSADA POR LA MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: RESEARCHGATE, 2020)

ILUSTRACIÓN 12. DEFORESTACIÓN POR MINERÍA EN MADRE DE DIOS, PERÚ. (FUENTE: MONGABAY, 2023)

ILUSTRACIÓN 13. FILONES INCLINADOS CON PILARES EN MINERÍA. (FUENTE: SALUD Y SEGURIDAD, 2014)

ILUSTRACIÓN 14. SOFTWARE Y HERRAMIENTA PARA ANÁLISIS Y DISEÑO DE PUENTES. (FUENTE: ZIGURAT, 2023)

ILUSTRACIÓN 15. RIESGOS EN LA MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: SLIDESHARE, 2023)

ILUSTRACIÓN 16. ESQUEMA DEL MÉTODO DE MINERÍA SUBLEVEL STOPING. (FUENTE: RESEARCHGATE, 2023; HUSTRULID & BULLOCK, 2001)

ILUSTRACIÓN 17. MÉTODO CORTE Y RELLENO. (FUENTE: SLIDEPLAYER, 2023)

ILUSTRACIÓN 18. MÉTODO DE HUNDIMIENTO POR SUBNIVELES. (FUENTE: SCRIBD, 2023)

ILUSTRACIÓN 19. MÉTODO DE MINERÍA TAJO LARGO. (FUENTE: INARQUITARU, 2014)

ILUSTRACIÓN 20. AUTOMATIZACIÓN Y TECNOLOGÍAS PARA LA MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: TECNOLOGÍA MINERA, 2023)

ILUSTRACIÓN 21. TECNOLOGÍA LIDAR. (FUENTE: YELLOWSCAN, 2023)

ILUSTRACIÓN 22. TOPOGRAFÍA CON DRONES. (FUENTE: ARQUIDRON, 2020)

ILUSTRACIÓN 23. MODELADO 3D DE MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: LE VENT VERT, 2023)

ILUSTRACIÓN 24. EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL Y COMUNICACIÓN PARA MINAS. (FUENTE: SLIDESHARE, 2023)

ILUSTRACIÓN 25. LAS PERFORADORAS AUTÓNOMAS DE EPIROC DAN LA VUELTA AL MUNDO. (FUENTE: INTEREMPRESAS, 2023)

ILUSTRACIÓN 26. CARGADORAS AUTÓNOMAS DE MINERÍA SUBTERRÁNEA LHD. (FUENTE: CATERPILLAR, 2023)



Laura Valero Sánchez

ILUSTRACIÓN 27. TECNOLOGÍAS DE MONITOREO REMOTO EN MINERÍA. (FUENTE: TECNOLOGÍA MINERA, 2023)

ILUSTRACIÓN 28. REALTRAC EN MINERÍA. (FUENTE: REALTRAC, 2023)

ILUSTRACIÓN 29. MONITOREO REMOTO SANDVIK. (FUENTE: SANDVIK, 2023)

ILUSTRACIÓN 30. INSPECCIÓN GEOLÓGICA. (FUENTE: HELIOS COMUNICACIÓN, 2023)

ILUSTRACIÓN 31. MODELADO 3D TÚNEL MEDIANTE LIDAR. (FUENTE: MACRONLINE, 2023)

ILUSTRACIÓN 32. AGISOFT PHOTOSCAN: ORTOMOSAICOS PARA DRONES. (FUENTE: GIS AND BEERS, 2023)

ILUSTRACIÓN 33. GEMELOS DIGITALES. (FUENTE: COMPUTING, 2023)

ILUSTRACIÓN 34. TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO UTILIZADAS EN LA INDUSTRIA. (FUENTE: TRACTIAN, 2023)

ILUSTRACIÓN 35. REGIONES GEOLÓGICAS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA Y BALEARES. (FUENTE: IGN, 2004)

ILUSTRACIÓN 36. DIMENSIONAMIENTO DEL SOSTENIMIENTO EN GALERÍAS SUBTERRÁNEAS Y TÚNELES A PARTIR DE LA CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA Q. (FUENTE: OBRAS URBANAS, 2023)

ILUSTRACIÓN 37. DESAGÜE EN MINA SUBTERRÁNEA, MÉXICO. (FUENTE: ARGPEX, 2023)

ILUSTRACIÓN 38. ESTABILIDAD DE TÚNELES. (FUENTE: FINE SOFTWARE, 2023)

ILUSTRACIÓN 39. FALLA NORMAL. (FUENTE: IGN, 2023)

ILUSTRACIÓN 40. FALLAS INVERSAS. (FUENTE: IGN, 2023)

ILUSTRACIÓN 41. FALLA DESGARRE. (FUENTE: IGN, 2023)

ILUSTRACIÓN 42. DIACLASAS. (FUENTE: GEOLODIA ÁVILA, 2023)

ILUSTRACIÓN 43. ANÁLISIS DE LA PRESIÓN LITOSTÁTICA. (FUENTE: AMELICA, 2023)

ILUSTRACIÓN 44. ESFUERZOS PRE Y POST EXCAVACIÓN EN TÚNELES. (FUENTE: SLIDESHARE, 2023)

ILUSTRACIÓN 45. HIDROLOGÍA. (FUENTE: GEOLODIA ÁVILA, 2023)

ILUSTRACIÓN 46. ESTRUCTURA GENERAL TÚNEL. (FUENTE: J. CASTRO, 2023)

ILUSTRACIÓN 47. PERNOS DE ROCA. (FUENTE: REVISTA SEGURIDAD MINERA, 2023)

ILUSTRACIÓN 48. MALLA DE FORTIFICACIÓN MINERA INCHALAM. (FUENTE: PRODALAM, 2023)

ILUSTRACIÓN 49. HORMIGÓN PROYECTADO EN MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: HORMIGÓN AL DÍA, 2023)

ILUSTRACIÓN 50. MÉTODO AUSTRIACO TRADICIONAL. (FUENTE: MINERÍA MODERNA, 2023)

ILUSTRACIÓN 51. MÉTODOS DE EXCAVACIÓN DE TÚNELES. (FUENTE: ACADEMIA.EDU, 2023)

ILUSTRACIÓN 52. MÉTODO ALEMÁN EN LA MINERÍA. (FUENTE: VICTORY EPES, 2023)

ILUSTRACIÓN 53. NATM Y SHOTCRETE EN MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: BEST SUPPORT UNDERGROUND, 2023)

ILUSTRACIÓN 54. USO DE TÚNELADORAS EN LA MINERÍA. (FUENTE: VICTORY EPES, 2023)

ILUSTRACIÓN 55. PERFORACIÓN Y VOLADURA EN MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: BEST SUPPORT UNDERGROUND, 2023)

ILUSTRACIÓN 56. GESTIÓN DE RIESGOS Y MITIGACIÓN DE RIESGOS EN LA MINERÍA EN LA NUBE. (FUENTE: FASTERCAPITAL, 2023)



Minería Subterránea Moderna

- ILUSTRACIÓN 57. SOLUCIONES PARA LA MINERÍA. (FUENTE: CIRIGLIANO, 2023)
- ILUSTRACIÓN 58. DESCRIPCIÓN DE VENTILACIÓN NATURAL. (FUENTE: SERNAGEOMIN, 2018)
- ILUSTRACIÓN 59. DESCRIPCIÓN DE VENTILACIÓN FORZADA. (FUENTE: SERNAGEOMIN, 2018)
- ILUSTRACIÓN 60. MONITOREO VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA. (FUENTE: REDALYC, 2023)
- ILUSTRACIÓN 61. REPRESENTACIÓN DE SENSORES REMOTOS EN MINERÍA. (FUENTE: MDPI, 2015)
- ILUSTRACIÓN 62. LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. (FUENTE: EADIC, 2023)
- ILUSTRACIÓN 63. ENERGÍA EN MINERÍA. (FUENTE: 4E CHILE, 2022)
- ILUSTRACIÓN 64. CALIDAD DE AGUA EN LA INDUSTRIA MINERA. (FUENTE: OMEGA PERÚ, 2023)
- ILUSTRACIÓN 65. GEOFLUV: GEOMORFOLOGÍA FLUVIAL. (FUENTE: GEMM, 2023)
- ILUSTRACIÓN 66. REFORESTACIÓN: ANTES Y DESPUÉS. (FUENTE: REFORESTACIÓN, 2016)
- ILUSTRACIÓN 67. DERRUMBE EN MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: HUFFINGTON POST, 2023)
- ILUSTRACIÓN 68. COMPARATIVA GASES EN MINERÍA. (FUENTE: EMW, 2023)
- ILUSTRACIÓN 69. DRENAJE DE LA MINA. (FUENTE: HCA MINERÍA, 2023)
- ILUSTRACIÓN 70. CAPACITACIÓN BRIGADA DE EMERGENCIAS. (FUENTE: PESCO CAPACITACIÓN, 2023)
- ILUSTRACIÓN 71. LEAN SIX SIGMA: MEJORA CONTINUA. (FUENTE: KAIZEN, 2023)
- ILUSTRACIÓN 72. INTRODUCCIÓN AL MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL (TPM). (FUENTE: TOTAL MANUFACTURING, 2023)
- ILUSTRACIÓN 73. KPI: INDICADORES CLAVE DE RENDIMIENTO. (FUENTE: SYDLE, 2023)
- ILUSTRACIÓN 74. EL MUNDO LABORAL DEL BIG DATA. (FUENTE: BBVA, 2023)



RESUMEN

Durante el siguiente trabajo se desarrolla la evolución de la minería en los últimos años, centrándose en los avances tecnológicos y su impacto en la minería subterránea. Se muestra cómo la automatización, la digitalización y el uso de sensores inteligentes han optimizado la extracción, mejorado la seguridad y reducido el impacto ambiental.

Además, se destacan innovaciones como los vehículos autónomos, el monitoreo remoto y el modelado geológico en 3D, que han transformado la planificación y ejecución de las operaciones. Finalmente, se abordan los desafíos del sector en su transición hacia una minería más eficiente, segura y sostenible.



ABSTRACT

During the following paper the evolution of mining in recent years is developed, focusing on technological advances and their impact on subway mining. It shows how automation, digitalization and the use of intelligent sensors have optimized extraction, improved safety and reduced environmental impact.

It also highlights innovations such as autonomous vehicles, remote monitoring and 3D geological modeling, which have transformed the planning and execution of operations. Finally, it addresses the challenges facing the sector in its transition to a more efficient, safe and sustainable mining industry.



1. INTRODUCCIÓN

La minería subterránea es un método esencial para la extracción de minerales y recursos valiosos que se encuentran bajo la superficie terrestre.

Este tipo de minería implica la extracción de grandes cantidades de material superficial para poder acceder a los yacimientos, siendo necesaria la creación de túneles, pozos y galerías que faciliten el acceso a estos.

1.1. CONTEXTO HISTÓRICO DE LA MINERÍA SUBTERRÁNEA

- **Orígenes y primeras prácticas.**

La minería subterránea se remonta a las civilizaciones antiguas, ya que, durante los primeros tiempos de la historia, la extracción de metales preciosos, carbón y sal ya eran una actividad importante. Utilizaban herramientas rudimentarias como cinceles de piedra, martillos y fuego para fracturar la roca. Comienzan a desarrollarse entonces métodos como la excavación de pozos profundos con escalones tallados en piedra que permitía el acceso al mineral.

Más adelante, durante los siglos XVIII y XIX, comienzan a producirse avances más significativos en la minería debido a la urbanización y a los avances tecnológicos, que fomentaron la necesidad de operaciones mineras más controladas, así como el desarrollo de infraestructuras bajo las ciudades.

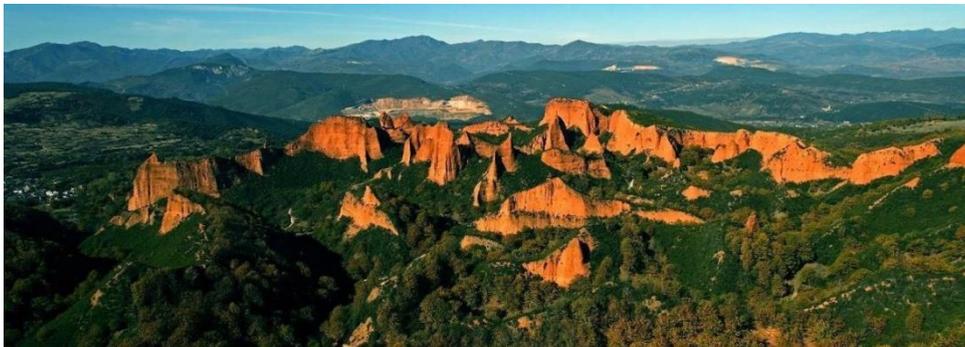


Ilustración 1 - MÉDULAS, LEGADO ROMANO EN LA COMARCA DEL BIERZO, LEÓN. (FUENTE: EUROPA PRESS, 2020)

- **La influencia de La Revolución Industrial.**

Aunque el paso del tiempo fue dejando nuevos avances, el verdadero desarrollo tuvo lugar durante la Revolución Industrial, un periodo que comenzó a finales del siglo XVIII y continuó en el siglo XIX. Esta época estuvo marcada por el rápido crecimiento urbano, las innovaciones tecnológicas y la creciente demanda de fuentes de energía, como el carbón. En las ciudades que se expandían rápidamente debido a la industrialización, crecía la necesidad de acceder a los recursos minerales del subsuelo urbano sin perturbar la vida cotidiana.



Minería Subterránea Moderna

La extracción de carbón debajo de las ciudades cobró especial importancia en esta época. Ciudades como Londres, París y Nueva York tuvieron que excavar más profundamente en la tierra para extraer carbón como combustible, provocando así, un aumento de las prácticas mineras subterráneas. Las zonas urbanas dependían cada vez más de la minería subterránea para poder suministrar energía a hogares, fábricas y sistemas de transporte.

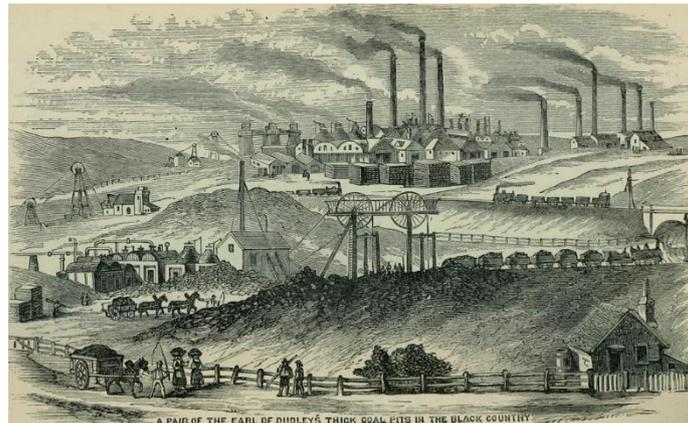


Ilustración 2 - LA MINERÍA DEL CARBÓN EN LA REVOLUCIÓN INDUSTRIAL. (FUENTE: WORLD HISTORY, 2023)

Aunque el carbón fue el principal mineral extraído durante este período por ser esencial para alimentar las máquinas de vapor y las industrias emergentes, la minería subterránea comenzó a diversificarse para incluir la extracción de minerales metálicos como el hierro, el cobre y el plomo, que eran vitales para la construcción de maquinaria y la fabricación de herramientas.

- **Avances tecnológicos**

A medida que iban creciendo las ciudades, la industria minera sufre también un periodo de adaptación a las nuevas tecnologías. La introducción de las máquinas de vapor a principios del siglo XIX permitió alimentar sistemas de ventilación más eficientes en las minas subterráneas, permitiendo trabajar a mayor profundidad y en condiciones más peligrosas, viéndose métodos de explotación obligados a adaptarse a estas nuevas condiciones.

Con la ayuda de todos estos avances, el campo de la minería subterránea empieza a abarcar otros campos.

Aunque el carbón era el principal mineral extraído durante este período por su gran importancia, los nuevos avances dan lugar a nuevas técnicas de extracción y el campo de la minería subterránea empieza entonces a abarcar otros campos, incluyendo la extracción de minerales metálicos como el hierro, el cobre, el plomo etc. que tomaban gran importancia por la necesidad de crear nueva maquinaria y herramientas o la extracción de otros minerales como yeso, caliza etc. utilizado principalmente para la construcción.



Laura Valero Sánchez

Las ciudades siguen creciendo y con la llegada de los sistemas ferroviarios se construyen túneles de transporte bajo las ciudades para dar cabida a las crecientes necesidades del comercio y el tránsito.

- **La urbanización y la creación de sistemas de metro.**

Las ciudades siguen creciendo y, con la llegada de los sistemas ferroviarios, se construyen túneles de transporte bajo las ciudades para dar cabida a las crecientes necesidades del comercio y el tránsito.

Es entonces a finales del siglo XIX y principios del XX, que esta la creciente demanda de transporte en los centros urbanos da lugar a la construcción de sistemas de metro, ya que la construcción subterránea de vías férreas se consideró como una solución a la sobrecarga y congestión de tráfico en las calles de las ciudades.

Durante esta época se lleva a cabo la construcción de sistemas de metro emblemáticos se basaban en la excavación de túneles a gran profundidad bajo la superficie de la ciudad.

El desarrollo de todas estas redes de transporte aporta numerosos avances en las técnicas y nuevos métodos para minería subterránea, como por ejemplo métodos más especializados para excavar a través de roca blanda o dura, crear pozos de ventilación y garantizar la seguridad de los trabajadores.

- **Minería subterránea en la actualidad.**

Durante un largo periodo de tiempo se han ido experimentando nuevas técnicas y tecnologías dando lugar a un progreso y un aprendizaje fruto de la experiencia, llegando hoy en día a considerarse una de las industrias más especializadas tecnológicamente.

La evolución y las técnicas modernas permiten el acceso a una amplia gama de materiales, como elementos de tierras raras, zinc, litio y otros minerales que se encuentran en el subsuelo. Además de los avances en los métodos de extracción, ha habido otros progresos significativos, como en las medidas de seguridad, las consideraciones medioambientales, formación en la mano de obra, y el conocimiento de riesgos que antes se desconocían. [1]



Ilustración 3 - TECNOLOGÍA MODERNA EN MINA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: TECNOLOGÍA MINERA, 2023)



2. OBJETIVO Y ALCANCES DEL TRABAJO

El objetivo principal de este trabajo es llevar a cabo un análisis y desarrollo exhaustivo sobre los aspectos fundamentales de la minería subterránea moderna abordando su evolución, metodologías de exploración, avances tecnológicos y su impacto en la seguridad, el medio ambiente y la productividad.

A través del trabajo, se busca proporcionar una visión integral de las actividades en la industria minera, enfocándose en la optimización de procesos, sostenibilidad, y la implementación de nuevas tecnologías. De esta manera, se pretende demostrar como la minería subterránea ha evolucionado tanto, convirtiéndose en una actividad más segura y eficiente de cómo lo han hecho ver. La última parte del trabajo se centra en el futuro de la minería, y los últimos avances que se están desarrollando e instalando.

Laura Valero Sánchez

3. PRINCIPIOS DE LA MINERÍA

Un mineral se define como “Compuesto químico sólido y homogéneo, de origen natural, formado como consecuencia de un proceso generalmente inorgánico dotado de una composición química definida pero no fija y con una estructura interna ordenada”.

Los minerales son recursos imprescindibles para el desarrollo humano, ya sea para la tecnología, para las infraestructuras o la energía.

La minería es la actividad encargada de extraer los recursos de la tierra, combinando geología, ingeniería y economía para localizar y extraer minerales de manera eficiente, segura y sostenible. [2]

Este proceso, sigue una secuencia definida por las siguientes etapas:

1. Prospección y exploración:

Durante esta etapa se identifican áreas de interés en las que puede existir depósitos minerales. Para ello, los geólogos se apoyan en mapas geológicos, datos históricos, y tecnologías avanzadas, como sensores remotos y drones que permiten un análisis más detallado del área. [3]

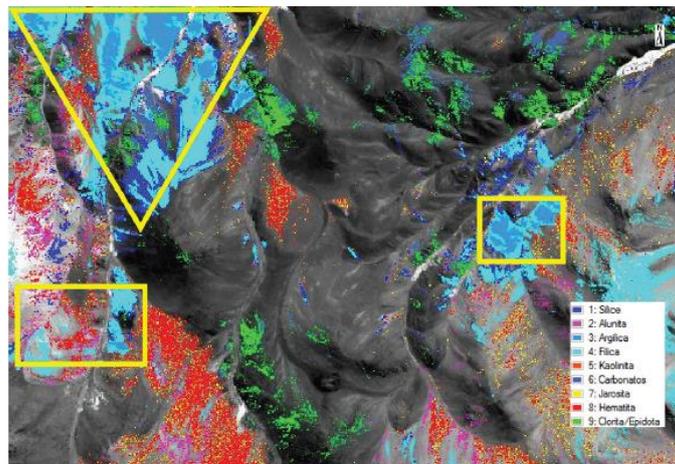


Ilustración 4. Prospección y exploración en minería. (Fuente: Telemática, 2023)

2. Evaluación del proyecto:

Esta etapa es crucial ya que determinará si un proyecto puede desarrollarse de manera rentable y sostenible.

Esta evaluación se realiza mediante dos estudios principales:

a. Estudio de prefactibilidad:

Tiene como propósito proporcionar una estimación de la viabilidad técnica y económica del yacimiento. Durante esta fase se reúnen los



Minería Subterránea Moderna

datos necesarios que servirán para evaluar si es conveniente llevar a cabo un análisis de viabilidad más detallado.

Este estudio está compuesto por las siguientes partes:

- **Análisis técnico inicial:** Analiza las propiedades geológicas del yacimiento (como su forma, dimensiones y distribución), las características físicas y químicas de los minerales presentes, y las condiciones geotécnicas del suelo (estabilidad de las rocas...) que puedan afectar al diseño de la mina.
- **Selección preliminar del método de explotación:** Una vez han sido determinadas las características y propiedades del yacimiento, se determina si la minería es a cielo abierto o subterránea. Además, se evalúan las tecnologías disponibles y la infraestructura necesaria.
- **Estimación de costos y beneficios:** En todo proyecto es importante tener en cuenta la viabilidad económica, calculando los costos preliminares de desarrollo, el tiempo de ejecución y el cierre de la mina. Por otra parte, se estiman los ingresos según las reservas estimadas y los precios en el mercado.
- **Identificación de riesgos:** Es importante tener en cuenta siempre todos los posibles riesgos o problemas que pueden afectar al desarrollo del proyecto. [3]

b. Estudio de Factibilidad:

El estudio de factibilidad es un análisis más detallado que el anterior, y tiene como objetivo confirmar la viabilidad técnica y económica con mayor certeza, de manera que sirva como base para la toma de decisiones finales.

- **Evaluación Técnica avanzada:**
Se revisa y se refina el diseño de la mina, incluyendo la infraestructura, los accesos y las rutas de transporte y se desarrollan planes con un mayor detalle sobre cómo se va a llevar a cabo la extracción del mineral, mediante cronogramas, secuencias de trabajo o diagramas.
- **Análisis económico detallado:**
Se repite el cálculo de costos de capital y costos operativos con una mayor precisión, y de una manera más realista, teniendo en cuenta diferentes escenarios, tasas de interés o fluctuaciones de costos en el mercado.
- **Estudios ambientales:**
Se lleva a cabo un análisis exhausto de las posibles interacciones con comunidades locales, impactos ambientales y posibles áreas afectadas, para proceder al diseño de un plan de gestión ambiental.
- **Plan de contingencia y gestión de riesgos:**



Laura Valero Sánchez

Se desarrollan estrategias para conseguir una reducción de riesgos técnicos, económicos y regulatorios. [3]

3. **Desarrollo y construcción:**

Esta etapa es fundamental en la minería, ya que se materializan los estudios previos y se preparan las bases para la ejecución del proyecto. Está compuesta por distintas fases que están diseñadas de tal manera que garantizan los distintos objetivos del proyecto.

- Preparación del sitio: Transformación del terreno en un espacio adecuado para la construcción de infraestructura y poder dar comienzo a los trabajos. Esta fase incluye el desbroce y limpieza del terreno, la construcción de accesos (creación de caminos, rampas, pozos, etc. que den acceso a la maquinaria a los depósitos), y el establecimiento de áreas de trabajo (oficinas, almacenes etc.) con sus instalaciones pertinentes.
- Construcción de la infraestructura: Es clave para el desarrollo y debe planificarse para que resista las exigencias operativas de la mina durante su vida útil.
- Instalación de equipos: Esencial para poder ejecutar la extracción y el transporte de minerales. Esta etapa puede ser compleja, por lo que es necesario llevar a cabo una planificación logística y pruebas operativas antes de la puesta en marcha.
- Trabajos previos: Antes de comenzar con el proceso de extracción, es necesario realizar distintos trabajos que garanticen el acceso seguro al depósito, incluyendo el desarrollo de rampas y galerías, la preparación del frente de extracción para asegurar que sean zonas seguras tanto para los trabajadores como para la maquinaria, y realizar las pruebas iniciales o pruebas piloto que evalúan el rendimiento del mineral.

4. **Explotación:**

Esta es la fase central del ciclo de vida de una mina, llevándose a cabo la extracción de los minerales que ya han sido identificado y evaluado previamente. Para llevarse a cabo se utilizan métodos específicos diseñados en función de distintos factores como la profundidad del depósito, el tipo de mineral, la forma del yacimiento... etc. y su objetivo principal es minimizar los costos garantizando la seguridad de los trabajadores y mejorar la eficiencia para obtener un mayor beneficio. [4]

Laura Valero Sánchez

La roca triturada se clasifica mediante cribas vibratorias, separando las que tienen el tamaño adecuado de las que necesitan una nueva trituración.

- *Equipos de trituración:*
 - I. Trituradoras de mandíbulas
 - II. Trituradoras giratorias
 - III. Trituradoras de cono

b) Molienda:

Tras la trituración el material pasa a la molienda, donde las partículas se reducen aún más de tamaño. De esta manera, se obtienen los minerales valiosos de la matriz rocosa.

- *Proceso:*

El material que ha sido previamente triturado se introduce en un molino junto con agua, formando una especie de “pulpa”.

El molino, ejerce un movimiento giratorio que rompe el mineral en partículas muy finas. Tras todo esto, la pulpa resultante se clasifica mediante hidrociclones o cribas, cuanto más finas sean las partículas, más fácil será la separación de los minerales en las próximas etapas.

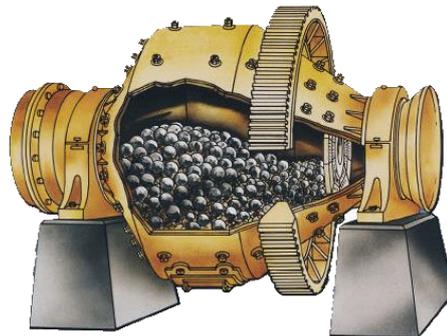


Ilustración 7. La molienda en las instalaciones de tratamiento de áridos. (Fuente: Victory Epes, 2023)

- *Equipos de molienda:*
 - I. Molinos de Bolas
 - II. Molinos de barras
 - III. Molinos semi autógenos

c) Clasificación:

Es un paso crucial que ocurre después de la molienda, garantizando que las partículas hayan conseguido el tamaño correcto para los procesos de concentración. Durante este proceso, se emplean:

- Cribas vibratorias: Separan las partículas según su tamaño por medio de mallas de diferentes diámetros.



Minería Subterránea Moderna

- Hidrociclones o clasificadores: Utilizan la fuerza centrífuga para realizar la clasificación de partículas según su tamaño. [5]

6. Cierre y restauración:

Esta es la última etapa consiste en el cierre y la restauración de la mina al final de su ciclo de vida. La planificación de esta fase comienza durante la etapa de diseño del proyecto, ya que debe garantizar la seguridad del terreno, la sostenibilidad ambiental y su perfecto acondicionamiento para un posible uso a futuro. Esta planificación, es complejo y debe ser actualizada a medida que el proyecto va avanzando. [6]

a) Aspectos clave de la planificación:

- Evaluación de riesgos: Se identifican los riesgos vinculados al cierre, entre ellos, la estabilidad de los taludes, la calidad del agua y la disposición de residuos.
- Presupuestos: Han de tenerse en cuenta durante el proyecto los costos del cierre, los cuales deben asignarse para cubrir estas necesidades.
- Cronograma: Es necesario realizar un calendario con las etapas de cierre, asegurando que se completen de manera ordenada y en el plazo establecido.

b) Cumplimiento legal y normativo:

Estos proyectos de cierre deben cumplir las normativas locales e internacionales que estén vigentes en el momento de cierre, generalmente, abarcan criterios estrictos sobre la calidad del agua, la estabilidad del suelo y la recuperación del ecosistema.

c) Gestión de impactos a largo plazo:

Aunque la restauración física del terreno es importante, también se incluye en el cierre una gestión continua de posibles impactos ambientales a largo plazo, para ello, se lleva a cabo:

- Monitoreo ambiental que permite un seguimiento de la calidad del agua, del aire y del suelo para detectar cualquier contaminación residual que pueda surgir a posteriori.
- Tratamiento de aguas para neutralizar el agua antes de su liberación al medio ambiente.
- Gestión de residuos adecuada para el tratamiento adecuado de los desechos, desde su generación hasta su eliminación o reaprovechamiento.

d) Reacondicionamiento:

Debe considerarse como reutilizarse el terreno una vez el proyecto haya sido finalizado y se haya llevado a cabo todo lo anterior. Esta parte es muy importante, ya que mejora la percepción social de la minería.

- Reforestación
- Desarrollo agrícola

Laura Valero Sánchez

- Uso turístico

3.1. DIFERENCIAS ENTRE MINERÍA A CIELO ABIERTO Y MINERÍA SUBTERRÁNEA

Como se ha expuesto, una parte clave durante la planificación del proyecto es la selección del método más adecuado para el uso de las técnicas que garanticen la estabilidad estructural, la seguridad y la correcta gestión ambiental.

Para la elección del método de extracción, se deben diferenciar dos tipos de minería: Minería a cielo abierto y minería subterránea. [7]



Ilustración 8. A la izquierda una representación de minería subterránea y a la derecha una explotación de minería a cielo abierto. (Fuente: Adrian Mercado, 2023; Debate, 2024)

Las principales diferencias que podemos encontrar entre estos dos tipos de minería se pueden clasificar en los siguientes puntos:

- **Método de explotación:**

En la minería a cielo abierto, la extracción del mineral se lleva a cabo en depósitos que están cercanos a la superficie, procediéndose a la remoción de material superficial que permite acceder al yacimiento mediante el uso de maquinaria pesada como excavadoras, camiones y dragalinas.

Se realiza mediante la eliminación progresiva de capas superficiales, dando lugar a escalones o bancos, produciéndose grandes movimientos de tierra y eliminación de la vegetación.

Por otra parte, en la minería subterránea se requiere la construcción de túneles y galerías, que permiten un acceso a los minerales, ya que estos están ubicados en profundidad. Estas construcciones, requieren sistemas de soporte que garanticen la estabilidad del macizo rocoso, además de las medidas específicas de seguridad para los trabajadores. [8]

Minería Subterránea Moderna

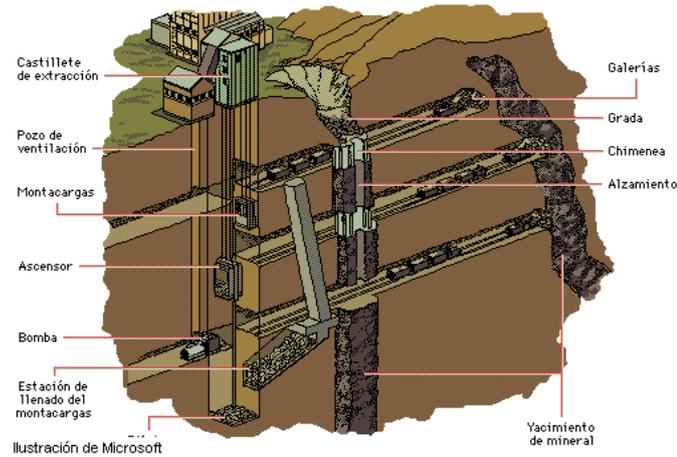


Ilustración 9. Métodos de minería subterránea. (Fuente: Geología Venezolana, 2011)

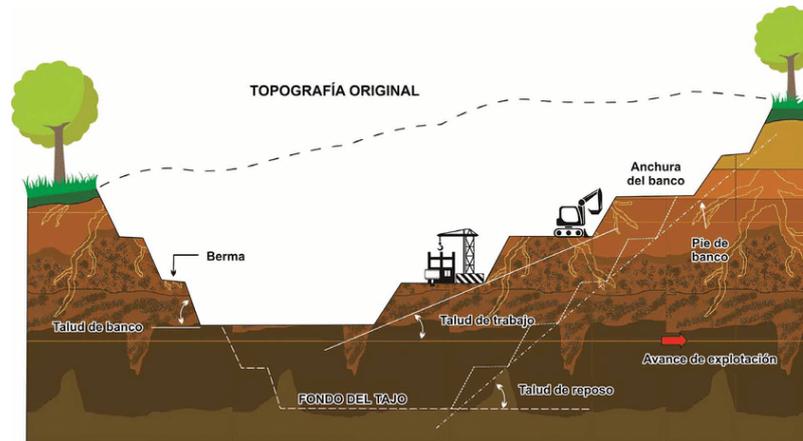


Ilustración 10. Método de explotación a cielo abierto. (Fuente: ResearchGate, 2020)

- **Costos operativos:**

Los costos operativos hacen referencia a los gastos asociados con las actividades necesarias para la extracción, procesamiento y transporte de los recursos minerales. Es decir, incluyen todos los aspectos relacionados con la operación diaria de una mina y son fundamentales para determinar la viabilidad económica del proyecto.

Pueden variar considerablemente en función del método de extracción:

En minería a cielo abierto, el uso de maquinaria a gran escala permite el movimiento de grandes volúmenes de manera rápida y económica. Este tipo de minería, a diferencia de la minería subterránea, no requiere sistemas de sostenimiento, ya que se opera a nivel de superficie, por lo que no es necesario la inversión en transporte subterráneo, y monitoreo estructural.

Laura Valero Sánchez

La minería subterránea, permite una extracción más selectiva que minimiza el procesamiento del mineral, pero presenta unos costos operativos más elevados por la complejidad de la técnica, la necesidad de sistemas de ventilación, transporte subterráneo, sostenimiento estructural y medidas de seguridad más estrictas debido a la peligrosidad de los trabajos. [8]

- **Impacto ambiental:**

La minería a cielo abierto genera un impacto ambiental mucho más visible ya que se transforman grandes superficies, llevándose a cabo la deforestación, la pérdida de biodiversidad, y la alteración del paisaje, generando además una gran cantidad de residuos que pueden terminar ocasionando problemas de drenaje si no se lleva a cabo una buena gestión de desechos.

Por otra parte, la minería subterránea, genera un impacto visible menor, debido a que no sufre un impacto superficial, presentando otros desafíos menos visibles, pero muy perjudiciales para el medio ambiente, los principales:

- *Impacto en el suelo:*

En ocasiones, debido a la extracción de material en el subsuelo y a la alteración provocada en las estructuras geológicas naturales, pueden aparecer los siguientes efectos:

- Subsistencia o hundimiento de terrenos:

“Se refiere como subsistencia minera al hundimiento de la superficie del terreno causado por la deformación y/o colapso de galerías generadas para la extracción de minerales o por la construcción de infraestructuras subterráneas, ya que el suelo intenta ocupar el vacío generado por estas obras.”

Este fenómeno, afecta directamente al terreno en la superficie, produciendo daños infraestructurales (edificios, carreteras...), alteración de paisajes, e impactos ecológicos.

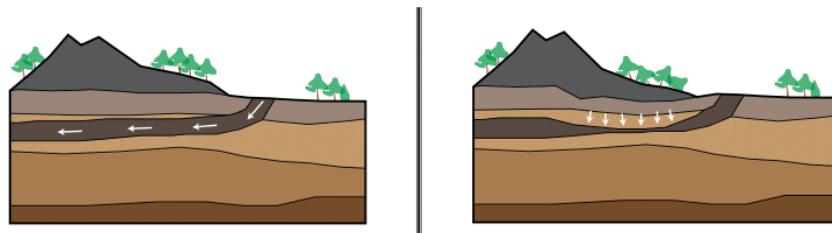


ILUSTRACIÓN 11. SUBSISTENCIA CAUSADA POR LA MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: RESEARCHGATE, 2020)

- Erosión y degradación del paisaje:

La remoción de grandes cantidades de suelo y roca deja áreas expuestas a la acción del viento y el agua, acelerando un proceso de erosión que deja como resultado paisajes irreversibles y pérdida de vegetación.

Minería Subterránea Moderna



Ilustración 12. Deforestación por minería en Madre de Dios, Perú. (Fuente: Mongabay, 2023)

- Alteración de la superficie y estratos subyacentes:
La práctica de la minería varía las características del suelo y sus estratos, generando:
 - I. Fragmentación de las capas geológicas, debido a la perforación, voladura y extracción del material.
 - II. Cambio en la composición química del suelo debido a la introducción de contaminantes en el suelo y aguas subterráneas.
- **Contaminación del agua:**
Debido a la liberación de metales pesados y productos químicos utilizados en los procesos de extracción y procesamiento, se puede encontrar contaminación en aguas subterráneas o superficiales. Siendo los principales tipos de contaminación el drenaje ácido de mina, la liberación de aguas residuales no tratadas y la infiltración de contaminantes en acuíferos.
- **Seguridad Laboral:**
Tanto la minería a cielo abierto como la subterránea tienen factores de riesgo elevados por la dificultad de los trabajos, aunque la seguridad laboral depende de distintos factores existe una diferencia notable dependiendo del método utilizado. [8]
La minería a cielo abierto se realiza al aire libre, por lo que las condiciones de trabajo son menos restrictivas que la minería subterránea. Esto no lo exime de riesgos, y la mayor parte de los accidentes están relacionados principalmente con:
 - Uso de maquinaria pesada: Especialmente vuelcos o fallos mecánicos.
 - Gestión de taludes: La inestabilidad de los terrenos puede favorecer el riesgo de deslizamiento.



Laura Valero Sánchez

- Derrumbes superficiales: Pueden afectar directamente a los trabajadores como a las infraestructuras.
- Condiciones climáticas.
- Polvo y ruido: Puede desencadenar en enfermedades y problemas respiratorios a largo plazo.

La minería subterránea en cambio está comprendida en lugares confinados, dando lugar a mayores riesgos. Estos riesgos requieren medidas de seguridad más estrictas y un monitoreo constante de las zonas de trabajo para evitar:

- Derrumbes
- Problemas respiratorios
- Accidentes
- Inundaciones y explosiones

3.2. PRINCIPALES MÉTODOS DE EXPLOTACIÓN SUBTERRÁNEA

Una vez expuestos los principios de la minería y diferenciado los 2 tipos de minería principales, se va a enfocar la atención del trabajo en la minería subterránea.

Esta práctica utiliza diferentes métodos de extracción según el yacimiento al que se enfrente, ya que la geometría, la profundidad, la inclinación y las propiedades del macizo rocoso pueden variar. [3]

Los principales métodos de explotación se dividen en tres categorías:

- I. Métodos autoportantes.
- II. Métodos soportados
- III. Métodos de hundimiento.

3.2.1 Métodos autoportantes:

Este método aprovecha la capacidad autoportante del macizo rocoso mediante el uso pilares como elementos estructurales ya que consiste en dejar una o varias cavidades que quedarán vacías una vez concluida la explotación. Tienen un diseño simple, además de un bajo costo inicial, aunque podrían sacrificar cierta recuperación mineral.

- **Cámaras y pilares:**

Esta técnica de minería se utiliza para la extracción minerales en forma tabular con espesores limitados en depósitos horizontales o con una inclinación leve. Se caracteriza por excavar cavidades en el depósito mineral conocidas como cámaras y dejando pilares de mineral o roca que tienen como función sostener el techo de la mina.

El objetivo principal del método es dejar los pilares lo más pequeños posibles para maximizar así la recuperación del mineral, sin poner en riesgo la estabilidad del techo. [9]

Minería Subterránea Moderna

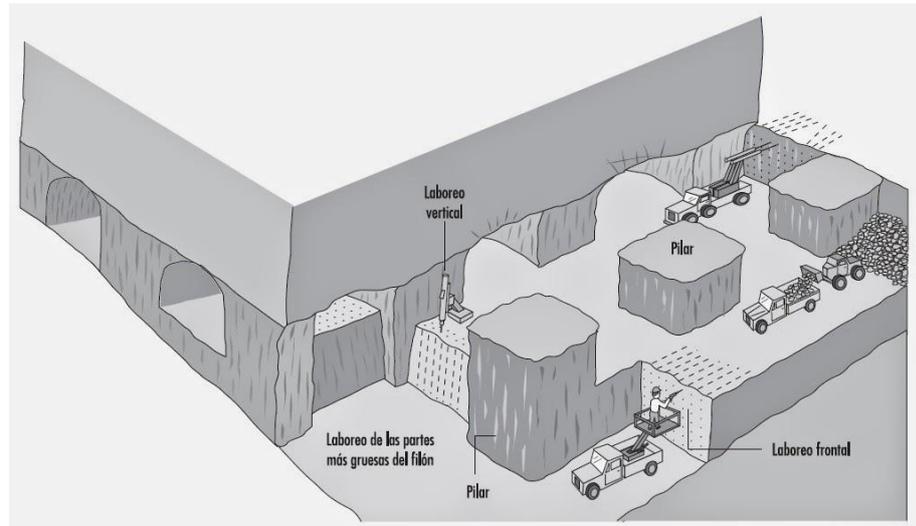


Ilustración 13. Filones inclinados con pilares en minería. (Fuente: Salud y Seguridad, 2014)

Esta distribución de cámaras y pilares está diseñada de manera regular, por norma general en forma de cuadrícula. Será la resistencia del macizo rocoso la que determinará el tamaño de los pilares, determinándose mediante una combinación de fórmulas empíricas, modelos matemáticos y estudios geotécnicos.

○ *Fórmulas clásicas:*

Estas fórmulas están basadas en relaciones empíricas que consideran las propiedades mecánicas del macizo, las dimensiones del pilar y las tensiones a las que se somete.

1) *Fórmula de Salamon y Munro:*

Utilizada para calcular la resistencia de los pilares en minas de carbón y otros materiales blandos. Está basada en datos empíricos y establece que la resistencia del pilar depende del tamaño, la forma y las propiedades del material del pilar:

$$\sigma_p = k \cdot \sigma_c \cdot \left(\frac{\omega}{h}\right)^a$$

Siendo:

σ_p : Resistencia del pilar

k : Factor empírico basado en el material

σ_c : Resistencia a compresión uniaxial del material del pilar

ω : Ancho del pilar

h : Altura del pilar

a : Exponente empírico que depende del tipo de material



Laura Valero Sánchez

II) Fórmula de Bieniawski:

Aunque la fórmula es similar a la de Salamon y Munro, esta fue propuesta para materiales más duros, se basa en la relación ancho-altura del pilar, está centrada en la resistencia de pilares rectangulares en función de la resistencia a compresión de la roca. Es especialmente útil para depósitos con pilares más altos que anchos, donde la estabilidad depende de evitar el pandeo del material.

$$\sigma_p = \sigma_c \cdot \left(\frac{\omega}{h}\right)^{0.5}$$

Siendo:

σ_p : Resistencia del pilar

σ_c : Resistencia a compresión uniaxial del material del pilar

ω : Ancho del pilar

h : Altura del pilar

III) Fórmula de Lunder y Pakalnis:

Aplicada en minería de metales, la fórmula considera la geometría del pilar como las propiedades del macizo rocoso.

$$F_s = \frac{\text{Resistencia del Pilar}}{\text{Esfuerzo aplicado}}$$

Siendo:

F_s : Es el factor de seguridad

Resistencia del pilar: Calculada mediante pruebas de laboratorio y modelos empíricos.

Esfuerzo aplicado: Tensiones inducidas por el peso del macizo rocoso y actividades mineras.

○ Estudios geotécnicos y ensayos de campo:

A pesar de que las fórmulas toman un carácter importante en el diseño de la estructura, es clave realizar estudios geotécnicos y ensayos de campo para poder dimensionar los pilares de una manera correcta:

- I) Pruebas de resistencia a la compresión uniaxial
Este tipo de pruebas, se llevan a cabo en muestras de roca del pilar para determinar la resistencia

Minería Subterránea Moderna

máxima del material. El valor resultante (σ_c), se utiliza en las fórmulas expuestas anteriormente pudiendo estimar de esta manera la resistencia del pilar.

II) Caracterización geotécnica del macizo rocoso:

Esta etapa incluye el análisis de:

- índice de calidad de la Roca (RQD): Sirve para dar una idea del número y condiciones de las fracturas que afectan a los materiales.
- Clasificación del macizo rocoso (RMR): Permite obtener un índice de calidad del macizo rocoso a partir de resistencia de la roca intacta, el grado de fracturación, la presencia de agua y la orientación de las discontinuidades respecto al elemento de estudio.
- Q de Barton: Índice que evalúa la competencia del macizo rocoso basándose en 6 parámetros que indican el tamaño de los bloques, la resistencia a corte entre estos y la influencia del estado tensional.

○ *Modelos numéricos y simulaciones:*

Actualmente, se utilizan aplicaciones informáticas de modelado numérico que son capaces de simular el comportamiento de los pilares prediciendo su estabilidad en función de distintos escenarios de carga.

I) Métodos de elementos finitos:

Este tipo de programas informáticos, modelan los pilares siendo posible analizar su resistencia considerando las diferentes propiedades del material, tensiones y geometrías más complejas.

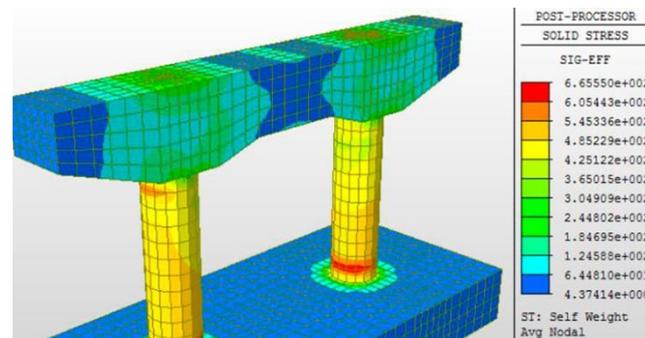


Ilustración 13. Software y herramienta para análisis y diseño de puentes. (Fuente: Zigurat, 2023)



Laura Valero Sánchez

- II) Análisis de Factores de seguridad:
Este análisis se utiliza para realizar una evaluación de la estabilidad del pilar bajo tensiones inducidas.
- III) Simulación de fallos:
Los modelos numéricos también permiten simular fallos progresivos en los pilares, de manera que se pueden evaluar distintos tipos de riesgo de colapso.
- *Otros factores para tener en cuenta para el diseño:*
Es importante tener en cuenta otro tipo de factores a la hora de realizar el diseño ya que la resistencia también puede verse influenciada por otros factores como:
 - I) Relación ancho-altura del pilar: Los pilares más anchos tienen una estabilidad mayor.
 - II) Condiciones geológicas: La presencia de agua puede reducir la resistencia del material.
 - III) Distribución de las tensiones: En depósitos con una mayor profundidad aparecen mayores tensiones inducidas por el peso del macizo rocoso.
 - IV) Esfuerzos dinámicos: Actividades como voladuras pueden introducir nuevas tensiones aumentando las existentes en los pilares.
- **Cámaras almacén:**
En este método el mineral es excavado por franjas y en sentido ascendente, comenzando por la parte baja y avanzando progresivamente hacia arriba. Parte del mineral arrancado va quedando en la cámara que se va formando como consecuencia de la excavación, sirviendo como plataforma de apoyo para extraer el mineral que se encuentra inmediatamente por encima y, al mismo tiempo, realizar la entibación y soporte de las paredes de la cámara. [9]



Laura Valero Sánchez

- I) Gran Inclinación: El depósito debe tener una inclinación significativa, con un ángulo mayor al ángulo de reposo del material fragmentado, permitiendo de esta manera que el mineral fragmentado no se deslice fuera de la cámara.
 - II) Mineral sólido: El mineral que se extrae debe tener una resistencia adecuada para evitar su degradación durante el almacenamiento.
 - III) Techo y paredes estables: Es muy importante realizar un seguimiento continuo de la estabilidad estructural del macizo rocoso para prevenir posibles derrumbes durante los trabajos.
- *Cálculos, fórmulas y estudios para el diseño del método:*
El método de cámaras almacén requiere diferentes cálculos para garantizar la eficiencia y seguridad de los trabajos, además de la optimización de la recuperación del mineral almacenado.

I) Cálculos geotécnicos:

El diseño de las cámaras depende de un análisis geotécnico que permitirá realizar la evaluación de la estabilidad del techo, las paredes y el piso de las cámaras, así como la capacidad del mineral almacenado para que pueda actuar como soporte.

➤ Resistencia del macizo rocoso:

Se utilizan sistemas de clasificación geotécnica como el RMR o Q de Barton que permitirán evaluar la calidad del macizo determinando así las dimensiones seguras de las cámaras.

➤ Criterio de rotura de Hoek-Brown:

Se trata de un criterio empírico, que permite valorar, de manera sencilla, la rotura de un medio rocoso mediante la introducción de las principales características geológicas y geotécnicas.

La fórmula general es la siguiente:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \cdot \left(m \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 8 \right)^{0.5}$$

Siendo:

σ_1 : Tensión máxima aplicada

σ_3 : Tensión mínima confinante

σ_c : Resistencia a compresión uniaxial

$m, 8$: Parámetros del macizo rocoso definidos según su calidad.



- Análisis de estabilidad del techo y paredes:
Utilizado principalmente para la evaluación de riesgo de colapso del techo. Se utilizan aplicaciones informáticas que simulan las condiciones del macizo y las tensiones inducidas por la extracción.

II) Cálculo del ángulo de reposo:

Como se ha explicado anteriormente, el mineral fragmentado se almacena en la cámara, manteniéndose estable sin deslizarse hacia abajo, esto depende del ángulo de reposo del material, que se define como el ángulo máximo que un material granular puede formar antes de deslizarse, y se calcula a través de la siguiente fórmula:

$$\tan(\theta) = \mu$$

Siendo:

θ : *Angulo de reposo*

μ : *Coefficiente de fricción interno del material*

III) Dimensiones de la cámara:

La cámara almacén determinará el tamaño óptimo de los espacios excavados, garantizando estabilidad y eficiencia operativa, por lo que será para su diseño será importante conocer el volumen de la cámara, la proporción del mineral almacenado y el espaciado entre cámaras.

Volumen de la cámara: $V = A \cdot L$

Proporción del mineral almacenado:

$$V_{almacenado} = 0.6 \cdot V$$

Espaciado entre cámaras:

$$FS = \frac{\text{Resistencia del macizo rocoso}}{\text{Esfuerzos inducidos por la extracción}}$$

IV) Esfuerzos en el mineral almacenado:



Laura Valero Sánchez

Debido a que el material fragmentado y almacenado tiene que soportar parte de las tensiones del macizo, se lleva a cabo un análisis de carga para verificar

Esfuerzo vertical en el mineral: $\sigma_v = \rho \cdot g \cdot h$

Siendo:

σ_v : Esfuerzo Vertical
 ρ : Densidad de material almacenado
 g : Aceleración de la gravedad
 h : Altura del material almacenado

- V) Recuperación del mineral almacenado:
Esta última fase es imprescindible para optimizar la extracción. Se deben contemplar en los cálculos pérdidas por compactación o contaminación.
Tasa de recuperación:

$$R = \frac{\text{Mineral Recuperado}}{\text{Mineral extraído total}} \times 100$$

Para un rendimiento óptimo, este porcentaje deberá superar el 95%, lo cual dependerá del mineral y de las técnicas utilizadas durante el proceso de recuperación.

Dilución del mineral:

Esta es evaluada en función de material no valioso mezclado con el mineral recuperado. Se utiliza la siguiente fórmula:

$$D = \frac{\text{Material no valioso}}{\text{Total recuperado}} \times 100$$

- Cámaras por subniveles:
Este método consiste en la extracción del mineral mediante creación de subniveles en la zona del mineral, facilitando la fragmentación y el transporte mineral. Es ideal para la extracción del mineral en depósitos minerales verticales con roca competente.
Este método permite una alta productividad pues la fragmentación del mineral se realiza por gravedad, de manera que no requiere

Minería Subterránea Moderna

sostenimiento extensivo, reduciéndose los costos por tonelada extraída de mineral. [9]

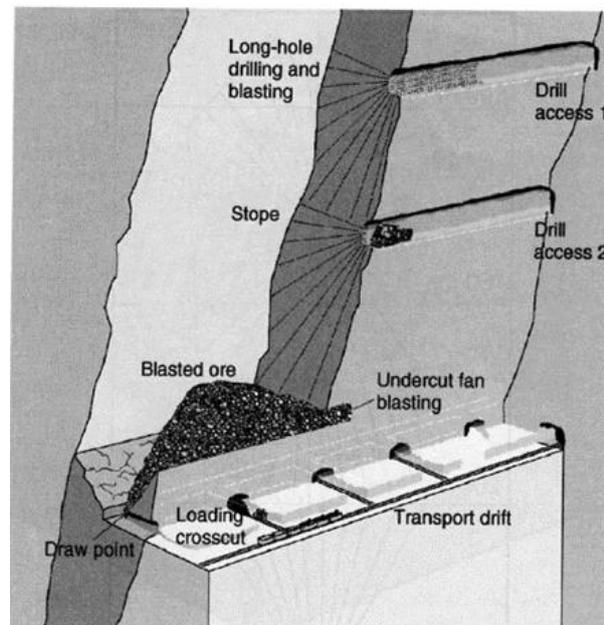


ILUSTRACIÓN 15. ESQUEMA DEL MÉTODO DE MINERÍA SUBLEVEL STOPING. (FUENTE: RESEARCHGATE, 2023; HUSTRULID & BULLOCK, 2001)

El proceso de extracción cuenta con las siguientes fases:

1. Desarrollo de subniveles:

Durante esta fase se van creando los niveles de trabajo, formando intervalos regulares dentro del cuerpo mineral, que permite el acceso a la perforación y voladura.

2. Perforación de chimeneas y taladros en anillo:

Una vez creados los subniveles, se llevan a cabo las perforaciones en anillo para fragmentar así la roca.

3. Voladura controlada:

La extracción comienza desde la parte superior del yacimiento, avanzando progresivamente hacia abajo. Para fragmentar el mineral, se utilizan voladuras secuenciales, que permiten fragmentar el mineral sin necesidad de afectar la estabilidad del entorno.

4. Extracción del mineral:

El mineral cae por gravedad hacia los niveles inferiores, procediéndose a su carga y transporte.

3.2.2 Métodos soportados

Se conoce como métodos soportados o métodos de soporte artificial, aquellas técnicas que requieren elementos de soporte adicionales para poder mantener la estabilidad del macizo durante las excavaciones. Estos métodos se utilizan principalmente cuando la

Laura Valero Sánchez

roca no es lo suficientemente competente y necesita un soporte adicional para mantenerse estable.

- **Corte y relleno:**
Esta técnica se aplica en yacimientos con fuerte buzamiento, y se caracteriza por extraer la mena mediante recortes horizontales y/o verticales. Una vez extraída una franja, se rellena con material estéril que sirva como piso de trabajo, permitiendo sostener las paredes de la cámara y el techo.
Previo a la aplicación del método, es necesario, al igual que en métodos anteriormente explicados realizar un cálculo del factor de seguridad del macizo rellenado, que permita garantizar la estabilidad del relleno utilizado en la mina. [9]

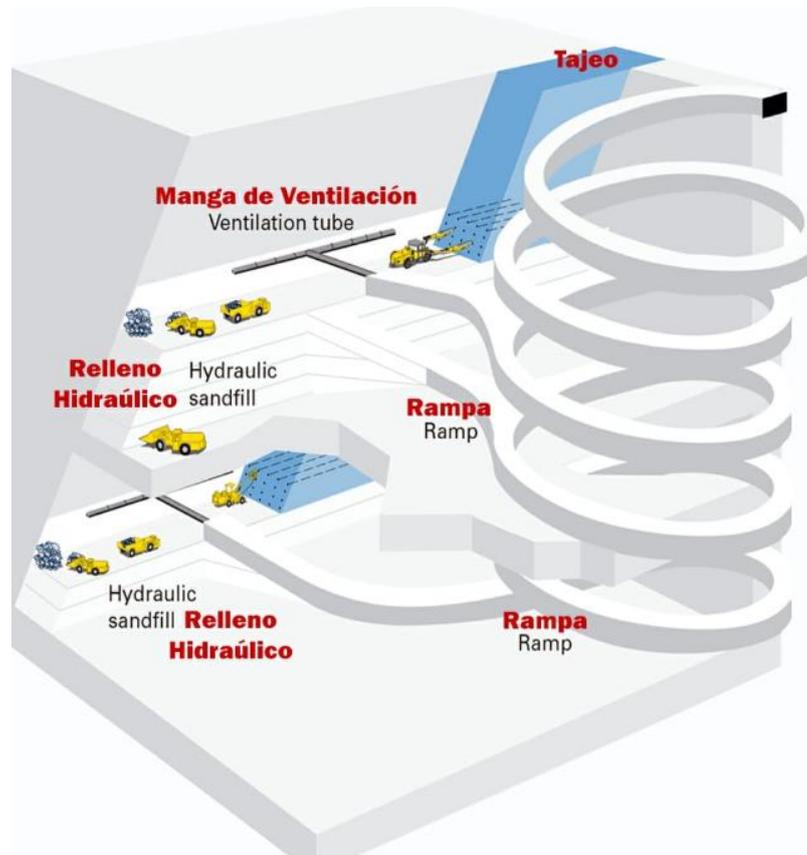


ILUSTRACIÓN 16. MÉTODO CORTE Y RELLENO (FUENTE: SLIDEPLAYER, 2023)

Además, se debe conocer el cálculo del esfuerzo vertical en el relleno, que nos permitirá conocer la cara que soportará el relleno en función de la profundidad de la excavación y la densidad del material. Para ello:

$$\sigma_v = \gamma \cdot h$$



Minería Subterránea Moderna

Siendo:

σ_v : *Esfuerzo vertical*

γ : *Peso unitario del relleno*

h : *altura de la columna de relleno*

El esfuerzo vertical no deberá superar la resistencia a la compresión del material, ya que, si esto ocurriese, habría que reforzar con cementación. En función de estos valores, se decidirá el tipo de relleno, ya que dependerá de las necesidades estructurales, existiendo distintos tipos de relleno:

I) Relleno con relaves en pasta:

Consiste en una mezcla con agua y cemento capaz de soportar la carga de niveles superiores.

II) Relleno hidráulico:

Se compone de relaves finos y gruesos transportados por tuberías con un alto contenido de agua.

III) Relleno con escombros y estériles.

▪ Cámaras y pilares con relleno:

Existe una variante del método de cámaras y pilares clásico que se utiliza en zonas donde el macizo es más débil, por lo que se incorpora a esta técnica el relleno de los espacios vacíos mejorando la estabilidad y recuperación del mineral. A través de este método, se combinan las ventajas de las técnicas de cámaras y pilares y de corte y relleno.

El proceso de extracción es similar al método tradicional:

1. Excavación de cámaras dejando los pilares como soporte.
2. Una vez realizada la extracción del mineral de interés, se procede a rellenar estas cámaras con material estéril o pastas de relleno.
3. Mediante el relleno, se consigue una recuperación parcial o total de los pilares en las etapas posteriores

3.2.3 Métodos de hundimiento

Los métodos de hundimiento son técnicas que se llevan a cabo provocando el colapso controlado del macizo rocoso, de esta manera el mineral se fragmenta por acción de la gravedad procediendo a su recuperación en los niveles inferiores.

▪ Hundimiento por subniveles:

Laura Valero Sánchez

Esta técnica es una de las más conocidas en métodos de hundimiento. Consiste en realizar numerosas perforaciones horizontales en varios subniveles dentro del yacimiento, para la posterior detonación controlada y de esta manera fragmentar el mineral. A continuación, se procede a la recuperación progresiva desde niveles inferiores. Una vez acabadas las labores en esa zona de trabajo, se deja colapsar el macizo de manera controlada.

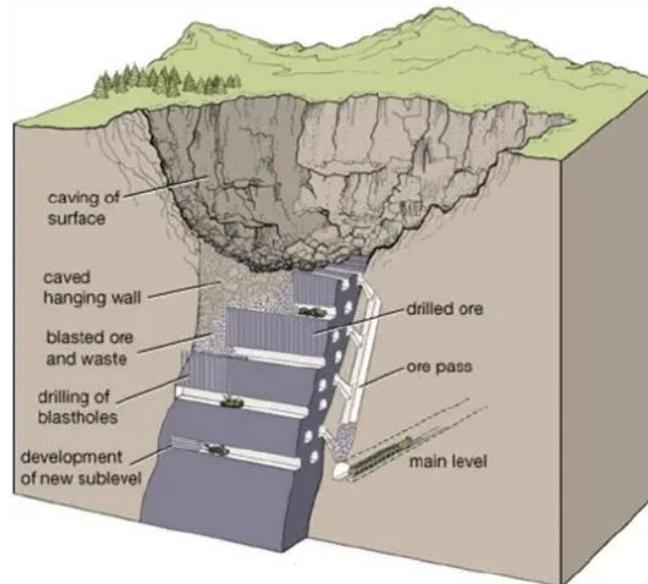


ILUSTRACIÓN 17. MÉTODO DE HUNDIMIENTO POR SUBNIVELES. (FUENTE: SCRIBD, 2023)

Para llevar a cabo este método se debe estimar la zona de influencia del hundimiento, para lo que se usa la ecuación de empalme del hundimiento:

$$R_h = K \cdot H$$

Siendo:

R_h : Radio de hundimiento

K : Coeficiente empírico de hundimiento

H : Altura del subnivel

De esta manera, se calcula la cantidad de material que se hundirá garantizando que la dilución del mineral no afecte la rentabilidad de la operación.

- Tajo largo:

Minería Subterránea Moderna

Este método está altamente mecanizado en el que toda la longitud de un frente de trabajo se extrae de manera continua mediante cortadoras automáticas y sistemas de transporte mecanizado. Este método permite extraer el mineral de manera masiva, eficiente y con altos niveles de recuperación.

Aunque presenta ciertas ventajas como una alta productividad y una mayor seguridad frente a otros métodos, tiene algunos inconvenientes como su alto coste de inversión o la necesidad de trabajar con roca competente.

Además, el hundimiento del techo puede afectar a la superficie, por lo que requiere un control continuo.

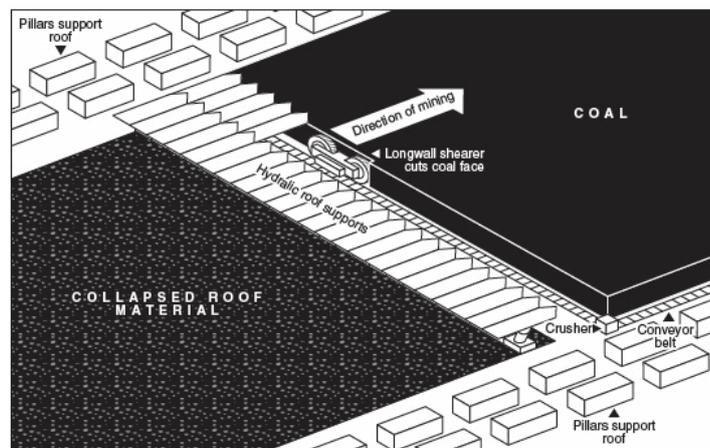


ILUSTRACIÓN 18. MÉTODO DE MINERÍA TAJO LARGO. (FUENTE: INARQUITARU, 2014)

- Tajo corto:

Este método es una variante del método de tajo corto, en la que se emplean frentes de menor extensión.

Las condiciones que permiten llevar a cabo esta técnica son similares a las de tajo largo, pero en este caso se llevan a cabo tajos más cortos por la imposibilidad de llevar a cabo un tajo más largo por las restricciones geológicas que puede presentar el yacimiento.



Laura Valero Sánchez

4. TECNOLOGÍA EN MINERÍA SUBTERRÁNEA MODERNA

La minería subterránea moderna ha evolucionado con el paso del tiempo gracias a la adopción de nuevas tecnologías que han ido avanzando. Estas innovaciones no solo mejoran la eficiencia y la productividad, sino que también han incrementado la seguridad de los trabajadores. La automatización, la robótica, la inteligencia artificial y el internet de las cosas están revolucionando la manera de trabajar en las operaciones mineras subterráneas de manera que se permite un mayor control y una mayor precisión en tiempo real de los procesos.

A continuación, se desarrollan estas nuevas tecnologías.

4.1. AUTOMATIZACIÓN DE EQUIPOS Y MAQUINARIA:

La automatización y los sistemas de control remoto son tecnologías avanzadas para este tipo de minería. No solo hacen visibles los procesos de extremo a extremo y proporcionan información real, sino que también mejoran la eficiencia y seguridad de las operaciones mineras.

Estos sistemas, permiten obtener un control total sobre sus flotas, reduciendo así costos, mano de obra y mejorar la eficiencia energética. Con la automatización, las minas pueden operar con mayor precisión, adaptándose rápidamente a las condiciones cambiantes y optimizando la producción. [10]

Beneficios clave de la automatización:

1. Mejora la seguridad y condiciones de trabajo
2. Aumento de productividad: Estas operaciones pueden funcionar 24 h al día sin interrupciones, aumentando así la productividad.
3. Gestión de flotas móviles y mejor utilización de los vehículos
4. Operaciones de control remoto de la mina: Permite operar en la mina desde ubicaciones seguras y remotas.
5. Análisis de la producción y optimización del rendimiento: estos datos en tiempo real recopilados por los sistemas de control permiten un análisis detallado de la producción, ayudando a identificar áreas de mejora, optimizando el rendimiento.

4.1.1. vehículos autónomos

Estos vehículos incorporan tecnologías avanzadas que eliminan la necesidad de conductores humanos, incluyendo camiones de transporte y equipos de perforación que brindan diferentes beneficios en términos de seguridad, productividad, costos e impacto ambiental.

Minería Subterránea Moderna



ILUSTRACIÓN 19: AUTOMATIZACIÓN Y TECNOLOGÍAS PARA LA MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: TECNOLOGÍA MINERA, 2023)

Tecnologías aplicadas a los vehículos autónomos:

- **Sensores avanzados:**

Estos sensores permiten a los vehículos autónomos recopilar información del entorno para navegar, operar y tomar decisiones de manera autónoma. Se han convertido en esenciales para garantizar un funcionamiento correcto y seguro de los vehículos. [11]

Dentro de estos sensores, se encuentra:

- *LIDAR:*

Este tipo de sensor utiliza puntos de luz láser que permite medir distancias para un posterior dimensionado del entorno.

Su alta precisión y la elevada capacidad para operar en movimiento permite crear un mapa 3D que permita identificar obstáculos como paredes y desniveles en los túneles, de tal manera que se eviten colisiones y se puedan optimizar las rutas.

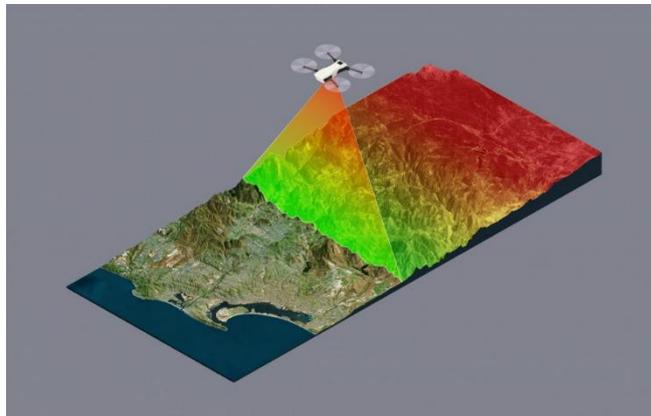


ILUSTRACIÓN 20. TECNOLOGÍA LIDAR (FUENTE: YELLOWSCAN, 2023)

Laura Valero Sánchez

- *Cámaras de alta resolución:*
Se trata de cámaras con lentes avanzados que capturen imágenes detalladas del entorno. Permiten obtener a los sistemas autónomos una visión visual para poder detectar señales, marcas en el suelo o personas, identificando así objetos y obstáculos. Estas cámaras son capaces de capturar detalles finos, ya sean fisuras o irregularidades en el terreno.



ILUSTRACIÓN 21. TOPOGRAFÍA CON DRONES. (FUENTE: ARQUIDRON, 2020)

- *Sensores ultrasónicos:*
Tienen una función similar a LIDAR, pero en este caso emiten ondas de sonido con el que miden el tiempo de retorno tras rebotar en un objeto, de esta manera detectan objetos cercanos en rangos cortos, permitiendo maniobrar en espacios pequeños.
- *Sensores ambientales:*
Son dispositivos diseñados para medir variables ambientales críticas, como temperatura, gases tóxicos y niveles de oxígeno. Su objetivo principal es incrementar la seguridad, previniendo accidentes relacionados con atmosferas peligrosas, para ello, monitorean, alertan a los sistemas sobre condiciones peligrosas (presencia de metano, monóxido de carbono...).
- **Sistemas de navegación autónoma:**
Permite a los vehículos operar eficientemente en entornos dinámicos y complejos, combinando distintas tecnologías que les permite adaptarse a cambios que puedan aparecer en el entorno. [11]
Los componentes principales son los siguientes:
 - *Mapeo dinámico:*
Este mapeo permite que los vehículos creen y actualicen en tiempo real las representaciones del entorno subterráneo. Tiene gran importancia ya que los túneles y frentes de trabajo cambian constantemente. Funcionan apoyándose en los sensores explicados previamente con los que recopilan datos de manera continua, procesando la

Minería Subterránea Moderna
información y generando los mapas, actualizándose en tiempo real.

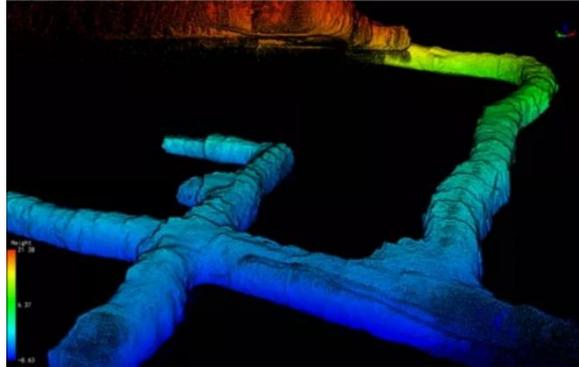


ILUSTRACIÓN 22. MODELADO 3D DE MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: LE VENT VERT, 2023)

- *Inteligencia artificial:*

La aparición de la inteligencia artificial recientemente es un gran avance en este tipo de trabajos ya que permite a los vehículos procesar grandes cantidades de datos en tiempo real, pudiendo así analizar el entorno y tomar decisiones autónomas sobre el movimiento y operación.

Estos algoritmos automáticos procesan los datos de distintos sensores, evaluando factores como la velocidad, la distancia a obstáculos y condiciones del terreno permitiendo tomar decisiones rápidas como un ajuste de velocidad, cambio de rutas o detenerse si fuese necesario.

La inteligencia artificial tiene algunas aplicaciones específicas con las que no se trabajaba hasta día de hoy como puede ser el reconocimiento de patrones, la predicción de riesgos anticipándose mediante un análisis predictivo, y optimización operativa, que permite un reajuste de rutas maximizando la eficiencia.
- *Sistemas de posicionamiento:*

Debido a que el sistema de posicionamiento global (GPS) no funciona en minería subterránea pues las señales no llegan al interior de los túneles, se recurre a unas tecnologías complementarias con las que se puede calcular su ubicación exacta en todo momento:

 - *Balizas:* Dispositivos colocados en los túneles que emiten señales que los vehículos pueden captar, calculando así su posición.

Laura Valero Sánchez

- Redes de comunicación local: Redes y nodos wifi que permiten la triangulación precisa de la posición.
- INS (sistemas de navegación inercial): Utilizan giroscopios que permite estimar la posición del vehículo en movimiento de manera independiente.



ILUSTRACIÓN 23. EL SISTEMA DE POSICIONAMIENTO LOCAL Y COMUNICACIÓN PARA MINAS. (FUENTE: SLIDESHARE, 2023)

▪ **Comunicación en red:**

Esta componente de los sistemas de navegación autónoma es clave ya que es el que permite la interacción fluida entre los vehículos, los sensores y los centros de control, permitiendo que las operaciones se realicen de manera eficiente, segura y coordinada.

○ *IoT (Internet de las cosas):*

Este término hace referencia a los sistemas de dispositivos físicos que reciben y transfieren datos a través de redes inalámbricas con poca intervención humana. Esto es posible gracias a la integración de dispositivos informáticos en todo tipo de objetos.

En minería subterránea, los vehículos, sensores... etc, se interconectan dando lugar a un ecosistema inteligente.

○ *V2X (Vehicle to everything):*

Describe la comunicación inalámbrica en tiempo real de un vehículo en cuestión con todos los elementos de comunicación posibles del entorno.

De esta manera se permite la comunicación bidireccional entre los vehículos y otros elementos del sistema.

○ *Supervisión remota:*

El monitoreo remoto se compone de dispositivos de sensores instalados en maquinaria y áreas estratégicas de la mina, los cuales recopilan datos relacionados con la producción, desgaste de equipos, temperaturas y niveles de gas. Estos datos se

Minería Subterránea Moderna

transmiten de manera segura a centros de control ubicados fuera del sitio minero, donde los operadores monitorean las condiciones en tiempo real

Características y funciones de los vehículos autónomos:

- **Camiones de transporte:**

Este tipo de camión está diseñado para llevar a cabo el traslado de volúmenes importantes de material desde el frente de trabajo hasta los puntos de procesamiento, ya sea de almacenamiento o descarga.

Ofrecen las siguientes ventajas:

- *Trabajan sin interrupción, maximizando el tiempo de trabajo.*
- *Mejoran la seguridad ya que reducen la presencia humana en áreas peligrosas.*
- *Disminuyen los costos laborales.*

4.1.2. Equipos de perforación y carguío autónomos:

- **Perforadoras autónomas:**

Una perforadora autónoma es un equipo utilizado en minería capaz de realizar perforaciones de forma independiente, sin necesidad de una operación manual constante. Estos equipos están diseñados para ejecutar tareas de perforación de forma automatizada, utilizando tecnologías avanzadas como sistemas de posicionamiento GPS y control remoto para optimizar la eficiencia y precisión. [12



ILUSTRACIÓN 24. LAS PERFORADORAS AUTÓNOMAS DE EPIROC DAN LA VUELTA AL MUNDO.
(FUENTE: INTEREMPRESAS, 2023)

Estos equipos, se caracterizan por:

- Son programables, pudiendo operar según parámetros establecidos como profundidad, diámetro...
- Uso de tecnologías avanzadas que permiten evaluar de manera eficaz las condiciones del terreno permitiendo ajustar sus operaciones.
- Pueden realizarse múltiples perforaciones de manera simultánea con mayor precisión.

Laura Valero Sánchez

- Ofrece una optimización de tiempo para realizar las perforaciones.
- Se obtienen resultados más precisos que con la perforación manual.
- **Cargadores frontales autónomos (LHD- Load Haul Dump)**
Los cargadores frontales están preparados para excavar, cargar, acarrear, empujar materiales y transportarlos en trayectos breves- Suelen trabajar con roca dinamitada, piedras, tierra, arena... [13]



ILUSTRACIÓN 25. CARGADORAS AUTÓNOMAS DE MINERÍA SUBTERRÁNEA LHD. (FUENTE: CATERPILLAR, 2023)

La automatización de estos equipos ofrece las siguientes ventajas:

- Operan en túneles estrechos y condiciones subterráneas adversas, gracias al diseño y los sistemas de navegación autónoma.
- Los sensores que llevan integrados les permiten ajustarse a la trayectoria más conveniente en tiempo real, siendo capaces de detectar obstáculos o rutas más óptimas.
- Trabajo de manera continua, optimizando ciclos de carga y transporte, lo que evita tiempos muertos o parones.

4.2. MONITOREO REMOTO Y SISTEMAS DE CONTROL

El monitoreo remoto y los sistemas de control se han convertido en elementos clave para la minería subterránea moderna ya que han mejorado significativamente la eficiencia, seguridad y productividad de las operaciones.

El objetivo de estos sistemas es poder llevar a cabo una supervisión un control de equipos y procesos desde ubicaciones remotas, mejorando la seguridad de los trabajadores y reduciendo los riesgos que conlleva la exposición a entornos peligrosos.



ILUSTRACIÓN 26. TECNOLOGÍAS DE MONITOREO REMOTO EN MINERÍA. (FUENTE: TECNOLOGÍA MINERA, 2023)

Las características principales que tienen estos sistemas son las siguientes:

- **Monitoreo en tiempo real:**
Permite la supervisión constante de equipos, procesos, condiciones ambientales... favoreciendo el uso de alertas inmediatas sobre anomalías que puedan surgir en momentos determinados.
- **Control remoto:**
Este control permite el manejo de maquinaria desde ubicaciones lejanas, minimizando así los riesgos para los trabajadores y permitiendo gestionar múltiples equipos simultáneamente.
- **Análisis de datos:**
El uso de herramientas avanzadas permite identificar patrones de manera que se puedan optimizar procesos. Esto permite llevar a cabo un mantenimiento predictivo que nos permita evitar fallos inesperados.
- **Integración de datos:**
Todos los elementos presentes generan información única, la cual se combina para una vista completa de las operaciones, teniendo en cuenta toda la información obtenida del entorno.

Tecnologías clave para el monitoreo remoto y los sistemas de control:

- **Sistemas de posicionamiento y seguimiento: RealTrac.**
El sistema modular de posicionamiento local (RTLS) RealTrac es una solución multifuncional que permite determinar la ubicación de personas y objetos en áreas limitadas y dentro de edificios, realizar localización y tracking. También el sistema RealTrac recopila estadísticas de traslados, proporciona la comunicación digital y transmisión de datos digitales del sistema y equipo extraño. [14]

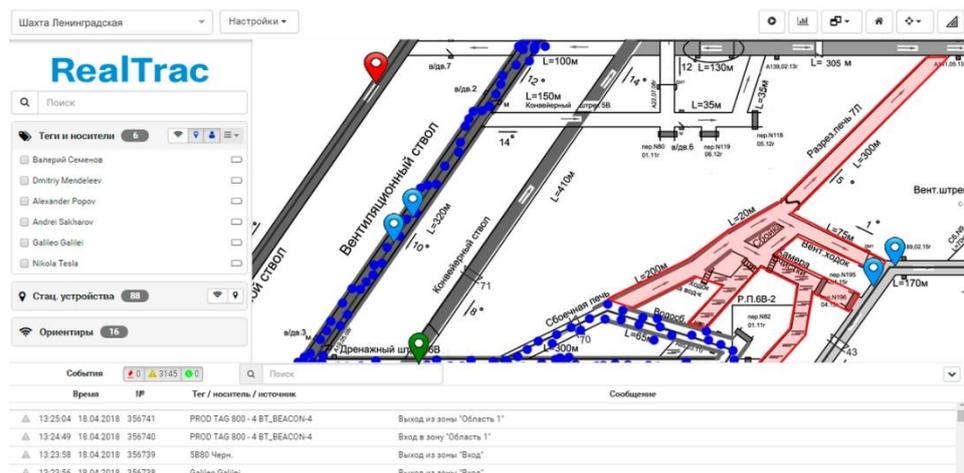


ILUSTRACIÓN 27. REALTRAC EN MINERÍA. (FUENTE: REALTRAC, 2023)

Este sistema de posicionamiento destaca por:

- Localización precisa: Rastrea la ubicación exacta tanto del personal como de los equipos con un margen de error de 1m.
- transmisión de datos en tiempo real: Permite la comunicación bidireccional mediante transmisión de datos, voz y telemetría, asegurando una conectividad continua en toda la mina.
- Monitoreo continuo de seguridad: supervisa permanentemente las posiciones dentro del entorno subterráneo, detectando movimientos irregulares y emitiendo alertas.

■ **Plataformas de Software integradas: HxGN Geomonitoring Hub**

Es una plataforma de software avanzada para la visualización y el análisis integrados del entorno de la mina y que reúne toda la tecnología de sensores en una visión holística. HxGN GeoMonitoring Hub permite la comparación y verificación cruzada de datos y la elaboración de informes personalizados, mediante la recopilación continua de datos en tiempo real, a partir de sensores de auscultación y geotécnicos, y puede conectarse a proveedores de soluciones, expertos en la recopilación, auscultación y gestión de datos a distancia y en tiempo real. [15]

Estas plataformas de software cuentan con:

- *Integración de datos multisensor:*
Sirve para reunir información de:
 - Estaciones totales: Monitorean deformaciones en estructuras y terreno.
 - GNSS: Proporcionan información para posicionamiento y seguimiento.
 - Sistemas de radar: Detectan movimientos en la superficie.
 - Sensores geotécnicos: Miden parámetros como la presión, la tensión y los desplazamientos.
- *Análisis visual y detallado:*

Minería Subterránea Moderna

- Este tipo de plataformas, permiten llevar a cabo representaciones gráficas, lo cual permite analizar patrones, tendencias y áreas críticas de manera intuitiva.
- *Planificación estratégica:*
 - Mediante la toma de datos en tiempo real, se facilita la toma de decisiones, mejorando la precisión y eficacia de las operaciones.
- **Servicios de monitoreo Remoto: Sandvik Remote Monitoring Service**

Este servicio de monitoreo es una solución actual cuyo fin es reducir los costos en la minería subterránea. Aprovecha la conectividad avanzada y el análisis de datos más rápido, consigue llevar a cabo una supervisión continua y en tiempo real de los equipos subterráneos. [16]

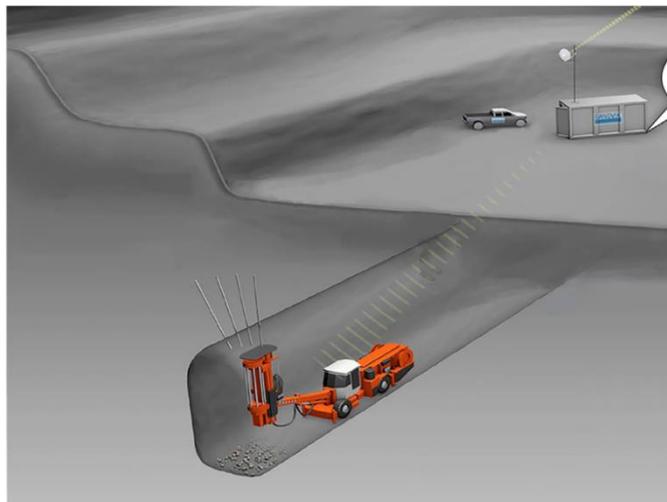


ILUSTRACIÓN 28. MONITOREO REMOTO SANDVICK (FUENTE: SANDVIK, 2023)

Sus características principales son las siguientes:

- *Análisis de grandes volúmenes de datos:*

Este sistema es capaz de recopilar y enviar información de manera constante, procesando los datos mediante algoritmos capaces de identificar tendencias y problemas potenciales.
- *Detección temprana de anomalías:*

El análisis de la ingente cantidad de datos permite identificar irregularidades antes de que ocurran, proporcionando soluciones predictivas que puedan servir para prevenir interrupciones en las operaciones.

Laura Valero Sánchez

- *Optimización del tiempo de servicio:*
Mejora la disponibilidad y el rendimiento de los equipos al programar mantenimientos en función de las necesidades reales de cada momento.

4.3. DRONES PARA INSPECCIÓN Y CARTOGRAFÍA

Un dron es un vehículo aéreo no tripulado, es decir, que es un tipo de aeronave que es capaz de desplazarse por el aire sin que haya un piloto a bordo. Pueden ser controlados de manera remota, o por medio de programación específica mediante software y GPS para que operen de forma autónoma. [17]

Esta nueva tecnología se ha aplicado a la minería transformando algunas operaciones de inspección por las características que tienen. A continuación, se expone el impacto de los drones en dos áreas clave: Inspección subterránea y cartografía.

- **Inspección subterránea:**
La inspección de subsuelo con drones es una técnica no invasiva que utiliza drones equipados con cámaras y sensores especiales para obtener imágenes detalladas de alcantarillas, túneles, pozos y otros espacios e instalaciones de subsuelo. Los drones son capaces de acceder a áreas altamente peligrosas para las personas, lo que permite inspeccionar el estado de muchas estructuras sin poner en riesgo ninguna vida. Estos drones, están equipados con luces y cámaras de alta resolución, permitiéndoles capturar información detallada y precisa de las estructuras subterráneas, pudiendo utilizar cámaras RGB, cámaras térmicas o incluso escáneres LIDAR, pudiendo así detectar o identificar fugas de líquidos o gases. [18]



ILUSTRACIÓN 29. INSPECCIÓN GEOLÓGICA. (FUENTE: HELIOS COMUNICACIÓN, 2023)

Minería Subterránea Moderna

○ **Cartografía y modelado 3D:**

La generación de mapas y modelos tridimensionales a través de los drones ofrece una comprensión detallada del entorno subterráneo. Estos drones, equipados con cámaras de alta resolución, tecnología LIDAR, cámaras RGB, son capaces de producir:

➤ Mapas geológicos detallados:

Sirven para identificar características estructurales y geológicas, como fallas, pliegues... facilitando así la planificación de la extracción y la gestión de riesgos geotécnicos.

➤ Modelos 3D de túneles y cavernas:

Esta tecnología permite modelar de manera tridimensional la infraestructura subterránea, proporcionando información sobre las dimensiones, forma y estabilidad de los túneles.

Esto es realmente útil para poder llevar a cabo una evaluación de los procesos de excavación, garantizando la seguridad estructural.

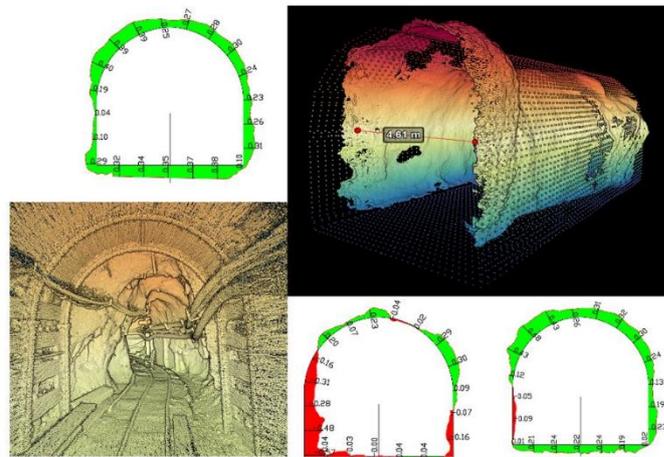


ILUSTRACIÓN 30. MODELADO 3D TÚNEL MEDIANTE LIDAR. (FUENTE: MACRONLINE, 2023)

➤ Ortomosaicos de alta resolución:

Un ortomosaico es un producto de imagen fotogramétricamente ortorrectificado organizado como mosaico a partir de una colección de imágenes, donde la distorsión geométrica se ha corregido y donde se ha realizado un balance de color de las imágenes para producir un dataset de mosaico continuo.

Laura Valero Sánchez

Combinando las imágenes capturadas a través del dron, se pueden generar orto mosaicos, ofreciendo una vista global de áreas extensas de interés. [19]

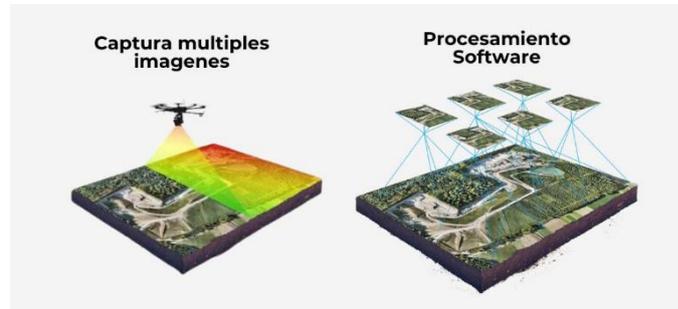


ILUSTRACIÓN 31. AGISOFT PHOTOSCAN: ORTOMOSAICOS PARA DRONES. (FUENTE: GIS AND BEERS, 2023)

4.4. APLICACIÓN DE GEMELOS DIGITALES EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

Un gemelo digital es una representación virtual de un objeto o sistema diseñado para reflejar un objeto físico con precisión. Abarca el ciclo de vida del objeto, se actualiza a partir de datos en tiempo real y utiliza la simulación, el machine learning y el razonamiento para ayudar a tomar decisiones. [20]

Esta nueva tecnología ofrece representaciones virtuales precisas de activos físicos, permitiendo analizar las operaciones que se llevan a cabo antes, durante y posterior a la explotación mejorando la eficiencia y la seguridad.

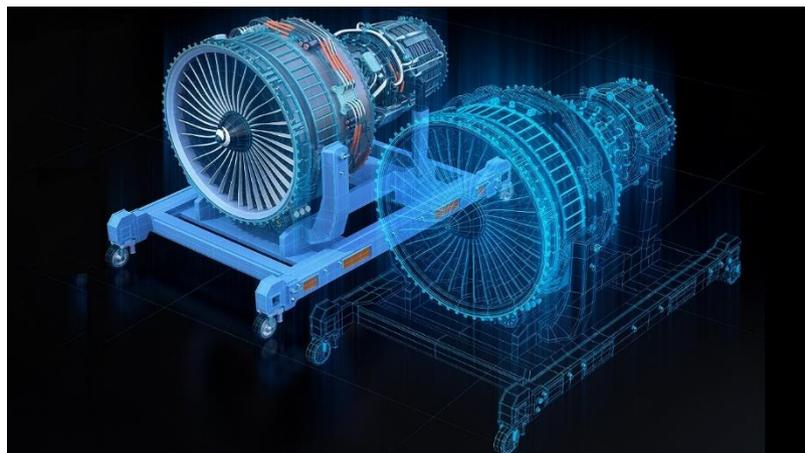


ILUSTRACIÓN 32. GEMELOS DIGITALES. (FUENTE: COMPUTING, 2023)

Los gemelos digitales en minería subterránea tienen las siguientes aplicaciones:

- **Exploración y extracción:**
 - Datos en tiempo real:

Minería Subterránea Moderna

Recopilan información geológica, geotécnica y operativa de manera constante, pudiendo llevarse a cabo un análisis constante del estado de la mina.[21]

- Simulaciones detalladas:
Permite la creación de simulaciones de condiciones subterráneas, lo que permite hacerse una idea de cómo será el diseño de las galerías, la distribución de equipos, maquinaria...
- Planificación mejorada:
Toda la recopilación de datos en tiempo real permite ajustar las operaciones, previniendo problemas potenciales y optimizando así el proceso de extracción.
- **Seguridad y gestión de riesgos:**
 - Modelos 3D detallados:
Los modelos digitales que se generan proporcionan una visión integral de las operaciones, incluyendo la ubicación de maquinaria, personal y facilitando información sobre zonas donde puede haber un mayor riesgo.
 - Simulación de emergencias:
Realizar replicas virtuales sobre situaciones de emergencia sirve como apoyo para la creación de planes de evacuación, respuestas más tempranas ante estos riesgos, logrando ir siempre un paso por delante y reduciendo así el impacto de estos posibles eventos.
- **Mantenimiento predictivo:**
 - Monitoreo del estado de los equipos:
Los sensores integrados en las maquinas recopilan información sobre su rendimiento y las condiciones de operación, de tal manera que estos gemelos digitales son capaces de identificar patrones que puedan indicar un desgaste o fallos en la maquinaria.

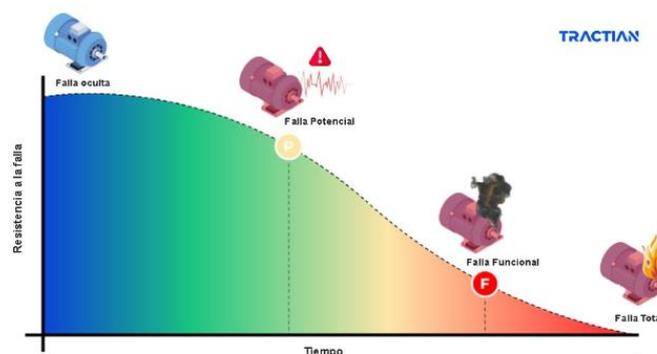


ILUSTRACIÓN 33. TÉCNICAS DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO UTILIZADAS EN LA INDUSTRIA. (FUENTE: TRACTIAN, 2023)



- Reducción del tiempo de inactividad:
El monitoreo del estado de los equipos permite ser conocedor de posibles fallos que pueda presentar la maquina en un momento dado, pudiendo planificar el mantenimiento preventivo en momentos estratégicos consiguiendo minimizar las interrupciones causadas por fallo de maquinaria además de extender su vida útil.
- **Monitoreo ambiental:**
 - Supervisión de calidad del aire y agua:
Estos elementos miden los parámetros ambientales en tiempo real, como la concentración de partículas en el aire, niveles contaminantes en el agua subterránea... permitiendo una gestión y una planificación más rápida y eficaz de los impactos ambientales. [22]
 - Modelado de impactos:
La simulación de operaciones mineras muestra cómo las operaciones que se están ejecutando afectan al medio ambiente, generándose así, una información útil para ajustar estrategias reduciendo la huella ambiental y estar dentro del cumplimiento de las regulaciones ambientales establecidas.

5. GEOTÉCNIA APLICADA A LA MINERÍA SUBTERRÁNEA

La geotecnia es la ciencia que estudia y desarrolla técnicas para el desarrollo de obras de construcción en relación con el suelo. Incluye muchas subdisciplinas como geología, mecánica de suelos, mecánica de rocas, hidrogeología, ciencia de materiales e ingeniería estructural.

Se enfoca en la composición y propiedades de los suelos y cómo reaccionan estos a diferentes factores que pueden incidir para prevenir un colapso o deslizamiento de tierra. La geotecnia ayuda a los ingenieros a evitar desastres naturales como deslizamientos de tierra mediante el estudio de accidentes geográficos, suelos y lecho rocoso.[23]

Los puntos esenciales de la geotecnia aplicada a la minería subterránea son los siguientes:

- Caracterización del macizo rocoso:

El macizo rocoso es el material base sobre el que se llevaran a cabo las explotaciones. La importancia de comprender sus propiedades es fundamental para prever los comportamientos.

Para la caracterización del macizo rocoso es importante llevar a cabo los siguientes puntos:

 - Mapeo geológico y geotécnico:

Permite la identificación de estructuras, como fallas diaclasas y orientaciones principales del macizo.



ILUSTRACIÓN 34. REGIONES GEOLÓGICAS DE LA PENÍNSULA IBÉRICA Y BALEARES. (FUENTE: IGN, 2004)

- Análisis de muestras:

Permite medir las propiedades mecánicas: Resistencia a compresión, modulo elástico... y las propiedades hidráulicas.

Laura Valero Sánchez

➤ Evaluación tensional:

Durante esta evaluación se analizan los estados tensionales preexistentes y los inducidos por la minería mediante técnicas, como el método de sobrecarga o instrumentos in situ como células planas y medidores de deformación.[24]

• Diseño de excavaciones:

La estabilidad de la excavación está relacionada con el macizo rocoso, de manera que siempre se debe tener en cuenta las dimensiones, forma y orientación respecto a las estructuras geológicas. Se debe llevar a cabo un análisis de estabilidad basado en modelos empíricos, y apoyarse en tecnologías que permitan una simulación de las fuerzas tensionales antes de proceder a la excavación.



ILUSTRACIÓN 35. DIMENSIONAMIENTO DEL SOSTENIMIENTO EN GALERÍAS SUBTERRÁNEAS Y TÚNELES A PARTIR DE LA CLASIFICACIÓN GEOMECÁNICA Q. (FUENTE: OBRAS URBANAS, 2023)

• Gestión del agua subterránea:

La presencia de aguas subterráneas en las explotaciones puede dificultar o incluso hacer inviable las labores de explotación. Actualmente se aplican distintos métodos para llevar a cabo la extracción de estas aguas, siendo necesario realizar:

➤ Evaluación hidrogeológica:

Servirá para determinar la dirección del flujo de agua, permeabilidad, zonas saturadas etc. necesario realizar:

➤ Diseño de máquinas de drenaje:

Una vez se ha estudiado y evaluado la presencia de aguas subterráneas, se procede al diseño de sistemas de drenaje como canalizaciones y pozos de bombeo, además del taponamiento de fisuras con lechadas de cemento o resinas.

Minería Subterránea Moderna

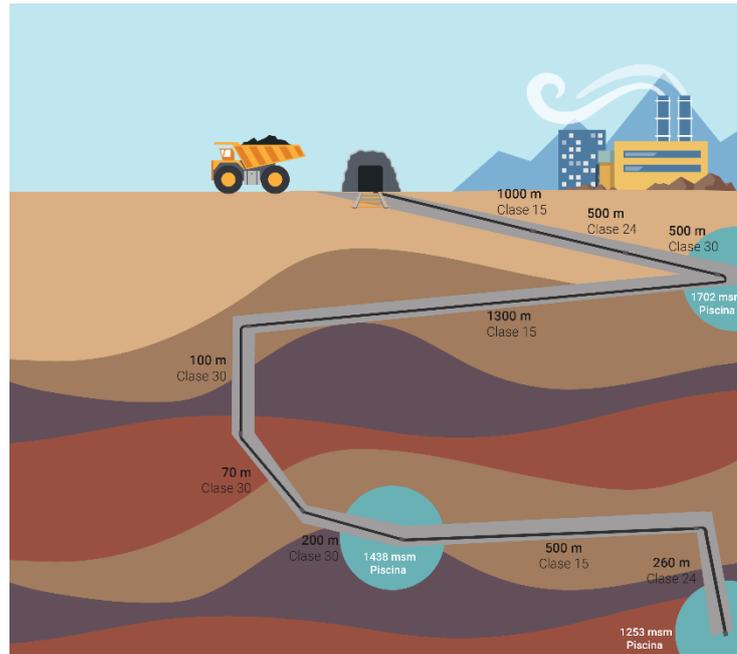


ILUSTRACIÓN 36. DESAGÜE EN MINA SUBTERRÁNEA, MÉXICO. (FUENTE: ARGPEX, 2023)

- **Monitoreo geotécnico:**
Mediante sistemas avanzados como laser escáneres se crean modelos detallados del frente de explotación además de tener sensores de deformación y desplazamiento que permiten conocer las tensiones en tiempo real.

5.1 ESTABILIDAD DE TÚNELES Y GALERÍAS

La estabilidad de los túneles y galerías en minería es fundamental para garantizar una integridad estructural de las excavaciones y la seguridad de todos los operarios.

Existen distintos factores que afectan a la estabilidad de las estructuras, debiéndose tener en cuenta para poder prever, prevenir, y evitar posibles accidentes. [25]

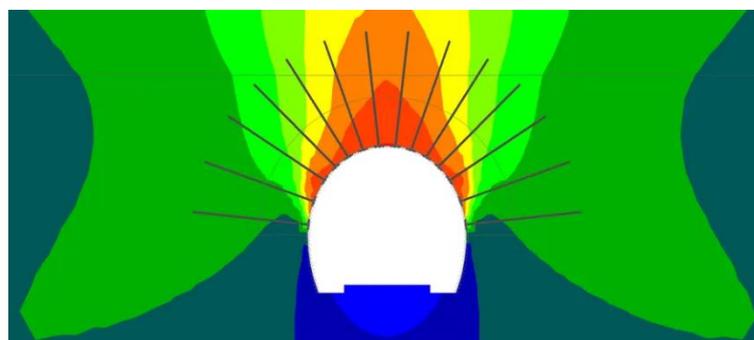


ILUSTRACIÓN 37. ESTABILIDAD DE TÚNELES (FUENTE: FINE SOFTWARE, 2023)



Laura Valero Sánchez

5.1.1 Condiciones geológicas del macizo

Como se ha expuesto previamente es importante el análisis y la evaluación del macizo, siendo clave el análisis de:

5.1.1.1 Tipo de roca:

Debe conocerse el tipo de roca pues tiene una influencia directa en la capacidad de las rocas para soportar cargas generadas durante y tras la excavación.

- Rocas competentes:

Este tipo de roca se caracteriza por una alta resistencia mecánica que soporta esfuerzos mayores sin fracturarse. Su baja deformabilidad proporciona una mayor estabilidad estructural bajo las condiciones de carga, lo que da lugar a una menor necesidad de sistemas de sostenimiento.

Dentro de este tipo de rocas se encuentran los granitos, basalto o gneis.

- Rocas blandas:

En esta sección se encuentran las rocas que tienen una baja cohesión y resistencia a la compresión, siendo susceptibles a deformaciones. Tienen una mayor plasticidad, la cual varía en presencia de agua, aumentando riesgos de colapsos o derrumbamientos.

Este tipo de rocas generan nuevos desafíos en la minería ya que sus propiedades son más impredecibles y la aparición de factores externos como aguas subterráneas puede provocar colapsos repentinos.

En la minería de este tipo de rocas, entre las que se encuentran las arcillas, lutitas, margas... se requieren refuerzos extensivos, como pernos, revestimientos o mayores sistemas de drenaje.

5.1.1.2 Estructuras geológicas

- Fallas:

Una falla es una discontinuidad que se forma debido a la fractura de grandes bloques de rocas en la Tierra cuando las fuerzas tectónicas superan la resistencia de las rocas. Existen tres tipos de falla de acuerdo con su movimiento:

- Falla normal:

Este tipo de fallas se generan por tensión horizontal. Las fuerzas inducidas en la roca son perpendiculares al acimut de la falla (línea de

Minería Subterránea Moderna

ruptura superficial), y el movimiento es predominantemente vertical respecto al plano de falla, el cual típicamente tiene un ángulo de 60 grados respecto a la horizontal. El bloque que se encuentra por encima del plano de la falla se denomina techo, y se desliza hacia abajo; mientras que el bloque que se encuentra por debajo del plano de la falla se denomina piso, y asciende.

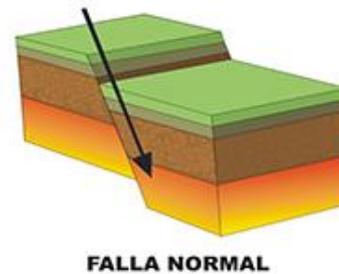


ILUSTRACIÓN 38. FALLA NORMAL. (FUENTE: IGN, 2023)

- **Falla inversa:**
Este tipo de fallas se genera por compresión horizontal. El movimiento es preferentemente horizontal y el plano de falla tiene típicamente un ángulo de 30 grados respecto a la horizontal. El bloque de techo se encuentra sobre el bloque de piso. Cuando las fallas inversas presentan un buzamiento (inclinación) inferior a 45°, éstas también toman el nombre de cabalgamiento.

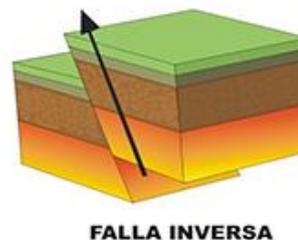
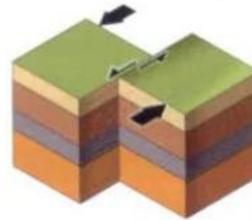


ILUSTRACIÓN 39. FALLAS INVERSAS. (FUENTE: IGN, 2023)

- **Falla de desgarre o de desplazamiento de rumbo:**
Estas fallas se desarrollan a lo largo de planos verticales y el movimiento de los bloques es horizontal, son típicas de límites transformantes de placas tectónicas.

Laura Valero Sánchez

Se distinguen dos tipos de fallas de desgarre: laterales derechas y laterales izquierdas. Laterales derechas, son aquellas en donde el movimiento relativo de los bloques es hacia la derecha; mientras que, en las laterales izquierdas o siniestrales, el movimiento es opuesto a las anteriores. También se las conoce como fallas transversales



Falla de desgarre

ILUSTRACIÓN 40. FALLA DESGARRE (FUENTE: IGN, 2023)

En función del tipo de falla, afecta de manera directa a la estabilidad de la mina, ya que se generan zonas de debilidad en el macizo, alterando la cohesión de las rocas y provocando inestabilidad en techos, siendo los principales efectos los siguientes: [26]

I) Inestabilidad del techo y paredes:

Las fracturas secundarias generadas por las fallas debilitan el techo y las paredes de las galerías subterráneas, aumentando el riesgo de derrumbes.

II) Drenaje y permeabilidad:

Estas grietas se convierten en conductos preferenciales para el flujo de aguas subterráneas, aumentando la presión hidrostática en el macizo rocoso de manera que la estabilidad se ve afectada. Además, puede haber inundaciones y complicaciones a la hora de realizar los trabajos.

III) Incremento de esfuerzos en pilares:

Las fallas pueden redistribuir tensiones hacia los pilares, aumentando las cargas y acelerando la aparición de nuevas si no están adecuadamente diseñados.

- Diaclasas:

Una diaclasa se define, en términos generales, como una fractura natural en la roca a lo largo de la cual no hay un desplazamiento de cizalla medible. Estas afectan la integridad de las excavaciones subterráneas de la siguiente manera:

Minería Subterránea Moderna

El macizo rocoso se divide por las diaclasas en bloques más pequeños, disminuyendo de esta manera la cohesión y la resistencia global de este.[27]

Estos bloques, pueden deslizarse rotar o caerse dependiendo de la orientación de las diaclasas respecto del túnel, del tamaño, de la orientación del sistema.

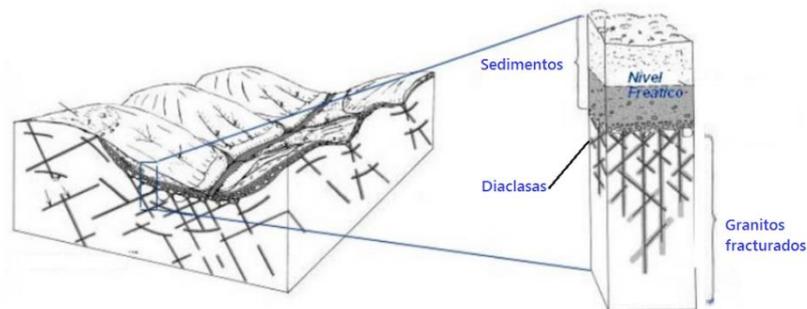


ILUSTRACIÓN 41. DIACLASAS. (FUENTE: GEOLOGÍA ÁVILA, 2023)

- Orientación de las diaclasas respecto al eje del túnel:
 - Diaclasas paralelas al eje del túnel
Pueden comprometer la estabilidad de los hastiales si las tensiones locales se concentran.
 - Diaclasas perpendiculares al eje del túnel
Este tipo de diaclasas pueden crear superficies de deslizamiento en la clave o los hastiales, aumentando el riesgo de caídas de bloques.
 - Diaclasas oblicuas
Este tipo de diaclasas generan combinaciones de esfuerzos que favorecen el deslizamiento, pudiendo producirse un colapso progresivo.
- Espaciado de las diaclasas
 - Diaclasas muy espaciadas:
Aunque estas diaclasas forman grandes bloques estables y facilitan el sostenimiento del túnel, si un bloque falla el peligro es mayor debido al gran tamaño del bloque.
 - Diaclasas poco espaciadas
Al haber mayor cantidad de bloques de tamaño más pequeño, la del macizo es menor, siendo necesario un sostenimiento continuo para prevenir accidentes.
- Orientación de los conjuntos de diaclasas
 - Sistemas ortogonales:



Laura Valero Sánchez

Si las diaclasas forman sistemas ortogonales, dan lugar a bloques geométricos definidos, facilitando el análisis estructural.

- Diaclasas inclinadas:
Los sistemas inclinados son más conflictivos debido a que se crean planos inclinados que pueden favorecer el deslizamiento por la gravedad.
- Orientación planos de debilidad:
Se define plano de debilidad como una discontinuidad natural que está presente en el macizo rocoso. Estos planos, poseen una resistencia mecánica menor en comparación con la masa rocosa circundante. La orientación de los planos de debilidad afecta directamente a la estabilidad del túnel durante la excavación, por ello se debe tener en cuenta:
 - Buzamiento adverso hacia la excavación:
Si los planos de debilidad están inclinados hacia el interior del túnel o galería, actúan como superficies de deslizamiento para los bloques de roca, facilitando el movimiento de bloques, especialmente bajo la influencia de la gravedad y los esfuerzos inducidos por la excavación. [25]
 - Interconexión de los planos de debilidad:
Al cruzarse diferentes planos de debilidad, se crea un entorno de alta fragmentación en el macizo produciéndose bloques con distintas superficies de potencial fallo, incrementándose el riesgo de inestabilidad y colapsos.

5.1.1.3 Estado de meteorización

La meteorización se define como “Proceso de desintegración y descomposición in situ de las rocas y de los minerales que la componen por acción superficial de la atmósfera, hidrosfera y biosfera.”

Existen 3 tipos de meteorización:

1. Meteorización mecánica
2. Meteorización química
3. Meteorización biológica

El proceso de meteorización es un factor muy importante y que debe tenerse en cuenta, ya que las rocas se ven alteradas provocando una disminución en sus propiedades mecánicas, afectando la estabilidad del macizo.

Principales impactos causados:

- Meteorización Mecánica:
Esta ocurre cuando la roca se rompe en fragmentos cada vez más pequeños, conservando cada uno las características del material original. La disminución de la integridad estructural de la roca provoca que, al fracturarse las rocas en bloques más pequeños, se pierda resistencia a las cargas, siendo más propenso al colapso.

Minería Subterránea Moderna

- Meteorización Química:

La meteorización química produce una transformación química, transformando los minerales en otras sustancias, provocando que la roca pierda cohesión y se altere.

Estas alteraciones provocan que los minerales pierdan su cohesión original, provocando que rocas más resistentes se conviertan en materiales más sueltos o arcillosos, debilitándose así la capacidad para soportar esfuerzos. [28]

5.1.2 Esfuerzos naturales e inducidos

Los esfuerzos del macizo rocoso toman un papel importante en la estabilidad de los túneles y galerías. Estos esfuerzos se clasifican en dos:

1. Esfuerzos naturales, que son los que existen antes de cualquier intervención.
2. Esfuerzos inducidos, que son una consecuencia directa de las actividades de excavación.

Estos esfuerzos deben gestionarse de manera adecuada ya que influyen en el comportamiento del macizo rocoso y pueden llegar a comprometer la estabilidad de las excavaciones. [29]

- Esfuerzos naturales:
 - Presión litostática:

Este es el esfuerzo resultante del peso de materiales sobrepuestos también llamado sobrecarga y presión litostática.

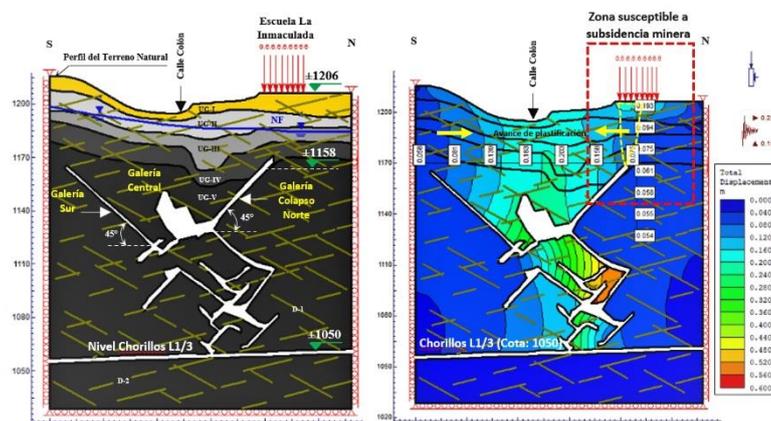


ILUSTRACIÓN 42. ANÁLISIS DE LA PRESIÓN LITOSTÁTICA. (FUENTE: AMELICA, 2023)

Se calcula mediante la fórmula:

$$\sigma_{zz} = \gamma \cdot h$$

Siendo:

- σ_{zz} : Esfuerzo litostático
- γ : Peso específico de la roca
- z : Pr o fundidad

Laura Valero Sánchez

- Presión hidrostática:
La presión hidrostática es la parte de la presión debida al peso de un fluido en reposo. Esta es similar a la presión litostática, pero debe tenerse en cuenta el fluido presente.

$$\mu_{zz} = \rho_{\omega} \cdot g \cdot z$$

Siendo:

 μ_{zz} : Presión hidrostática ρ_{ω} : Densidad del líquido

z: Profundidad

➤ Esfuerzos inducidos por la excavación:

- Redistribución de tensiones:

Al retirar material, se produce una reducción de tensiones en la zona excavada, concentrándose los esfuerzos en las paredes, techos y suelos.

- Zonas de concentración de esfuerzos:

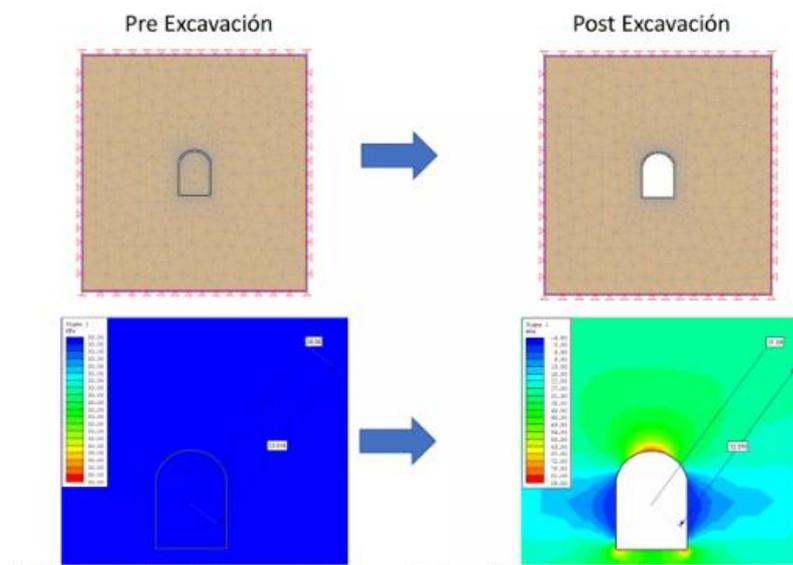
En techos y paredes, la concentración de esfuerzos en estas áreas puede generar grietas o deslizamientos, concentrándose principalmente en geometrías angulares.

- Mecanismos de fallo inducido:

Se diferencian 2 tipos

I) Por compresión: Las Tensiones son mayores que la resistencia a compresión de la roca.

II) Por tracción: Al superarse la resistencia a tracción de la roca, tiende a fracturarse.



Minería Subterránea Moderna

ILUSTRACIÓN 43. ESFUERZOS PRE Y POST EXCAVACIÓN EN TÚNELES. (FUENTE: SLIDESHARE, 2023)

5.1.3 Aguas subterráneas

La presencia de aguas subterráneas es un factor crítico, ya que la interacción de estas con el macizo puede modificar las propiedades mecánicas del material, saturar suelos provocando hundimientos y alterar el comportamiento del terreno tanto de manera química como mecánica.

El agua genera presión dando lugar a fisuras y discontinuidades que reducen la resistencia al esfuerzo cortante, favoreciendo el riesgo de deslizamientos y deformaciones.[30]

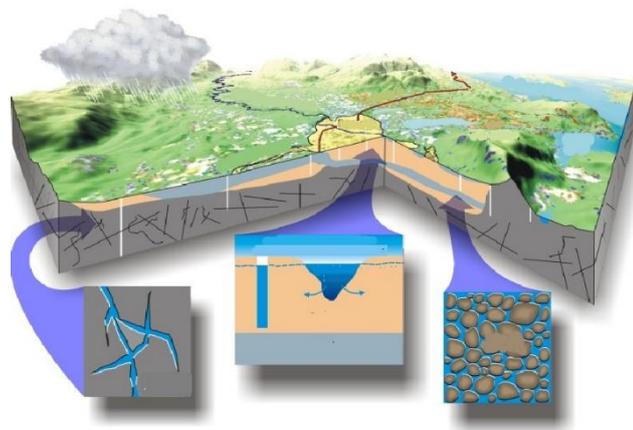


ILUSTRACIÓN 44. HIDROLOGÍA. (FUENTE: GEOLODIA ÁVILA, 2023)

- Reducción de la resistencia al esfuerzo cortante:
El agua se introduce en las fracturas del terreno generando una fuerza llamada “presión de poros”. Esta presión indica que el agua genera una carga extra en el suelo, disminuyendo la resistencia de los materiales que conforman el macizo, haciéndolo menos capaces de soportar la fricción.

$$\sigma' = \sigma - \mu$$

Siendo:

$$\sigma' = \text{Esfuerzo efectivo}$$

$$\sigma = \text{Esfuerzo total aplicado al macizo}$$

$$\mu: \text{Presión de poros ejercida por el agua en los vacíos}$$

Mediante la fórmula se muestra la relación entre la presión de poros y el esfuerzo efectivo: A mayor presión, menor esfuerzo. Esto puede provocar inestabilidades ya que el terreno pierde su capacidad para soportar cargas.

- Incremento del riesgo de deslizamiento:



Laura Valero Sánchez

En planos de debilidad, la combinación del agua con arcillas puede actuar como un lubricante, facilitando el movimiento de bloques y generando zonas de baja resistencia promoviendo fallos.

Para evaluar la estabilidad considerando las fuerzas de resistencia al deslizamiento y las fuerzas que inducen al movimiento se calcula el factor de seguridad:

$$FS = R/D$$

Siendo:

R: Resistencia al deslizamiento

D: Fuerzas que inducen al cizallamiento

Con la aparición del agua, hay que tener en cuenta los planos saturados:

$$FS = (C' \cdot A + (\sigma_n - \mu) \cdot \tan(\Phi'))/\tau$$

Siendo:

C': Cohesión efectiva del material

A: Área del plano de deslizamiento

σ_n : Esfuerzo normal aplicado al plano de deslizamiento

μ : presión de poros

Φ' : Ángulo de fricción interna efectivo

τ : Fuerzas de cizalla actuando sobre el plano

Cuando $FS < 1$: es probable que haya deslizamiento, por lo que el plano es inestable. [31]

5.1.4 Geometría y tamaño de las excavaciones

La geometría y el tamaño de las excavaciones juegan un papel importante en la distribución de tensiones del macizo. El diseño de estos parámetros es fundamental para minimizar las concentraciones de esfuerzos y de esta manera prevenir deformaciones.

➤ Geometría:

- Forma de la excavación:

1) Túneles circulares o elípticos:

Este tipo de túneles son los más comunes. Distribuyen las tensiones de manera más uniforme, reduciendo así la probabilidad de concentración de tensiones en un punto, lo que les hace ideales para terrenos con altos esfuerzos litostáticos.

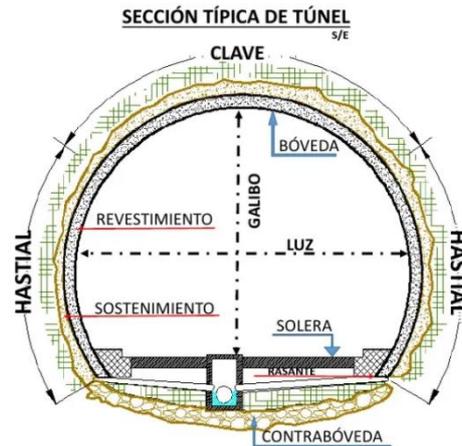


ILUSTRACIÓN 45. ESTRUCTURA GENERAL TÚNEL. (FUENTE: J. CASTRO, 2023)

II) Túneles con secciones angulares:

Los túneles con esquinas agudas suelen presentar más problemas de estabilidad, debido a que las esquinas agudas tienden a concentrar los esfuerzos. Esto puede dar pie a fracturas o colapsos en esas zonas.

- Relación con los planos de debilidad:

A la hora de diseñar el estudio, es importante considerar diferentes factores como la inclinación y la orientación de las estructuras, ya que si la orientación de los túneles coincide desfavorablemente con los planos de debilidad, se incrementarán distintos riesgos como el de deslizamiento.

➤ Excavación:

- Túneles más amplios:

La construcción de excavaciones de gran tamaño modifica significativamente la distribución de esfuerzos, logrando concentrar las tensiones en paredes y techos, aumentando la posibilidad de que aparezcan fracturas, deformaciones o colapsos. Para evitar derrumbamientos, se deben utilizar sistemas de refuerzo más robustos como arcos de acero, pernos de anclaje...

- Túneles profundos:

A mayor profundidad, mayor son las tensiones litostáticas. En este tipo de excavaciones, los esfuerzos pueden superar la resistencia de la roca, causando fallos por compresión o tracción.

5.2 MÉTODOS DE SOPORTE: PERNOS, MALLAS Y HORMIGÓN PROYECTADO.

A la hora de llevar a cabo las excavaciones de galerías y cámaras en el macizo rocoso para extraer el mineral, la estabilidad del terreno se pone en riesgo como se ha explicado previamente. A medida que se van realizando las excavaciones ya las tensiones geológicas

Laura Valero Sánchez

se redistribuyen y aunque en ocasiones, el terreno puede soportar las modificaciones de estos cambios, no siempre es así, requiriendo técnicas de sostenimiento que sirvan para prevenir accidentes por derrumbamientos etc. [32]

Los objetivos de estos métodos de soporte se resumen en los siguientes puntos:

- Evitar colapsos de excavaciones.
- Proteger a los trabajadores y equipos de trabajo.
- Mantener la integridad de la estructura minera.
- Controlar las deformaciones del macizo.
- Garantizar la continuidad de las operaciones.

En función de las condiciones geomecánicas del terreno, la profundidad de la excavación, las características del material, presencia de aguas subterráneas... se lleva a cabo la elección del método de soporte adecuado, que se divide en 2:

- I) Soporte temporal: Este método se emplea durante la fase de excavación, consiste en la estabilización del terreno hasta que se instala el sistema de sostenimiento definitivo.
- II) Soporte permanente: Este método proporciona estabilidad a largo plazo, asegurando así la seguridad de las excavaciones durante toda la vida útil de la mina.

A continuación, se exponen los principales métodos de soporte en minería subterránea:

➤ Pernos de anclaje:

Los pernos son barras de acero de alta resistencia que se introducen en el macizo. El objetivo principal de estos es reforzar la estabilidad. Funcionan como anclajes estructurales interconectando las capas superficiales del terreno con las zonas más profundas, lo cual ayuda a distribuir los esfuerzos y mejorar la cohesión del material.

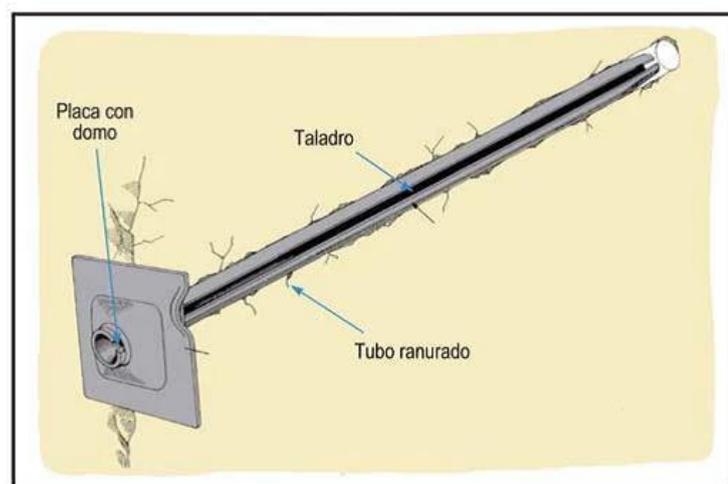


ILUSTRACIÓN 46. PERNOS DE ROCA. (FUENTE: REVISTA SEGURIDAD MINERA, 2023)



La efectividad de los pernos depende del tipo de anclaje utilizado, y de cómo redistribuye las fuerzas en el macizo. Este tipo de anclaje trabaja sobre dos principios fundamentales:

- I) Anclaje puntual: Sujeta la roca en una zona determinada.
- II) Anclaje continuo: La fijación ocurre a lo largo de toda la longitud del perno, distribuyendo las fuerzas de manera uniforme.

El proceso de instalación varía según el tipo de perno, pero por lo general, su instalación sigue los siguientes pasos:

1. Perforación del agujero en la roca.
2. Inserción del perno
3. Fijación del perno activando el mecanismo de anclaje
4. Tensado del perno aplicando una carga al perno mediante una llave dinamométrica.

En función del método de fijación y aplicación, existen diferentes tipos, siendo los más comunes los siguientes:

- Pernos de expansión o bulones:

El perno expansivo está compuesto un tubo en forma de omega y un casquillo soldado a cada extremo, uno de ellos perforado para permitir el hinchado del perno. Se colocan en el techo y en las paredes de las excavaciones, formando una malla que refuerza el macizo rocoso y que distribuye las tensiones generadas.[33]

Funcionan mediante un sistema de cuñas o expansión en el interior del agujero perforado, instalándose de manera rápida y sin necesidad de adhesivos adicionales

- Pernos de Resina:
Este tipo de anclaje es una de las opciones más resistentes y seguras disponibles cuando se necesita instalar un perno o anclaje en hormigón. Con el anclaje químico, se inyecta una resina en el orificio antes de insertar el perno de fijación, al enfriarse esta resina, se endurece, proporcionando un anclaje resistente y creando un punto de anclaje increíblemente resistente. Esto es particularmente aplicable en aplicaciones donde el sustrato es irregular o los puntos de fijación están cerca de un borde y, por lo tanto, existe el riesgo de que el sustrato falle.[34]
- Pernos de cemento:
Los pernos de cemento utilizan lechada de cemento que permite la fijación en la roca. La lechada se inyecta en el

Laura Valero Sánchez

orificio antes de insertar el perno. Requieren un mayor tiempo de fraguado en comparación con los pernos de resina, pero ofrecen una gran capacidad de carga.

- Pernos autoperforantes:

Este tipo de perno combina la perforación y la instalación en un solo paso, poseyendo una punta perforadora que permite el avance por la roca. Este tipo de pernos se utiliza en terrenos donde por motivos de estabilidad es complicado mantener el agujero abierto durante la instalación del perno.

- Mallas de soporte:

Las mallas de soporte son estructuras de alambre de acero de alta resistencia que se instalan sobre las superficies de excavaciones en minería subterránea y construcción de túneles.

Tienen como objetivo contener y evitar desprendimiento de fragmentos de roca.

Las mallas no actúan de manera individual, sino que se combinan con otros sistemas de soporte, ya sean pernos de anclaje y hormigón logrando así formar un sistema integral de sostenimiento. [35]

Las principales funciones dentro de los métodos de sostenimiento en minería subterránea son:

- Contención de roca suelta.
- Refuerzo de superficies débiles.
- Aumento de la seguridad.
- Distribución de cargas.
- Complemento de otros sistemas de soporte.



ILUSTRACIÓN 47. MALLA DE FORTIFICACIÓN MINERA INCHALAM. (FUENTE: PRODALAM, 2023)



Minería Subterránea Moderna

El proceso general de instalación de mallas debe garantizar siempre la efectividad del sistema de soporte, siguiendo el proceso general los siguientes pasos:

1. **Preparación de la superficie:** La zona debe quedar perfectamente limpia para asegurar un contacto adecuado entre la malla y la superficie.
2. **Colocación de la malla:** Se extiende la malla asegurando que cubra el área de trabajo de la superficie que se quiere reforzar.
3. **Fijación con pernos de anclaje:** La malla queda sujeta al macizo mediante pernos que atraviesan la malla y se fijan en la roca. Además, se asegura su fijación mediante arandelas especiales.
4. **Tensado:** Es importante que la malla esté tensa para que quede correctamente adherida a la roca y no queden espacios sueltos.

Una vez colocadas las mallas, su funcionamiento se basa en su capacidad para actuar como una barrera de contención, reteniendo los fragmentos de la roca y distribuyendo las cargas de manera uniforme. Las mallas se clasifican según el método de fabricación de la siguiente manera:

I) Mallas electrosoldadas: Este tipo de mallas están fabricadas a partir de alambres de acero soldados en cada punto de intersección, formando cuadrículas uniformes.

Este tipo de mallas otorgan rigidez y resistencia, siendo adecuadas para excavaciones donde se requiere una estructura sólida.

II) Mallas trenzadas: Están elaboradas mediante entrelazado de alambres de acero sin puntos de soldadura, lo que les otorga una mayor flexibilidad permitiéndose así la correcta adaptación a superficies irregulares. Estas características las hace perfectas para terrenos con geometrías complejas, ya que tienen un mayor grado de deformabilidad.

III) Mallas de cables de acero: Construidas con cables de acero de alta resistencia, formando retículas, ofrecen una combinación de flexibilidad y resistencia elevada. Este tipo de mallas son adecuadas para condiciones de terreno inestable, siendo muy útiles en excavaciones con grandes bloques de roca que pueden desplazarse.[35]

Para elegir el tipo de malla que se va a utilizar, se deben evaluar distintos factores, como las condiciones del macizo rocoso, el ambiente al que será expuesta la malla, la compatibilidad con otros métodos de soporte y la facilidad de instalación.

➤ **Hormigón proyectado:**

El hormigón proyectado es una técnica utilizada especialmente en la construcción de túneles y estructuras subterráneas que consiste en la proyección de una mezcla de hormigón a alta velocidad sobre las superficies de excavaciones por medio de equipos especializados que permiten expulsarlo a presión consiguiendo una adherencia y rápida. De esta manera se crea una capa resistente, que tiene como funciones principales:

- Estabilización inmediata

Laura Valero Sánchez

- Control de deformaciones
- Impermeabilización
- Adaptabilidad a diferentes terrenos
- Mayor rapidez en la ejecución
- Reducción de riesgos



ILUSTRACIÓN 48. HORMIGÓN PROYECTADO EN MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: HORMIGÓN AL DÍA, 2023)

El hormigón proyectado está compuesto por:

Cemento + Agregados (Arena y gravas) + Agua + Aditivos (sustancias añadidas para mejorar la adherencia) + Fibras de refuerzo. [36]

Partiendo de estos elementos, y dependiendo de las condiciones del terreno y los requerimientos del proyecto, el hormigón proyectado puede aplicarse de dos maneras:

I) **Vía húmeda:**

Para la aplicación de hormigón proyectado por vía húmeda, se emplea una mezcla pre-hidratada de cemento, agregados y agua. Esta mezcla se bombea hasta la boquilla del equipo de proyección. Este tipo de aplicación es conveniente, ya que al mezclarlo con agua se levanta menos polvo y permite un mayor control sobre la dosificación de la mezcla. [37]

II) **Vía seca:**

Durante la aplicación del hormigón por vía seca, se proyecta una mezcla seca de cemento y agregados por medio de una manguera, añadiendo el agua en la boquilla justo antes de la aplicación. Este tipo de proyección requiere de personal experimentado, ya que la hidratación debe ser homogénea. [37]

El procedimiento para la aplicación del hormigón es el siguiente:

1. Preparar la superficie: Se procede a la eliminación de fragmentos sueltos y limpieza de la roca para mejorar la adherencia de la mezcla, colocando mallas metálicas si fuese necesario.



Minería Subterránea Moderna

2. **Mezcla y dosificación:** Dependiendo del método de aplicación, se prepara la mezcla.
3. **Proyección del hormigón:** Durante esta fase es importante el control del espesor de la capa aplicada para asegurar la estabilidad.
4. **Curado fraguado:** El hormigón comienza a endurecerse, y para asegurar su rendimiento es importante monitorear las propiedades mecánicas.

5.3 MÉTODOS DE EXCAVACIÓN EN TÚNELES

Cuando se realizan las excavaciones en túneles, es importante haber llevado a cabo un estudio de la geología del terreno, profundidad, tipo de infraestructura... y otros factores que se han expuesto previamente. La elección del método de excavación en túneles es muy importante ya que de esta depende la estabilidad del macizo.

Los métodos de excavación se dividen en dos categorías: Métodos convencionales y métodos mecanizados y modernos.[38]

5.3.1 Métodos convencionales

La excavación convencional se puede definir como la construcción de cavidades subterráneas de forma arbitraria utilizando un proceso cíclico que consta de los siguientes pasos:

1. Excavación utilizando métodos de perforación o de demolición (explosivos), o excavadoras mecánicas muy básicas.
2. Desescombro.
3. Colocación de los elementos primarios de revestimiento.

Estos métodos utilizan principalmente equipos estándar y permite acceder al frente de excavación del túnel prácticamente en cualquier momento, resulta muy flexible en situaciones o lugares que exigen un cambio en el análisis estructural o en el diseño y que, por ello, exigen también cambios en los medios de revestimiento.

5.3.1.1 Método austriaco tradicional

Este método de excavación se basa en una excavación progresiva, combinada con la instalación inmediata de soportes temporales. Su objetivo es aprovechar la capacidad del terreno para autosostenerse, reduciendo así la necesidad de estructuras pesadas.[39]

El proceso de este método sigue los siguientes pasos:

1. Excavación en fases.
2. Instalación de soportes temporales (cerchas y pernos).
3. Monitoreo de la estabilidad del macizo rocoso en tiempo real.
4. Aplicación de revestimientos parciales o definitivos, según lo que requiera el terreno.

Laura Valero Sánchez

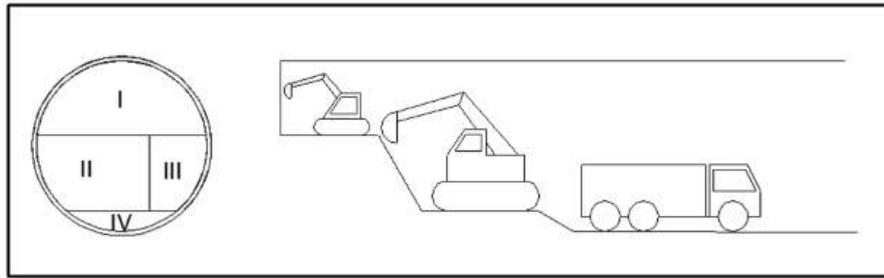


ILUSTRACIÓN 49. MÉTODO AUSTRIACO TRADICIONAL. (FUENTE: MINERÍA MODERNA, 2023)

5.3.1.2 Método Belga

Este método se caracteriza por la progresiva excavación de los elementos que componen el túnel, de tal forma que se van retirando los elementos más estables del túnel evitando el hundimiento o la falta de estabilidad del frente. [39]

El procedimiento de este método es el siguiente:

1. Excavación inicial de la bóveda.
2. Refuerzo con entramado progresivo de madera.
3. Encofrado y aseguramiento de la bóveda antes de excavar los hastiales y el banco.



ILUSTRACIÓN 50. MÉTODOS DE EXCAVACIÓN DE TÚNELES. (FUENTE: ACADEMIA.EDU, 2023)

5.3.1.3 Método Alemán

Consiste construir primero los hastiales en dos fases, que se diseñan sólidos y de gran anchura. Una vez construidos éstos, la bóveda, que ya tendrá un apoyo sólido sobre los hastiales, se va construyendo por costillas, con lo que las excavaciones en el terreno son siempre inferiores a los 3 m². Con la bóveda terminada, apoyada sólidamente sobre los hastiales, ya puede procederse a la excavación, protegiendo o no los frentes, según sea necesario.[39]

El orden de las fases de ejecución sería:

1. Hastiales
2. Bóveda
3. Destroza y solera.

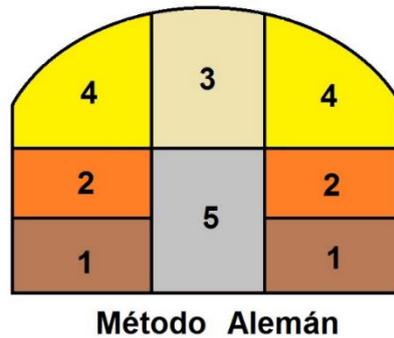


ILUSTRACIÓN 51. MÉTODO ALEMÁN EN LA MINERÍA. (FUENTE: VICTORY EPES, 2023)

5.3.2 Métodos mecanizados modernos

Con el paso del tiempo la aparición y desarrollo de nuevas tecnologías ha permitido el uso de técnicas mecanizadas, aumentando así la seguridad y reduciendo los tiempos de construcción.

Dentro de estos métodos tenemos los siguientes:

5.3.2.1 Nuevo método austriaco

Este método consiste en la aplicación de un revestimiento delgado semirrígido, colocado inmediatamente antes de que la roca se vea afectada por el proceso de descompresión. Es por tanto un sostenimiento flexible, que acompaña de forma controlada la deformación del macizo.[39]

El orden de ejecución es el siguiente:

1. Excavación en 2 fases: Avance superior y después la destroza.
2. Uso de revestimientos flexibles.
3. Monitoreo en tiempo real para adaptar refuerzos.

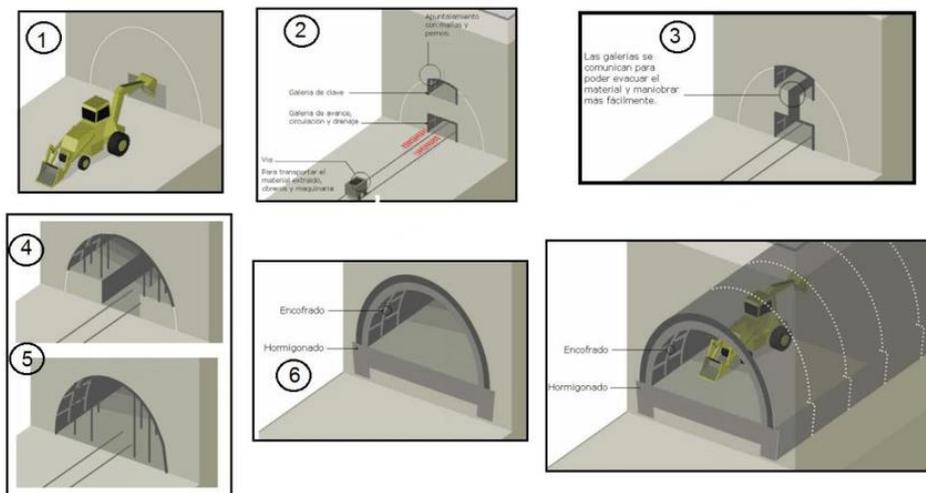


ILUSTRACIÓN 52. NATM Y SHOTCRETE EN MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: BEST SUPPORT UNDERGROUND, 2023)

Laura Valero Sánchez

5.3.2.2 Método excavación con tuneladora

Una tuneladora es una máquina que por norma general realiza el proceso de excavación a través de su cabeza giratoria que va haciendo hueco en el terreno a través de un motor con sistema hidráulico o eléctrico. La tuneladora de elementos de corte que pueden tener distintas formas y estar fabricados de diferentes materiales. Una vez finalizada la excavación, la tuneladora se detiene y se procede a la instalación de anillos a la estructura del túnel que lo mantendrá firme.

Estas máquinas han dado lugar a un nuevo método de excavación más rápido y preciso, ya que además cuentan con sistemas de retiro de escombros, ventilación y colocación de dovelas prefabricadas. [40]



ILUSTRACIÓN 53. USO DE TUNELADORAS EN LA MINERÍA. (FUENTE: VICTORY EPES, 2023)

5.3.2.3 Método perforación y voladura

La técnica de perforación y voladura se basa en la ejecución de perforaciones en la roca, donde posteriormente se colocarán explosivos que, mediante su detonación, transmiten la energía necesaria para la fragmentación del macizo rocoso a explotar.

Para este método, se siguen los siguientes pasos:

1. Se crean patrones precisos de perforación mediante equipos de perforación jumbo.
2. Se rellenan estas perforaciones con explosivo, provocando la detonación controlada.
3. Se retira el material fragmentado mediante cargadoras.
4. Se refuerza el macizo mediante pernos y mallas metálicas.

Minería Subterránea Moderna



ILUSTRACIÓN 54. PERFORACIÓN Y VOLADURA EN MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: BEST SUPPORT UNDERGROUND, 2023)

5.4 GESTIÓN DE RIESGOS GEOLÓGICOS EN TÚNELES

Durante las excavaciones es necesario garantizar la seguridad y viabilidad de los proyectos. Para ello, es necesario gestionar los riesgos geológicos que pueden surgir durante el proceso.

Gestión de riesgos operativos

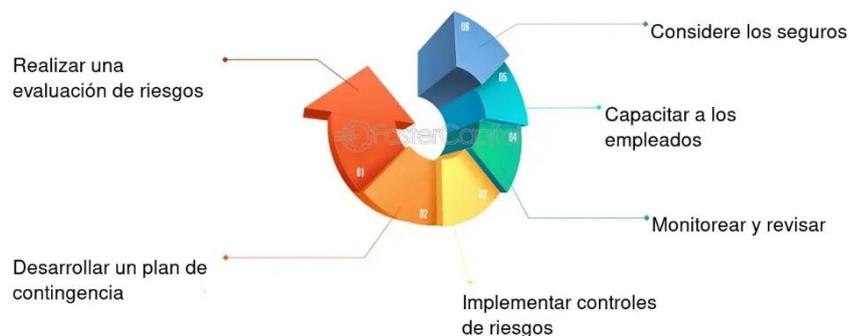


ILUSTRACIÓN 55. GESTIÓN DE RIESGOS Y MITIGACIÓN DE RIESGOS EN LA MINERÍA EN LA NUBE. (FUENTE: FASTERCAPITAL, 2023)



Laura Valero Sánchez

Estos riesgos pueden clasificarse en distintas categorías:

➤ Condiciones geológicas variables:

Al llevar a cabo la construcción de túneles, se atraviesa distintos terrenos, desde suelos blandos hasta roca dura. Estos cambios repentinos en la estabilidad pueden provocar inestabilidad y colapsos, deformaciones inesperadas o un desgaste de los equipos más acelerado.

➤ Presencia de aguas subterráneas:

A la hora de evaluar riesgos es importante tener en cuenta la posible presencia de aguas subterráneas, ya que la infiltración de estas en la excavación puede generar inundaciones, elevación hidráulica del suelo que da lugar a hundimientos y asentamientos diferenciales.

➤ Actividad sísmica:

Si el túnel está ubicado en zonas sísmicamente activas, existen riesgos añadidos, como pueden ser cargas dinámicas que generan grietas en el revestimiento del túnel, deformaciones estructurales que comprometen la estabilidad y derrumbes internos.

Para reducir los efectos de estos riesgos, es importante contemplar en proyecto una serie de estrategias, entre estas se encuentran:

• Investigaciones geológicas exhaustivas:

Como se explicó con anterioridad, es fundamental durante la fase de diseño llevar a cabo una caracterización geotécnica detallada, para poder anticiparse a peligros. Las investigaciones que se muestran a continuación ayudan a definir los métodos de excavación más adecuados y definir el tipo de sostenimiento:

I) Estudios geofísicos.

II) Perforaciones exploratorias que determinen la resistencia del terreno.

III) Análisis petrográficos y ensayos mecánicos.

• Análisis hidrogeológicos y sistemas de drenaje:

Es importante tener en cuenta los diseños de sistemas de drenaje para evitar filtraciones e inundaciones en el túnel, ya que el control efectivo de las aguas evita los problemas de asentamientos diferenciales y garantiza la estabilidad a largo plazo para ello, se crean:

I) Drenes horizontales y verticales.

II) Revestimientos impermeables con membranas de PVC.

III) Inyecciones de consolidación con lechada de cemento.

• Monitoreo en tiempo real:

Para detectar inestabilidades y aplicar las correcciones necesarias antes de que se produzcan fallos, se utilizan sistemas de instrumentación avanzada, entre ellos:



Minería Subterránea Moderna

- I) Extensómetros y piezómetros: Permiten medir los desplazamientos del macizo.
 - II) Sistemas de radar y escáneres láser: Controlan las deformaciones en el frente de la explotación.
 - III) Monitoreo geotécnico automatizado.
- Diseño sísmico:
En regiones con actividad sísmica, los túneles deben estar preparados para resistir los posibles temblores. Para ello, deben contar con:
 - I) Revestimientos flexibles que absorben la energía sísmica sin fracturarse.
 - II) Juntas de dilatación sísmicas en túneles ferroviarios y carreteros.
 - III) Refuerzo con fibras de carbono, mejorando la absorción de cargas dinámicas.
 - Saneamiento sistemático y sostenimiento inmediato:
Durante las excavaciones convencionales, es importante mantener el área de trabajo limpio, ya que la seguridad del túnel se mejora. Para ello:
 - I) Saneamiento de la bóveda y los hastiales
 - II) Instalación inmediata de sostenimiento para evitar tiempos prolongados en zonas de terreno inestable.

6. VENTILACION

La ventilación de una mina consiste en el proceso de hacer pasar un flujo de aire considerable y necesario para crear las condiciones óptimas para que los trabajadores se encuentren en una atmósfera agradable, limpia y sin gases. La ventilación se realiza estableciendo un circuito para la circulación del aire a través de todas las zonas de trabajo. Para ello es indispensable que la mina tenga dos labores de acceso independientes: dos pozos, dos socavones, un pozo y un socavón. En las labores que sólo tienen un acceso (por ejemplo, una galería en avance) es necesario ventilar con ayuda de una tubería. La tubería se coloca entre la entrada a la labor y el final de la labor. Esta ventilación se conoce como secundaria, diferente a la que recorre toda la mina que se conoce como principal. [41]



ILUSTRACIÓN 56. SOLUCIONES PARA LA MINERÍA. (FUENTE: CIRIGLIANO, 2023)

En minería, es muy importante establecer una circulación de aire por las siguientes razones:

- Se debe asegurar un contenido mínimo de oxígeno en la atmósfera de la mina para permitir la respiración de las personas que trabajan en su interior.
- Se requiere diluir los gases, los cuales pueden ser tóxicos, asfixiantes y/o explosivos por debajo de los valores límites permisibles legales establecidos en el país.
- Se hace necesario ventilar la mina para climatizarla, a medida que aumenta la profundidad de esta, la temperatura aumenta, adicionalmente, los equipos y máquinas presentes en el interior contribuyen a elevar la temperatura del aire.
- Se requiere que los frentes de trabajo tengan un confort térmico, que permita que el trabajador labore en condiciones óptimas de rendimiento y seguridad.

6.1 PRINCIPIOS DE LA VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA

Para lograr una ventilación adecuada, es importante tener en cuenta a la hora del diseño distintos factores como la profundidad de la excavación, la presencia de contaminantes



Minería Subterránea Moderna

y la temperatura ambiente. Un mal diseño del sistema de ventilación puede dar lugar a intoxicaciones, explosiones, enfermedades pulmonares... etc. comprometiendo la seguridad y la productividad de la obra.

Para mantener un ambiente seguro, es necesario regular el aire en las galerías y túneles, aplicando los siguientes principios.

➤ Contenido mínimo de oxígeno.

La atmosfera que se respira en una mina se ve afectada por las condiciones de temperatura, humedad y la composición del aire. Para mantener unas condiciones óptimas, existen una serie de parámetros que sirven como guía para garantizar un aire limpio para los trabajadores:

Oxígeno (O₂): ≥19,5% y ≤23%

Nitrógeno (N₂): ≈78% (gas inerte que diluye otros gases).

Dióxido de carbono (CO₂): ≤0,5%

Metano (CH₄): ≤1%

Monóxido de carbono (CO): ≤ 0.005% (50 ppm)

Durante los trabajos, es importante tener un control en tiempo real de estos parámetros, ya que los niveles de oxígeno pueden disminuir si existe presencia de materia orgánica en descomposición, reacciones químicas con minerales, o desplazamiento por gases más densos, pudiendo producirse síntomas de hipoxia como mareos, fatiga y pérdida de conocimiento. [42]

➤ Dilución y extracción de gases tóxicos y explosivos

En el interior de la mina, se está expuesto a 3 tipos de gases que afectan a la salud de distinta manera:

- Gases asfixiantes: Este tipo de gas, disminuyen la proporción de oxígeno en la atmosfera, ya que al tener un mayor volumen ocupan su espacio.
- Gases tóxicos: Provocan una disminución de oxígeno porque penetran directamente en los pulmones, expandiéndose por el resto del organismo.
- Gases explosivos: Estos gases además de producir síntomas como envenenamiento o destrucción de tejidos, suponen otro riesgo añadido, ya que, si entran en contacto con un iniciador, generan una explosión.

Los sistemas de ventilación en la minería deben garantizar la dilución y extracción de estos gases para evitar concentraciones peligrosas, y garantizar la seguridad en las áreas de trabajo. [42]

➤ Temperaturas adecuadas:

En túneles de gran extensión y minas profundas, la temperatura puede aumentar considerablemente debido a distintos factores:

- Calor geotérmico: Producido por la profundidad del terreno.
- Calor metabólico: Generado por la actividad de los operarios.
- Emisiones térmicas de maquinaria pesada.
- Aparición de un mayor porcentaje de humedad.

El sistema de ventilación ayuda a disipar el calor, manteniendo las temperaturas dentro de un rango seguro para la productividad laboral.



Laura Valero Sánchez

➤ Control de polvos y contaminantes

Durante las perforaciones, voladuras, y manipulaciones, se levanta una gran cantidad de polvo en el interior, siendo retenido en estas áreas de trabajo por ser entornos cerrados. La exposición continua e inhalación de estas partículas puede desembocar en enfermedades graves, como silicosis y neumoconiosis. Siendo de gran importancia la ventilación para la reducción de estas partículas además de otros métodos como aspersores de agua, o filtros de aire.

➤ Establecimiento de un circuito de circulación de aire.

Para conseguir que la ventilación de la mina sea eficaz, el aire debe circular de manera controlada, de manera que deben existir por lo menos, dos accesos independientes que permitan tanto la entrada, como la salida de aire, formando así un circuito continuo de ventilación.[42]

6.2 SISTEMAS MODERNOS DE VENTILACIÓN

Los sistemas de ventilación subterránea se clasifican según el tipo de flujo de aire y sus métodos de extracción.

I) Ventilación natural:

El flujo de aire se introduce por la bocamina principal de ingreso, recorriendo la totalidad del circuito de ventilación hasta salir por la otra bocamina. Para que funcione la ventilación natural tiene que existir una diferencia de alturas entre las bocaminas de entrada y salida. Siendo más importante que la profundidad de la mina el intercambio termodinámico que se produce entre la superficie y el interior. La energía térmica agregada al sistema se transforma en energía de presión, susceptible de producir un flujo de aire, toda vez que el aire caliente desplaza al aire frío produciendo circulación.

Este sistema de ventilación es muy cambiante, depende de la época del año y, en algunos casos, de la noche y el día. Esto, genera un inconveniente pues es inestable y fluctuante por lo que no debe utilizarse como un medio único y confiable para ventilar las operaciones.[43]

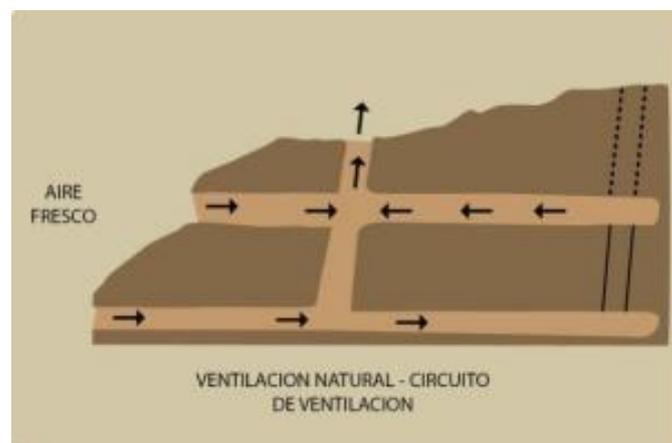


ILUSTRACIÓN 57. DESCRIPCIÓN DE VENTILACIÓN NATURAL. (FUENTE: SERNAGEOMIN, 2018)

II) Ventilación mecánica:

Minería Subterránea Moderna

Este tipo de ventilación implica el uso de ventiladores y sistemas de distribución de aire llamados ductos, que controlan la circulación del aire en la mina. Estos sistemas pueden ajustarse según las necesidades específicas de la mina y permiten una mayor eficiencia en la gestión de la calidad del aire y la temperatura.



ILUSTRACIÓN 58. DESCRIPCIÓN DE VENTILACIÓN FORZADA. (FUENTE: SERNAGEOMIN, 2018)

Se divide en 2 tipos de ventilación:

➤ Ventilación principal:

Es el proceso mediante el cual se hace circular por el interior de esta el aire necesario para asegurar una atmósfera respirable y segura para el desarrollo de los trabajos. La ventilación se realiza estableciendo un circuito de ventilación, para la circulación del aire a través de todas las labores. La ventilación principal de la mina es la que recorre todas las labores mineras y de ese circuito se desprende la ventilación a los frentes de trabajo de la mina. La ventilación principal de la mina debe ser forzada, de acuerdo con lo establecido en el artículo 40 del decreto 1886.

El caudal de aire que circule por la mina dependerá del número de trabajadores, la extensión y sección de las labores, el tipo de maquinarias de combustión interna y las emanaciones de gases naturales de la mina.[44]

➤ Ventilación secundaria:

La ventilación secundaria es aquella en la que se emplean sistemas complementarios para garantizar una adecuada circulación de aire en zonas específicas de la mina o túnel donde la ventilación principal no alcanza de manera eficiente. Este tipo de ventilación es esencial en frentes de avance, labores con acceso único o secciones en desarrollo, donde la renovación natural del aire es limitada.

Para estos casos, se instala una tubería de ventilación que se encarga de transportar el aire fresco desde la entrada de la labor hasta su extremo más alejado.

III) Sistemas de monitoreo y control avanzados:

Actualmente, se utilizan sistemas de monitoreo y control avanzados, que permiten un control preciso y continuo de las condiciones ambientales en el interior de la mina.

Laura Valero Sánchez

El uso de estos sensores permite conocer parámetros como la calidad del aire, temperatura, humedad, velocidad del aire y presencia de gases nocivos.

Las principales características de estos sistemas son las siguientes:

- 1. Monitoreo en tiempo real:** Deben estar situados de manera estratégica por toda la red de ventilación, de manera que recopilen datos constantes sobre la atmósfera en la mina o túnel, permitiendo una respuesta inmediata ante cualquier anomalía.
- 2. Detección de gases peligrosos:** el uso de sensores que identifican gases tóxicos se ha vuelto crucial y de gran importancia ya que alertan en caso de que estos valores estén fuera de los rangos de seguridad.
- 3. Control automático de ventilación:** El monitoreo constante de los valores ambientales permite los sistemas avanzados ajusten la velocidad y dirección del flujo de aire de manera automática cuando sea necesario, optimizando así la eficiencia energética y reduciendo el consumo de ventiladores mecánicos.
- 4. Integración con software de gestión:** Todos los datos recogidos, se analizan y almacenan en plataformas digitales, dando lugar a informes de tendencias, predicciones y alertas tempranas, facilitando así la toma de decisiones operativas.

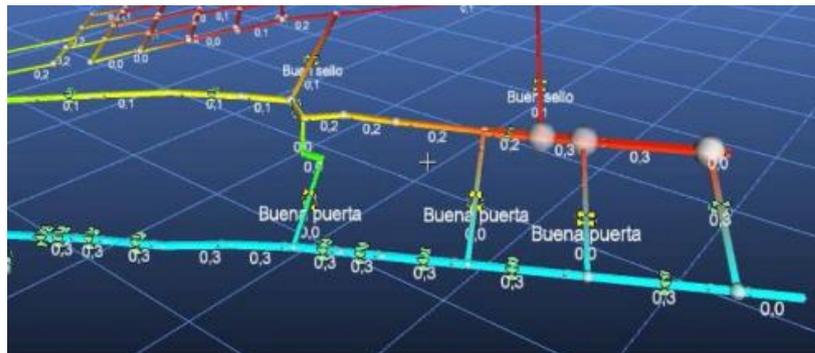


ILUSTRACIÓN 59. MONITOREO VENTILACIÓN SUBTERRÁNEA. (FUENTE: REDALYC, 2023)

6.3 VENTILADORES DE ALTA EFICIENCIA Y ALTAS TECNOLOGÍAS LIMPIAS

Los ventiladores en minería, al igual que el resto de las tecnologías han sufrido una gran evolución y desarrollo instalándose en ellos nuevos mecanismos que garanticen condiciones de seguridad mayores para los trabajadores en la zona de trabajo.

Estos ventiladores se clasifican en tres tipos según su diseño y características:

1. Ventiladores centrífugos:

En estos ventiladores, el aire ingresa por el canal de aspiración que se encuentra a lo largo de su eje utilizando la fuerza centrífuga para impulsar el aire a través de un rotor con álabes curvados. Ofrecen un flujo mediano de aire logrando un 60-80% de eficiencia.

2. Ventiladores Axiales:

Minería Subterránea Moderna

Su función es inyectar o extraer aire en la mina según su configuración, creando una circulación constante del flujo, inyectando aire fresco y retirando aire viciado. Estos equipos están diseñados para operar en las condiciones más extremas, entregando aire durante las 24 horas al día y 365 días del año de forma ininterrumpida como auxiliares o principales.[45]

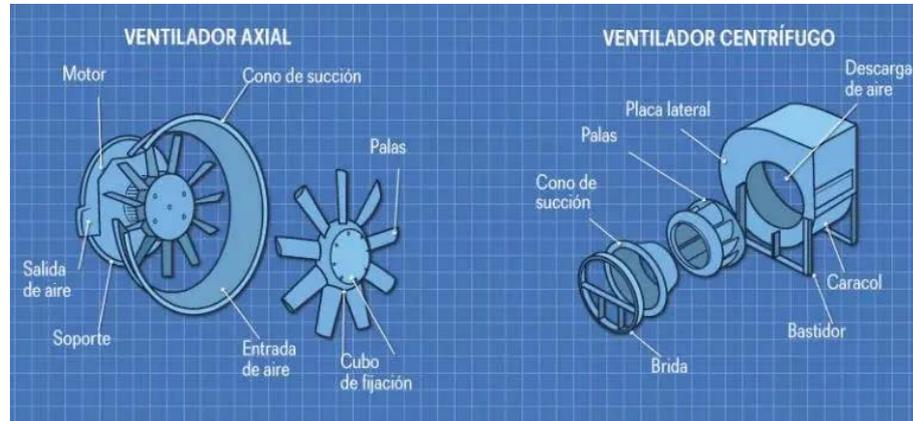


ILUSTRACIÓN 60. COMPONENTES DE LOS VENTILADORES AXIAL Y CENTRÍFUGO. (FUENTE: LA CASA DEL VENTILADOR, 2023)

3. Ventiladores mixtos:

Estos son una combinación de los centrífugos y los axiales, optimizando así la relación entre flujo de aire y presión.

Este tipo de ventiladores son adecuados sobre todo para zonas en las que se requiere un equilibrio entre caudal y presión estática.

Laura Valero Sánchez

7. IMPACTO AMBIENTAL Y GESTIÓN SOSTENIBLE

La minería sostenible se define como “el desarrollo de recursos minerales y energéticos de un país, maximizando los beneficios económicos y sociales mientras se minimizan los impactos ambientales”. Para tener una minería sostenible, es importante llevar a cabo una buena gestión, identificando los siguientes impactos en minería subterránea:

- Alteración del suelo y hundimientos:
Los hundimientos mineros son fenómenos de subsidencias del terreno o formación de huecos en superficie ocasionados como consecuencia de la extracción de masas de mineral en profundidad. La naturaleza del hundimiento está controlada por dos tipos de factores, geológicos y mineros. Los factores geológicos son las características litológicas, estructurales e hidrogeológicas del depósito explotado y del recubrimiento existente. Entre los factores mineros el más destacado es el método de explotación empleado seguido de la profundidad a que se encuentran las labores.[46]

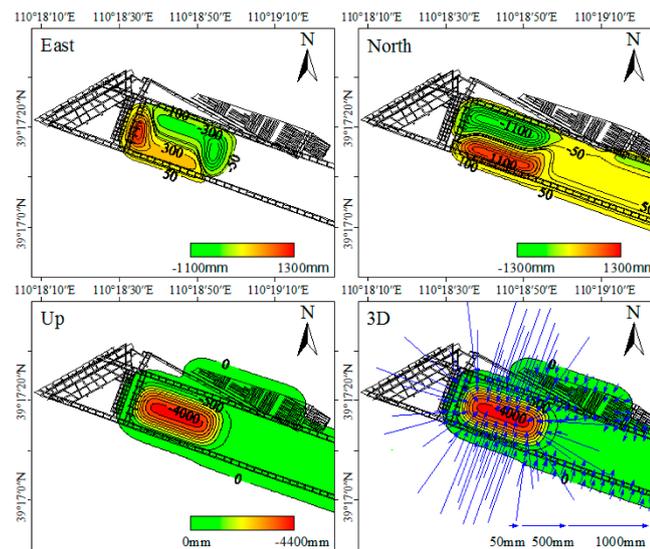


ILUSTRACIÓN 61. REPRESENTACIÓN DE SENSORES REMOTOS EN MINERÍA. (FUENTE: MDPI, 2015)

- Contaminación del agua:
El equilibrio hidrológico puede alterarse por consecuencia de la minería subterránea, afectando a los acuíferos. Además, la infiltración de agua en las galerías puede generar lixiviados contaminados con metales pesados y productos químicos que se utilizan durante la extracción.

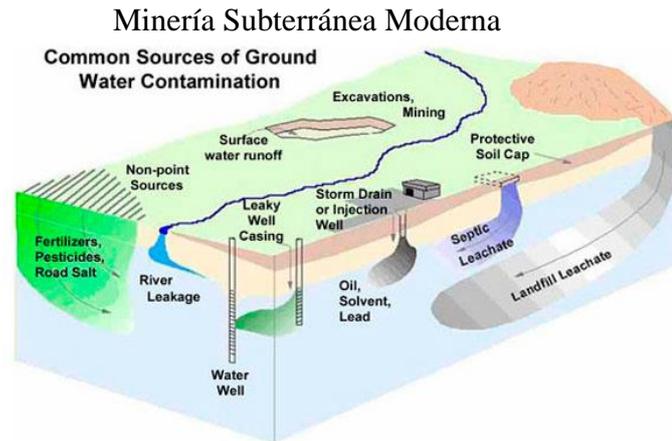


ILUSTRACIÓN 62. LA CONTAMINACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS. (FUENTE: EADIC, 2023)

- Emisiones de gases y polvos
Durante las actividades de minería se liberan gases como dióxido de carbono, metano, y óxidos de azufre.
- Generación de residuos sólidos
Durante la explotación, se genera gran cantidad de escombros y residuos que deben gestionarse. Esta acumulación de residuos, si no se gestiona correctamente puede llegar a alterar el paisaje produciendo contaminación si no se manejan adecuadamente.
- Impacto en la biodiversidad
La construcción de accesos, túneles y bocaminas puede afectar a los ecosistemas locales y fragmentar hábitats naturales, así como la contaminación del aire y agua puede influir en la fauna y flora de las zonas de alrededor de la explotación.

7.1 EFICIENCIA ENERGÉTICA EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

La eficiencia energética es la optimización de la relación entre los productos o servicios finales obtenidos y la cantidad de energía utilizada en su producción, también se puede entender como acciones que apuntan a reducir el consumo de energía sin sacrificar el confort o la actividad económica a la que sirve.

En minería subterránea la eficiencia energética es un tema polémico ya que las operaciones requieren un consumo elevado de energía. [47]

Es por esto, que, durante los últimos años, se busca reducir el uso de esta energía para reducir el impacto ambiental. Para ello, se han ido desarrollando nuevos avances y adaptando nuevos sistemas de tecnología a los ya existentes:

- Vehículos de alta eficiencia energética:

Los vehículos de transporte y maquinaria se han adaptado para mejorar la eficiencia a través de:



Laura Valero Sánchez

- Motores más optimizados: Reducen el consumo de combustible maximizando el rendimiento.
- Sistemas de frenado regenerativo: Permiten recuperar y almacenar la energía durante el frenado.
- Vehículos eléctricos y baterías: de esta manera se consiguen eliminar las emisiones directas, reduciendo la demanda de energía externa.
- Automatización y control remoto: Reduce el tiempo de inactividad y optimiza el uso de energía en la operación.
- Uso de materiales ligeros:



ILUSTRACIÓN 63. ENERGÍA EN MINERÍA. (FUENTE: 4E CHILE, 2022)

Se está comenzando a utilizar materiales más ligeros para la fabricación de maquinaria con la que se consigue reducir el peso total de los vehículos, por lo tanto, el consumo de combustible.

- Energías alternativas en minería subterránea

El avance de las energías renovables y tecnologías de bajo consumo supone un avance para la reducción energética en minería.

El uso de paneles solares y turbinas eólicas generan energía para poder abastecer las operaciones, además, se están llevando a cabo estudios para poder utilizar hidrógeno verde y poder reducir así la dependencia en combustibles fósiles.

- Variadores de frecuencia en motores:

Se ha comenzado a implantar variadores de frecuencia en motores eléctricos que permiten ajustar la velocidad de los equipos según la demanda de trabajo, consiguiendo evitar así el consumo innecesario.

La reducción del estrés mecánico en los motores provoca una disminución de costes de reemplazo y mantenimiento.

- Ventilación:

Los sistemas de ventilación en minería suponen el 50% de consumo total de electricidad. Para optimizarlo, se han implantado medidas como sistemas de control, que ponen en



Minería Subterránea Moderna

marcha la ventilación cuando es necesario, además de instalar ventiladores de velocidad variable que adaptan la velocidad a la necesidad de cada momento.[48]

7.2 REDUCCIÓN DE EMISIONES EN PROCESOS SUBTERRÁNEOS

Otra parte clave para la reducción del impacto ambiental de la minería, es la reducción de emisiones, ya que en este sector la dependencia de combustibles fósiles y la generación de gases representan un problema para la sostenibilidad del sector.

Con el paso del tiempo se han investigado y llevado a cabo distintos planes que permiten reducir la huella de carbono y la contaminación del aire en las operaciones mineras.

1. Uso de combustibles más limpios y sistemas de control de emisiones:

- Diesel de bajo contenido de azufre: De esta manera, se reduce la emisión de óxidos de azufre y partículas contaminantes.
- Uso de filtros de partículas diésel: Mediante estos filtros, se capturan y eliminan partículas finas antes de ser liberadas al ambiente.
- Catalizadores de reducción selectiva: Sirven para disminuir las emisiones de óxidos de nitrógeno mediante la inyección de urea.
- Motores de combustión más eficiente: Utilizan tecnologías avanzadas de inyección para la optimización de consumo de combustible.

2. Vehículos eléctricos e híbridos:

El uso de equipos eléctricos consigue eliminar las emisiones directas de dióxido de carbono reduciendo así la ventilación en túneles. Aunque todavía es complicado conseguir un transporte 100% eléctrico, se están implementando vehículos híbridos que combinan los motores eléctricos y los de combustión.

3. Integración de energías renovables:

Como se ha explicado previamente, se ha empezado a integrar energías renovables para llevar a cabo las operaciones, entre estas, encontramos:

- Energía solar fotovoltaica: Se instalan los paneles solares en la superficie de manera que se pueda abastecer la infraestructura minera.
- Parques eólicos cercanos a la zona de explotación: De esta manera, se reduce la dependencia de la red eléctrica y se disminuye la huella de carbono.

Hidroeléctrica: Aunque son a pequeña escala, se pueden aprovechar cursos de agua cercanos que generen electricidad de manera sostenible.

4. Recambio de combustible en transporte y equipamiento:

- Uso de gas natural licuado: Mediante el gas licuado se consigue reducir las emisiones de dióxido de carbono.

Laura Valero Sánchez

- Combustibles sintéticos y biodiesel: La aparición de estos nuevos combustibles son una opción ambientalmente más limpia para la maquinaria pesada y el transporte interno.
- Optimización del uso de combustibles: El monitoreo continuo en tiempo real, los sensores utilizados...etc. permiten reducir el consumo innecesario.

5. Producción de hidrógeno para equipos y camiones:

- Electrólisis con energías renovables: Permite producir hidrógeno verde en el mismo sitio minero.
- Camiones mineros propulsados por hidrógeno son otro objetivo en marcha por algunas empresas, lo cual reduciría gran parte del consumo de dióxido de carbono producido por la maquinaria.

7.3 GESTIÓN DE AGUAS RESIDUALES

Las operaciones de extracción en minería están viéndose cada vez más afectadas por estrictas regulaciones concernientes a las aguas residuales que generan y a la necesidad de no verter residuos líquidos que puedan afectar al medio ambiente.

Estas regulaciones pueden afectar gravemente a la viabilidad de las explotaciones si no se toman las medidas necesarias, por lo que hay que encontrar el tratamiento de aguas residuales más adecuado y sostenible.[49]



ILUSTRACIÓN 64. CALIDAD DE AGUA EN LA INDUSTRIA MINERA. (FUENTE: OMEGA PERÚ, 2023)

Para ello, se han desarrollado distintas tecnologías que se encargan del tratamiento de efluentes de minería:



Minería Subterránea Moderna

1. Captura adecuada del agua:

La infiltración del agua es algo inevitable, pero se puede tratar, evitando la propagación de contaminantes. Para ello, se implementan barreras y drenajes controlados, que canalizan el agua contaminada hacia plantas de tratamiento.

Este sistema, se apoya en sistemas de monitoreo de calidad del agua, permitiendo detectar los contaminantes y su dispersión.

2. Tratamiento y reciclaje del agua residual antes de su liberación:

Se utilizan plantas de tratamiento que sirven para la eliminación de metales pesados y sulfatos antes de liberar el agua a fuentes naturales. De esta manera, se promueve el reciclaje del agua tratada por medio de osmosis inversa y filtración por membranas para reutilizarse en los procesos, evitando así la extracción de fuentes naturales.

3. Uso de estanques de sedimentación:

Se han comenzado a crear estanques de sedimentación, para poder eliminar partículas sólidas y lodos contaminantes. Para estos tratamientos se aplican técnicas de floculación y coagulación, que mejoran la sedimentación de las partículas en suspensión y poder ajustar el pH del agua con reactivos.

4. Implementación de líneas solidas canales y cubiertas en pilas de mineral:

Se emplean geomembranas y revestimientos impermeables en pilas de mineral y escombrera para poder evitar la contaminación del agua por drenaje de ácido de mina.

Para ello, se diseñan canales de recolección y drenaje, que dirigen el agua lejos de los materiales potencialmente contaminantes, instalándose cubiertas y sistemas de encapsulación en materiales reactivos evitando la generación de lixiviados ácidos.

Aunque estas medidas son generales, cada mina tiene características únicas, por lo que deben desarrollarse soluciones a medida para la gestión del agua. Para buscar las soluciones deberán implementar sus propios programas de monitoreos ambiental y asegurarse de cumplir las normativas.

7.4 REHABILITACIÓN DE GALERÍAS

La rehabilitación de espacios mineros abandonados se ha convertido en un aspecto clave de la gestión sostenible en la minería subterránea. Una vez la explotación minera ha terminado, su abandono sin medidas adecuadas puede generar problemas ambientales y de seguridad.

Esta necesidad y obligación legal de restaurar los espacios mineros no es siempre un proceso sencillo de llevar a cabo ya que cada emplazamiento tiene sus características específicas geomorfológicas e hídricas. Cuando se precisa de una estabilidad a largo plazo en terrenos con inestabilidad geomorfológica caracterizadas por formas geométricas, laderas rectilíneas y drenajes artificiales, se tiene que realizar un estudio

Laura Valero Sánchez

exhaustivo del método que proporcione simultáneamente beneficios económicos, sociales y ecológicos.

Para la rehabilitación de estos espacios, se requiere un enfoque de distintos tópicos, combinando ingeniería, ecología y gestión ambiental, de manera que se pueda restaurar el equilibrio natural del área afectada. A continuación, se presentan los principales.[50]

1. Restauración geomorfológica:

La restauración geomorfológica busca una reconstrucción de la morfología natural del terreno, promoviendo la estabilidad del paisaje y facilitando su integración con el ecosistema circundante.

- Método GeoFluv-Natural Regrade

El método utiliza un software avanzado que sirve para modelar la reconstrucción del relieve, buscando la estabilización de laderas y drenajes de manera natural. A través de este, se minimiza la necesidad de mantenimiento a largo plazo, maximizando el potencial ecológico del área rehabilitada.

De esta manera, se facilita la integración de procesos hidrológicos naturales, reduciendo la erosión y el riesgo de sedimentación en cuerpos de agua cercanos.

Por último, se complementa con revegetación con especies nativas, favoreciendo así la restauración ecológica del terreno. [51]

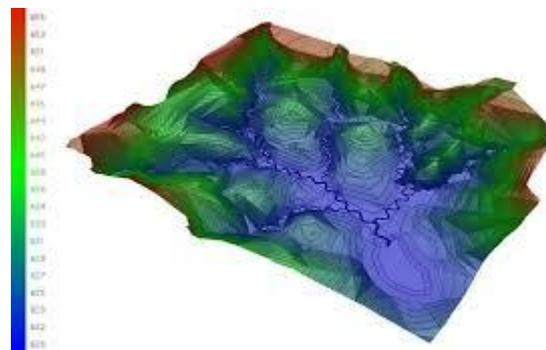


ILUSTRACIÓN 65. GEOFLUV: GEOMORFOLOGÍA FLUVIAL. (FUENTE: GEMM, 2023)

2. Rehabilitación funcional:

Las minas abandonadas o donde ya se ha terminado la explotación, pueden utilizarse como espacios con nuevos usos, pudiendo beneficiar a la comunidad, transformando antiguos espacios mineros en áreas para usos educativos, científicos, artísticos o recreativos.

3. Gestión de residuos mineros

La gestión de residuos es otro problema en la rehabilitación de terrenos. Para esta gestión es importante una planificación previa que cuente minimice la contaminación.

Minería Subterránea Moderna

Dentro de los residuos mineros, existen distintos tipos:

- Estériles y rocas de descarte: Estos materiales no contienen mineral de interés, pero pueden reutilizarse como material de relleno.
- Relaves y lodos minerales: Proceden del procesamiento del mineral, suelen contener residuos químicos y metales pesados. Es importante almacenarlos de manera adecuada, ya que pueden generar drenaje ácido de mina, afectando a aguas cercanas.
- Aguas residuales contaminadas que requieren tratamiento antes de su vertido o reutilización.
- Residuos gaseosos que se generan en procesos de voladura, transporte de material, y ventilación de las minas.

4. Tratamiento del suelo y revegetación:

En la rehabilitación de terrenos el tratamiento de suelo y revegetación es importante ya que aparte de reducir el impacto ambiental causado, reduce el impacto visual.



ILUSTRACIÓN 66. REFORESTACIÓN: ANTES Y DESPUÉS. (FUENTE: REFORESTACIÓN, 2016)

Estas técnicas, permiten la regeneración de ecosistemas saludables. Para ello se lleva a cabo:

- Estabilización del terreno:

Antes de llevar a cabo la revegetación es importante rehabilitar los taludes y rellenar huecos para evitar riesgos de erosión, para este proceso se utilizan técnicas de bioingeniería que mejoran la estabilidad del suelo antes de iniciar la revegetación.

- Técnicas de manejo selvícola:

Desbroce y clareo que consiste en la eliminación de vegetación invasora para poder favorecer la regeneración natural, procediendo a una plantación masiva de árboles que logren la recuperación forestal de áreas degradadas.



Laura Valero Sánchez

8. SEGURIDAD EN LA MINERÍA SUBTERRÁNEA MODERNA

La seguridad en minería es un aspecto fundamental debido a las condiciones extremas en las que se trabaja y los múltiples riesgos asociados a la explotación bajo tierra.

A lo largo del tiempo, se han ido conociendo más riesgos a los que los trabajadores están expuestos, desarrollando nuevas tecnologías, sistemas de control, protocolos etc. que se han vuelto indispensables, ya que minimizan el número de accidentes, garantizando la seguridad de los trabajadores.

Las técnicas de seguridad en minería, está regulada por un conjunto de normas leyes y reglamentos, es decir, existe una obligación legislativa para el cumplimiento de la seguridad en estos trabajos, garantizando la protección del trabajador.

El marco general de la legislación minera en seguridad está regulado por:

1. Leyes de ámbito general: Estas normativas establecen los requisitos básicos de seguridad, en España se recoge en la Ley de prevención de riesgos laborales.
2. Reglamentos específicos de minería: Esto se recoge en el reglamento general de normas básicas de seguridad minera, y detallan los procedimientos y condiciones técnicas para operar en minería subterránea y/o cielo abierto.
3. Normativas internacionales: Establecen guías de buenas prácticas y normas que deben cumplirse de manera internacional.

Además, existen las instrucciones técnicas complementarias (ITC) que desarrollan y detallan aspectos específicos del reglamento general de normas básicas de seguridad minera. Cada ITC se centra en un aspecto específico de la seguridad, ya sea de ventilación, estabilidad, uso de explosivos...

Estas técnicas son de obligado cumplimiento, y es supervisado por organismos de inspección y seguridad, realizándose inspecciones de trabajo periódicamente, asegurándose de que se cumpla toda la normativa, y en caso contrario, pueden presentarse sanciones económicas, suspensión de actividades o incluso el cierre de la explotación. [53]

8.1 PRINCIPALES RIESGOS EN MINERÍA SUBTERRÁNEA

En la minería subterránea existen gran cantidad de riesgos que hay que tener en cuenta y ser conscientes para trabajar de manera segura y evitando posibles accidentes. Aunque dependiendo de la mina y sus características, existen distintos peligros, existen una serie de riesgos comunes que se detallan a continuación: [52]

1) Riesgos geomecánicos:

Estos riesgos están relacionados con la estabilidad del macizo y la estructura de las excavaciones mineras.

Este tipo de riesgos, pueden ser por distintos factores:

- Derrumbes y colapsos: Pueden provocar atrapamientos.

Minería Subterránea Moderna

- Caída de rocas: El estrés geológico acumulado puede provocar fracturas explosivas en las paredes del túnel.



ILUSTRACIÓN 67. DERRUMBE EN MINERÍA SUBTERRÁNEA. (FUENTE: HUFFINGTON POST, 2023)

2) Gases y atmósferas peligrosas:

Al adentrarse en las profundidades de la corteza terrestre, suelen encontrarse bolsas llenas de gases tóxicos, que ponen en peligro la salud de los trabajadores:

La inhalación de estos gases tóxicos puede producir asfixia, intoxicaciones, o explosiones si existe un iniciador.

La deficiencia de oxígeno en algunos ambientes puede generar atmósferas irrespirables, causando hipoxia, pérdida de conciencia y muerte súbita.

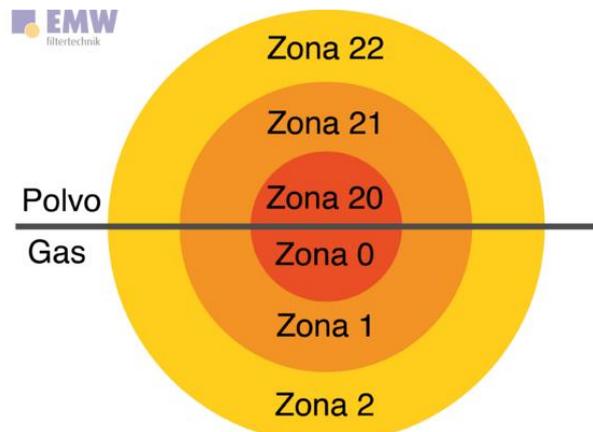


ILUSTRACIÓN 68. COMPARATIVA GASES EN MINERÍA. (FUENTE: EMW, 2023)

3) Riesgos operacionales:

Los riesgos operacionales son aquellos que están relacionados con el uso de maquinaria pesada, explosivos y otros equipos mineros en los espacios confinados.

- Explosivos:

Laura Valero Sánchez

La manipulación inadecuada de explosivos en voladuras, errores en la secuencia de detonación o en la carga, pueden producir detonaciones accidentales que pongan en peligro la estabilidad de la mina o den lugar a accidentes letales.

- Maquinaria pesada:

Los atropellos y colisiones de maquinaria pesada son muy frecuentes en minería ya que, al trabajar en túneles con espacios reducidos, la visibilidad se ve muy limitada, lo que aumenta el riesgo de accidente.

4) Riesgos por inundaciones y flujos de agua

Como se ha explicado con anterioridad, el agua genera múltiples problemas en minería, siendo la seguridad una consecuencia directa.

- Filtraciones:

La aparición repentina de agua en las galerías puede causar inundaciones súbitas, atrapamientos o problemas con el sistema eléctrico.

- Drenaje ácido de mina:

La existencia de minerales sulfurosos puede interactuar con el agua dando lugar a agua acida, la cual es altamente contaminante. Esta agua acida, afecta a la estabilidad del terreno, provoca corrosión en equipos y filtraciones tóxicas.



ILUSTRACIÓN 69. DRENAJE DE LA MINA (FUENTE: HCA MINERÍA, 2023)

5) Riesgos ergonómicos y de salud:

Hasta hace relativamente poco, estos riesgos han pasado desapercibidos ya que no ocurren instantáneamente. El desarrollo de nuevas tecnologías en medicina ha demostrado que las condiciones extremas a las que están expuestos los trabajadores,



Minería Subterránea Moderna

pueden afectar a la salud después de un periodo de tiempo expuesto a ciertos ambientes:

- Enfermedades respiratorias:

La inhalación prolongada de polvo mineral, sílice, y partículas finas puede causar distintas enfermedades como silicosis, neumoconiosis y enfermedades pulmonares.

- Fatiga y estrés térmico:

Las altas temperaturas en galerías profundas, junto con el esfuerzo físico, pueden causar golpes de calor y agotamiento, que terminen en otros accidentes debido a la falta de concentración por el cansancio acumulado.

8.2 SISTEMAS DE DETECCIÓN Y ALERTA TEMPRANA

Frente a todos los riesgos existentes en la minería, se han desarrollado nuevas tecnologías que puedan identificar los riesgos y evitar que estos se materialicen causando accidentes que podían haber sido evitados.

Estas tecnologías combinan sensores avanzados, plataformas autónomas, redes de comunicación... permitiendo una mejora en la seguridad.

1. Redes de sensores:

Estos sensores, instalados en puntos estratégicos, recopilan datos en tiempo real sobre parámetros críticos como la presión del aire, temperatura, humedad y la deformación del terreno. Los datos obtenidos son transmitidos a la superficie mediante tecnología de comunicación inalámbrica adaptada a ambientes subterráneos, como la red Wi-Fi subterránea de banda estrecha (NB-IoT), que permite la transmisión de información en zonas remotas de la mina.[54]

2. Plataformas robóticas autónomas para inspección y monitoreo:

La aparición de robots y drones subterráneos han revolucionado la manera de trabajar en la mina, permitiendo realizar inspecciones en zonas de alto riesgo sin exponer a los trabajadores. Se utilizan plataformas robóticas autónomas equipadas con cámaras de alta resolución que realizan inspecciones visuales evaluando estructuras, sensores térmicos encargados de detectar aumentos de temperatura en los equipos eléctricos o en zonas con riesgo de incendio, sistemas LIDAR que generan los modelos digitales y radares de penetración terrestre, que evalúan la composición geotécnica del subsuelo, detectando posibles cavidades o fallas en el macizo. [54]

3. Sistemas de comunicación y control remoto:

En minería subterránea la comunicación es un elemento crucial, viéndose dificultada en ocasiones por las condiciones. Para combatir esto, se han desarrollado redes de comunicación adaptadas a estos entornos.

Estas redes utilizan Wi-Fi subterráneo de banda estrecha que permite el envío de datos en tiempo real con bajo consumo de energía, además las redes 5G facilitan la interconexión de sensores maquinaria y sistemas de monitoreo. De



Laura Valero Sánchez

esta manera, se puede mantener la comunicación continua entre trabajadores, tanto en el interior, como en la superficie.

4. Plataformas de Big Data e Inteligencia Artificial

La aparición de la inteligencia artificial, y las plataformas de big data están tomando un papel importante en minería ya que se utilizan para el análisis avanzado de riesgos.

El almacenamiento de información sirve como análisis predictivo de riesgos, ya que mediante estos se pueden evaluar patrones y datos anticipándose a posibles accidentes. Los modelos de inteligencia artificial calculan el comportamiento geotécnico del terreno mediante predicción de derrumbes o explosiones, de manera que se puede alertar con anticipación sobre riesgos de colapsos.

5. Sistemas de posicionamiento y seguimiento en tiempo real

Dentro de la mina es importante rastrear la posición de los trabajadores y equipos en tiempo real, ya que en caso de accidente o emergencia, se pueda garantizar una respuesta rápida.

Los sistemas de seguimiento cuentan con etiquetas RFID que se instalan en cascos y equipos, la geolocalización en tiempo real que permite optimizar rutas de evacuación y mejoran la eficiencia operativa.

Toda esta información, se recoge en los centros de control, que en caso de accidente cuentan con la ubicación exacta del trabajador afectado, pudiendo activar los protocolos de rescate pertinentes.

8.3 PROTOCOLOS DE EMERGENCIA Y RESCATE

Para garantizar una evacuación efectiva y optimizar la respuesta ante incidentes graves, se lleva a cabo el diseño de protocolos de emergencia y rescate. Todos estos procedimientos, deben estar bien definidos, probados y respaldados por tecnologías avanzadas.

- Planes de emergencia

Los planes de emergencias en la minería son documentos esenciales que establecen procedimientos y medidas a seguir en caso de situaciones de emergencia o desastres en las operaciones mineras. Estos planes son críticos para garantizar la seguridad de los trabajadores, proteger el medio ambiente y minimizar los daños materiales en caso de incidentes imprevistos.

Los procedimientos claves en un plan de emergencia son los siguientes:

- I) Alarmas y notificaciones: Es necesaria la implementación de sistemas de alerta temprana para informar sobre incidentes en tiempo real
- II) Evacuación y salvamento: Deben haberse diseñado rutas de escape para la evacuación y extracción de la gente del interior de la mina.
- III) Comunicación y coordinación: Los sistemas de comunicación deben estar activos para poder interactuar entre trabajadores, rescatistas y centros de control si fuera necesario.

Minería Subterránea Moderna

Además, es esencial que exista una organización de equipos de rescate, de manera que cada trabajador tenga roles y responsabilidades en caso de emergencia. [55]

- Formación y capacitación del personal:

Es fundamental dentro del protocolo de seguridad, que los trabajadores hayan sido preparados para situaciones de emergencia.

Para ello, se llevan a cabo simulacros periódicos que evalúen los tiempos de respuesta y las deficiencias en los protocolos.

Todos los operarios deben saber actuar ante situaciones de emergencia, por lo que se imparten cursos de especialización, procedimientos de evacuación y rescate a todo el personal minero.

- Equipos y recursos para rescate minero:

Los equipos de rescate cuentan con herramientas especializadas para operar en condiciones extremas, y están compuestas de:

I) Brigadas de rescate:

Las brigadas de rescate minero cuentan con trajes ignífugos, mascarillas, detectores de gases etc. y están entrenadas para responder a derrumbes, explosiones, incendios e inundaciones.



ILUSTRACIÓN 70. CAPACITACIÓN BRIGADA DE EMERGENCIAS. (FUENTE: PESCO CAPACITACIÓN, 2023)

II) Estaciones de rescate y recursos de supervivencia:

Dentro de la mina existirán puntos de encuentro seguros, que cuenten con suministro de agua, alimentos y oxígeno.

III) Tecnologías avanzadas para rescate:



Laura Valero Sánchez

Los drones y robots autónomos están equipados con cámaras térmicas y sensores que pueden localizar al personal sin necesidad de exponer a los rescatistas a riesgos mayores.

8.4 FORMACIÓN Y CAPACITACIÓN DEL PERSONAL

En minería, al igual que en otros sectores como la construcción y la metalurgia, existen una formación profesional mínima en materia de seguridad y salud laboral. Se requiere a los trabajadores haber recibido esta formación de 20 horas presenciales que se divide en los siguientes apartados:

1. Definición de los trabajos.
2. Técnicas preventivas y de protección específica.
3. Equipos, herramientas o medios auxiliares.
4. Control y vigilancia sobre el lugar de trabajo y su entorno.
5. Interferencias con otras actividades.
6. Normativa y legislación.

A parte de esta formación “teórica”, se llevarán a cabo simulacros periódicos, que sirvan para evaluar los tiempos de respuesta y corregir deficiencias en los protocolos.

Se requerirá también a los operarios formación en primeros auxilios y soporte vital avanzado. [56]



9. ECONOMÍA Y PRODUCTIVIDAD

A la hora de realizar un proyecto de minería, la economía y productividad son factores que determinaran la rentabilidad del proyecto, por ende, determinará si se lleva a cabo o no el proyecto.

Estos aspectos, abarcan desde la planificación y optimización de operaciones hasta la reducción de costos y la maximización de la extracción.

En este apartado, se detallan los principales factores que afectan la economía y la rentabilidad.

1. Costos de explotación y producción:

Dentro de estos, se encuentran todos los gastos necesarios para poder llevar a cabo la extracción y procesar el mineral. Existen 2 tipos:

- Costos de explotación: Estos costos son aquellos que se relacionan directamente con la extracción del mineral, es decir, aquellas labores como perforación, voladura, sostenimiento...
- Costos de producción: Incluyen el procesamiento, tratamiento, mantenimiento de equipos...

2. Productividad de mano de obra y automatización:

Una correcta formación y un plan de seguridad adecuado, puede reducir notoriamente el número de accidentes, lo cual mejora la eficiencia ya que no hay paralizaciones. Además, la introducción de equipos automatizados reduce el personal, evitando cambios de turno, descansos etc. Aumentando la productividad.

3. Optimización de ventilación y energía:

El uso de sistemas eficientes de ventilación, ayudan a reducir el consumo energético, minimizando costes.

4. Factores económicos externos:

El mercado es fundamental a la hora de determinar si una explotación es rentable o no, por lo que hay que tener en cuenta las fluctuaciones en el precio de los metales.

Estos pueden verse afectados por normativas gubernamentales que hagan que el precio varíe, o se limite la explotación, de manera que pierda su rentabilidad.

9.1 COSTOS DE OPERACIÓN

Los costos operativos son aquellos que están relacionados con las actividades esenciales para que el proyecto pueda llevarse a cabo. Dentro de estos gastos, se encuentran la adquisición de materiales, maquinaria, mano de obra, además de alquileres de oficinas, pago de servicios públicas (licencias de explotación).

Estos son un elemento clave para determinar la viabilidad del proyecto, por lo que se debe llevar un control regular y una gestión adecuada de estos.[57]



Laura Valero Sánchez

A continuación, se detallan los costos de operación principales en minería:

1. Labores subterráneas:

Dentro de estas, se incluyen todas las actividades necesarias para la extracción del mineral desde el subsuelo. Cada etapa, conlleva sus propios costes: mano de obra, equipos, materiales...

- Perforación y voladura:
Estas operaciones son fundamentales a la hora de llevar a cabo la extracción. Sus costes incluyen:
 - Explosivo
 - Equipos de perforación
 - Mano de obra especializada
 - Planificación
 - Sistemas de seguridad
- Carga y transporte:
Tras la voladura, la roca fragmentada ha de cargarse y transportarse hasta el área de procesamiento. Los costos en esta etapa dependen de distintos factores:
 - Equipos
 - Maquinaria
 - Mano de obra
 - Combustible

2. Equipamiento:

La gestión y selección del equipamiento es una parte significativa de los costos operativos. Es importante una buena gestión y estudio previo a la adquisición de los equipos.

- Adquisición: Es importante realizar una evaluación de costo-beneficio a la hora de adquirir equipos nuevos, alquilarlos, o conseguirlos de segunda mano. Para ello, se debe tener en cuenta distintos factores como la vida útil, la eficiencia, la tecnología incorporada y su año de fabricación.
- Mantenimiento: Durante las labores de explotación, es clave llevar un mantenimiento preventivo de todos los equipos, ya que prolongará su vida útil. Además, este mantenimiento evitará fallos inesperados que desemboquen en máquinas paradas, aumentando los tiempos de producción y por ende los costes.
- Operación: En estos costos se incluyen el consumo energético, lubricantes y combustibles necesarios durante el funcionamiento de los equipos. Una buena formación de los trabajadores respecto al uso eficiente de la maquinaria puede contribuir a una reducción de costos.



Minería Subterránea Moderna

3. Mano de obra:

Los costos asociados a la mano de obra incluyen salarios, beneficios, capacitación y medidas de seguridad.

- Salarios y beneficios: Los salarios de los operarios contemplan un sueldo base y su contribución a la seguridad social.
- Capacitación: Es importante dejar márgenes económicos para formaciones, ya sea en tecnologías o protocolos de seguridad. Aunque estas inversiones no vayan a verse reflejadas de manera activa, la capacitación de los operarios y su formación es esencial para una reducción de incidentes, maximizando la eficiencia y evitando posibles interrupciones.
- Seguridad: Invertir en seguridad es una manera de reducir costos asociados con accidentes laborales, ya sea por indemnizaciones, interrupciones, sanciones por incumplimiento...

4. Servicios generales:

Estos servicios engloban una amplia gama de actividades necesarios para el soporte de las operaciones mineras. [58]

Dentro de estos, encontramos:

- Gestión de instalaciones: Costos asociados al mantenimiento de infraestructuras como oficinas, comedores...
- Comunicaciones: Sistemas de comunicación eficientes para una buena coordinación y planificación durante las labores.
- Administración: Además de los operarios, existen otros trabajadores administrativos.

9.3. OPTIMIZACIÓN DE PROCESOS PARA AUMENTAR LA PRODUCTIVIDAD

Para minimizar los costos, mejorar el rendimiento de quipos y aumentar la seguridad, se siguen una serie de estrategias que abordan distintas metodologías:

1. Metodología Lean Six Sigma:

Para explicar esta metodología es necesario saber que es la combinación de 2 metodologías distintas que buscan la mejora de los procesos.

I) Lean: Esa se enfoca en la velocidad y eficiencia, eliminando desperdicios.

II) Six sigma: Centrada en mejorar la calidad.

Lean six sigma se encarga de combinar ambas, de manera que se mejoran los procesos reduciendo defectos y aumentando la rentabilidad y productividad, basándose en el análisis de datos y variables clave. [59]

Laura Valero Sánchez



ILUSTRACIÓN 71. LEAN SIX SIGMA: MEJORA CONTINUA. (FUENTE: KAIZEN, 2023)

El núcleo metodológico de six sigma es DMAIC, se integra completamente en Lean Six sigma de manera que se llevan a cabo los siguientes pasos:

- Definir: En esta etapa se identifican problemas clave en la operación
- Medir: Se lleva a cabo un análisis de datos sobre productividad y costos.
- Análisis: Se realiza un estudio de las causas iniciales de ineficiencias.
- Mejora: Detectado el problema, se buscan y establecen soluciones que reduzcan las pérdidas, aumentando así la producción.
- Control: Una vez acabado el proceso, se establecen medidas para mantener la mejora.

2. Mantenimiento productivo total (TPM):

El mantenimiento productivo total se basa en que todos los empleados participen en el mantenimiento de su entorno de trabajo. Dentro de este mantenimiento, se incluyen inspecciones periódicas, mantenimiento preventivo y revisiones de equipos en todos los niveles.

Este mantenimiento, incluye métodos avanzados de detección de problemas, con el objetivo de maximizar la eficiencia de los equipos reduciendo tiempos de inactividad. [660]

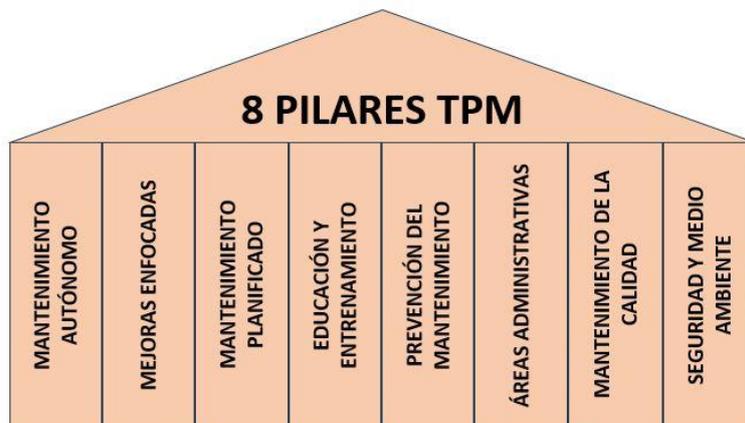


ILUSTRACIÓN 72. INTRODUCCIÓN AL MANTENIMIENTO PRODUCTIVO TOTAL (TPM). (FUENTE: TOTAL MANUFACTURING, 2023)

Minería Subterránea Moderna

3. Indicadores de gestión (KPI):

Estos indicadores son métricas que permiten medir el desempeño del proyecto, equipo o empresa en función de los objetivos que se han establecido.

Los KPI se utilizan en distintos niveles:

- KPIs de alto nivel: Estos sirven para evaluar el desempeño global de la empresa.
- KPIs de bajo nivel: Se centran en áreas específicas, atención al cliente, finanzas, gestión de talento...

Estos indicadores, tienen como principales características:

- Especificidad: Deben definirse y alinearse con un único objetivo
- Medibilidad: Para facilitar la evaluación, deben ser cuantificables.
- Relevancia: Se deben alinear con los objetivos estratégicos de la empresa.
- Temporalidad: Hay que llevar un seguimiento de evaluación periódico.

Los KPI pueden ser de distintos tipos, de manera que les permite enfocarse en la eficacia o eficiencia de los procesos. Su correcto uso permite tomar decisiones informadas y ajustar estrategias que mejoren el desempeño organizacional. [61]



ILUSTRACIÓN 73. KPI: INDICADORES CLAVE DE RENDIMIENTO. (FUENTE: SYDLE, 2023)

4. Herramientas estadísticas:

La estadística es de gran importancia en la mejora de los procesos, ya que permite tomar decisiones basadas en datos fiables anteriores.

Mediante la estadística, se pueden analizar datos operativos, reduciendo errores.

Además, a través de técnicas como gráficas de control, líneas de tendencia, y diagramas de Pareto, se puede mejorar la calidad de los procesos, ya que permiten la identificación



Laura Valero Sánchez

de fallos y variaciones inesperadas. La mejora de procesos mediante análisis estadístico aumenta la productividad y rentabilidad del proceso de explotación. [62]



10. PERSPECTIVAS FUTURAS

Al igual que las tecnologías, la minería subterránea está experimentando una transformación acelerada, que busca la mejora en la eficiencia, seguridad y sostenibilidad de los trabajos.

A esta nueva revolución en la industria minera se le conoce como “minería 4.0”. Este nuevo sistema de trabajo cuenta con la integración de distintas tecnologías como las que se mencionan a continuación, que sirven para optimizar los procesos de extracción de recursos naturales.

Este gran avance deja como objetivo principal a las empresas mineras conseguir un mayor beneficio económico, por lo que su principal desafío es optimizar los procesos manteniendo una rentabilidad reduciendo los costos y minimizando el impacto ambiental.

Se recogen tres grandes tendencias a corto plazo que forman parte de esta Minería 4.0:

1. Aplicación de Inteligencia Artificial y BigData
2. Electrificación total de las minas

Estas tecnologías van a establecer un antes y un después en los métodos de extracción, y la manera de trabajar, generando una competitividad de la industria minera.

10.1 APLICACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL Y BIGDATA

La aparición de la inteligencia artificial en esta última década está revolucionando todos los sectores. En el caso de la minería, la inteligencia artificial se está utilizando con el objetivo de mejorar la eficiencia, la seguridad y la rentabilidad, de manera que se puedan maximizar los beneficios de la empresa.



ILUSTRACIÓN 74. EL MUNDO LABORAL DEL BIG DATA (FUENTE: BBVA, 2023)

Una gran ventaja que permite la IA, es el análisis de grandes volúmenes de datos (BigData) en tiempo real, consiguiendo optimizar los procesos y reducir los costos operativos.



Laura Valero Sánchez

Las principales aplicaciones de la IA en este campo son:

I) Exploración y prospección:

La IA permite analizar grandes conjuntos de datos geológicos, geofísicos y geoquímicos para identificar posibles yacimientos. La IA utiliza algoritmos para encontrar patrones y similitudes que en los métodos tradicionales exigirían mayor tiempo además de margen de error.

II) Operaciones autónomas:

Mediante la IA se puede aumentar la eficiencia operativa ya que la automatización de los equipos permite un mayor rendimiento, reduciendo riesgos para los trabajadores y pudiendo realizar tareas sin intervención humana.

III) Voladuras:

El proceso de voladuras se ha optimizado gracias a la inteligencia artificial, ya que el análisis de datos en tiempo real permite tomar decisiones de manera más segura y rápida, logrando una voladura más precisa.

IV) Mantenimiento predictivo:

Los sensores IoT pueden predecir fallos en maquinaria antes de que ocurran, de manera que alertan al centro de control y se procede a su revisión y reparación previa al fallo. De esta manera se evitan los tiempos de inactividad y costos extra de mantenimiento.

V) Gestión de seguridad y riesgos geotécnicos:

En zonas donde existe actividad sísmica, los modelos de IA pueden analizar datos sísmicos y de estabilidad del terreno en tiempo real, adelantándose a posibles colapsos o desprendimientos. [63]

10.2 HACIA LA MINERÍA SUBTERRÁNEA 100% ELECTRIFICADA

Uno de los objetivos que se busca en minería es la reducción de combustibles para reducir el impacto ambiental, para ello se están orientando las practicas hacia la electrificación total. La electrificación, brindaría los siguientes beneficios:

- Reducción de costos energéticos:
La electricidad proporciona más eficiencia y estabilidad en costos que los combustibles fósiles.
- Mejora la calidad del aire subterráneo:
La reducción de combustibles fósiles disminuye las emisiones de gases en las zonas de trabajo, reduciendo el riesgo de enfermedades respiratorias en los trabajadores, al eliminar la exposición a partículas contaminantes generadas por los motores diésel.
- Impacto en costos de ventilación:
La eliminación de motores de combustión disminuye las emisiones, reduciendo la necesidad de ventilación forzada, reduciendo de manera



Minería Subterránea Moderna

notable los costos, ya que la ventilación supone un gran coste del proyecto.[64]

Aunque el objetivo es claro, conseguir una electrificación de los trabajos al 100% supone distintos desafíos:

- La creación de la infraestructura eléctrica y la compra de equipos supone un gran desembolso inicial.
- Los camiones y maquinas autopropulsadas todavía están desarrollándose, siendo un problema actual la autonomía de las baterías ya que, hoy en día, no permiten largas jornadas operativas sin una recarga frecuente.
- Las regiones mineras suelen estar apartadas, siendo difícil garantizar un suministro eléctrico estable.

Pese a estos problemas, ya han empezado a aparecer empresas que han conseguido un alto % de electrificación en la minería.

1. Codelco: Ha implementado un transportador eléctrico de hormigón premezclado reduciendo un 80% de costes energéticos.

2. LHD Eléctrico WX04B de Komatsu

La empresa Komatsu ha diseñado una LHD completamente eléctrica que ofrece 4 horas de operación por carga, reduciendo el tiempo de inactividad y mejorando la efectividad en túneles estrechos.

3. Minería avanzada en Canadá:

Canadá dispone de grandes avances en minería, liderando la electrificación, ya que existen varias minas total o parcialmente electrificadas, como la mina de oro Borden de Newmont.



11. CONCLUSIONES

La necesidad del hombre por la obtención de materias primas ha desencadenado en una actividad fundamental para el desarrollo de la sociedad la tecnología y los recursos, la minería.

Históricamente la minería ha estado marcada por problemas graves de seguridad y por su impacto ambiental, un pensamiento que ha perdurado en el tiempo y sumado al desconocimiento general ha desembocado en una percepción actual de esta actividad como peligrosa, contaminante y poco ética.

Durante siglos, los accidentes mineros han cobrado muchas vidas debido a las pésimas condiciones laborales y desconocimiento (intoxicación por gases tóxicos, derrumbes, enfermedades respiratorias...). El impacto ambiental también ha generado grandes polémicas, ya que, hasta la actualidad, no existían planes de rehabilitación ni gestión del impacto ambiental.

Con el paso del tiempo, las tecnologías han ido desarrollándose, y en las últimas décadas, los nuevos avances han revolucionado la minería subterránea completamente, permitiendo mejorar la seguridad, la eficiencia y reducir el impacto ambiental. Estas nuevas tecnologías, en las que se incluyen la automatización, inteligencia artificial, la maquinaria avanzada y los nuevos métodos de monitoreo han transformado la manera de trabajar, logrando una mayor precisión, seguridad y sostenibilidad. La aparición de la IA se ha convertido en una herramienta fundamental para la minería, gracias a su capacidad de analizar mediante algoritmos se hace posible llevar a cabo una predicción de posibles fallos de maquinaria, estabilidad etc., consiguiendo así minimizar la exposición de los trabajadores a condiciones peligrosas reduciendo el riesgo de accidentes laborales y mejorar la eficiencia de los equipos.

Por otra parte, la introducción de maquinaria de excavación moderna como las tuneladoras y equipos de perforación automatizados permiten una excavación más rápida y precisa. Gracias a la aparición de estas máquinas se han sustituido parte de los métodos de voladura, reduciendo todos los riesgos que conllevaba el uso de explosivos en áreas confinadas. Además, la incorporación de sensores geotécnicos en tiempo real y drones para la inspección de galerías y cavernas ha permitido controlar de manera más precisa las zonas de trabajo y el estado del terreno mejorando así la seguridad. Todos estos sistemas que se han ido incorporando, dan lugar a una minería renovada, en la que ya no se depende únicamente del juicio humano, sino que también se cuenta con el respaldo de las tecnologías, encargadas de la recopilación de datos y su posterior análisis en tiempo real, sirviendo para facilitar la toma de decisiones.

En cuanto a la seguridad directa de los trabajadores, ha cambiado radicalmente, ya que se han implementado protocolos avanzados de monitoreo y control. Estos sistemas de comunicación en red, geolocalización de trabajadores mediante etiquetas RFID y los dispositivos de alerta temprana, han permitido reducir significativamente los accidentes.



Minería Subterránea Moderna

En casos de emergencia, los trabajadores pueden ser localizados de manera inmediata y los equipos de rescate cuentan con más información que les permite una actuación más rápida y eficaz. Además, la obligación a las empresas por presentar planes de evacuación, de seguridad etc. y llevar a cabo simulacros y ensayos ha contribuido a la reducción de números de accidentes.

Aunque han surgido gran cantidad de avances, la minería sigue enfrentándose a una fuerte carga burocrática de normativas y regulaciones ambientales muy estrictas, reflejando un esfuerzo general por garantizar que la actividad se desarrolle de manera sostenible y con el menor impacto posible.

La implementación de planes de gestión ambiental, el tratamiento de aguas residuales y la rehabilitación de galerías abandonadas, son hoy en día, requisitos indispensables para cualquier proyecto minero antes de su ejecución. Los gobiernos han impuesto normativas estrictas encargadas de obligar a las empresas a llevar a cabo normativas responsables con tal de minimizar el impacto y permitir una convivencia equilibrada con las comunidades cercanas.

Todos estos planes de impacto ambiental no solo buscan una restauración adecuada y asegurarse de que no haya aguas contaminadas, subsidencia etc., sino que también se busca una reducción de emisiones, de residuos y alternativas más limpias para la producción energética.

Es por esto, que el futuro de la minería subterránea se está empezando a encaminar hacia una electrificación total, comenzando por el intercambio progresivo de los motores de combustión interna por vehículos y equipos eléctricos. La eliminación de maquinaria que usa combustible reducirá la contaminación en el interior de la mina, reduciendo el uso de ventilación forzada, lo que significará un ahorro de energía bastante notorio.

El desarrollo de la minería 4.0, donde el IoT, el Big Data y la automatización jugaran un papel crucial, ya que permitirá optimizar aún más los procesos mejorando la eficiencia operativa y logrará que en un futuro no muy lejano, las minas estarán completamente digitalizadas, trabajando de manera remota y con un uso mínimo de mano de obra en zonas de alto riesgo.

En definitiva, aunque la minería ha sido una actividad con mucho riesgo y contaminante, se ha convertido en una industria innovadora y abierta a todos los cambios y mejoras que puedan surgir. Pese a todo aún se enfrenta a grandes desafíos, ya que las situaciones de trabajo no son las más ideales.

Todos los avances tecnológicos han permitido cambiar la percepción de la minería demostrando que se puede ejercer esta de manera segura, eficiente y sostenible, aunque todavía perdure un pensamiento negativo sobre este sector.



12. BIBLIOGRAFIA

1. Junta de Castilla y León. Tecnología minera en León [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.jcyl.es/jcyl/patrimoniocultural/mineriaLeon/tecnologia.html>
2. Empírica Consultores. Etapas de un proyecto minero [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://empiricaconsultores.cl/etapas-de-un-proyecto-minero/>
3. Universidad Politécnica de Madrid. Introducción a la minería. 2ª ed. [Internet]. 2018 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: https://oa.upm.es/63396/1/INTRODUCCION_MINERIA-Edicion2_LM1B1T2_R2-20180110.pdf
4. Promine. Estudios de factibilidad para proyectos mineros [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://promine.com/es/blog-es/estudios-de-factibilidad-para-proyectos-mineros/>
5. Sotecma. Procesamiento de minerales: etapas y equipos [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://sotecma.es/procesamiento-minerales-etapas-equipos/>
6. Oyarzún J. Cierres mineros [Internet]. Universidad Complutense de Madrid; 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.ucm.es/data/cont/media/www/pag-15564/Cierres%20mineros%20-%20Jorge%20Oyarz%C3%BAAn.pdf>
7. Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo. Introducción a la explotación de minas [Internet]. 2018 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: https://www.uaeh.edu.mx/docencia/P_Presentaciones/zimapan/ingenieria_en_procesamiento_de_recursos_minerales/2018/introduccion_a_la_explotacion_de_minas.pdf
8. Instituto Geológico y Minero de España. Minería y restauración del espacio afectado [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: https://info.igme.es/SidPDF/019000/495/19495_0001.pdf
9. Introducción a la minería subterránea. Métodos de explotación de interior [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: https://oa.upm.es/62726/1/METODOS_MINERIA_INTERIOR_LM1B4T4R0-20200406.pdf
10. Repemex. Tecnologías avanzadas en la minería subterránea [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.repemex.com.mx/tecnologias-avanzadas-en-la-mineria-subterranea/>



Minería Subterránea Moderna

11. Tecnología Minera. Conoce las tecnologías avanzadas aplicadas en la minería subterránea [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://tecnologiaminera.com/noticia/conoce-las-tecnologias-avanzadas-aplicadas-en-la-mineria-subterranea-1728080421>
12. Revista Minería. Perforación autónoma: una nueva era tecnológica en la minería de Perú y Chile, revolucionando la eficiencia y seguridad [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.revistamineria.com.pe/tecnico-cientifico/perforacion-autonoma:-una-nueva-era-tecnologica-en-la-mineria-de-peru-y-chile,-revolucionando-la-eficiencia-y-seguridad-en-el-#:~:text=Una%20perforadora%20aut%C3%B3noma%20es%20un,de%20una%20operaci%C3%B3n%20manual%20constante.>
13. Develon CE. Algunos trabajos en los que se usan los cargadores frontales [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://develon-ce.cl/novedades/108 - Algunos-trabajos-en-los-que-se-usan-los-carg.html#:~:text=Los%20cargadores%20frontales%20est%C3%A1n%20preparados,ni ve%20y%20desechos%2C%20entre%20otros.>
14. RealTrac. Soluciones para minería subterránea [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://real-trac.com/es/solutions/underground-mining/>
15. Hexagon. HxGN MineMonitoring: agregación de datos para minería [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://hexagon.com/es/products/productgroups/hxgnminemonitoring/data-aggregation>
16. Sandvik Rock Processing. RD3: Accesorios para rompedoras hidráulicas [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.rockprocessing.sandvik/en/lifecycle-services/breakers-demolitions-tools-and-booms/breaker-accessories/rd3/>
17. UMILES Group. ¿Qué es un dron y para qué sirve? [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://umilesgroup.com/que-es-un-dron-y-para-que-sirve/#¿Que es un dron>
18. Pirodrone. Inspección de subsuelo con dron [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://pirodrone.com/es/inspeccion-de-subsuelo-con-dron/#Inspeccion de subsuelo con dron>
19. Esri. Generar un ortomosaico utilizando el asistente de ortomosaico [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/data/imagery/generate-an-orthomosaics-using-the-orthomosaic-wizard.htm#:~:text=Un%20ortomosaico%20es%20un%20producto,un%20dataset%20de%20mosaico%20continuo>



Laura Valero Sánchez

20. IBM. ¿Qué es un gemelo digital? [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.ibm.com/es-es/topics/what-is-a-digital-twin>
21. Tecnología Minera. Gemelos digitales: parte esencial de la digitalización en el sector minero [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://tecnologiaminera.com/noticia/gemelos-digitales-parte-esencial-de-la-digitalizacion-en-el-sector-minero-1692366539>
22. SGS. ¿Qué es el monitoreo ambiental? [Internet]. 2022 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.sgs.com/es-pe/noticias/2022/12/que-es-monitoreo-ambiental>
23. Geobiental. ¿Qué es la geotecnia? [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.geobiental.com/que-es-la-geotecnia/>
24. Universidad de Oviedo. Caracterización de macizos rocosos [Internet]. 2007 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://digibuo.uniovi.es/dspace/bitstream/handle/10651/62365/2007Caracterizaci%C3%B3nMacizosRocosos.pdf?sequence=1>
25. Senent Domínguez S. Estabilidad de excavaciones subterráneas en macizos rocosos anisótropos mediante el código UDEC [Internet]. Universidad Politécnica de Madrid; 2014 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: https://oa.upm.es/35034/1/Salvador_Senent_Dominguez.pdf
26. Instituto Nacional de Prevención Sísmica. Fallas geológicas [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.argentina.gob.ar/inpres/docentes-y-alumnos/fallas-geologicas#:~:text=Esencialmente%2C%20una%20falla%20es%20una,o%20una%20combinaci%C3%B3n%20de%20ambas.>
27. Geología Estructural. Diaclasas [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.geologiaestructural.com/diaclasas/>
28. Rodríguez A. Estudio de fallas y fracturas en la geología estructural [Internet]. Universidad Nacional del Nordeste; 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://hum.unne.edu.ar/revistas/geoweb/Geo24/archivos/alberto24.pdf>
29. Universidad de Cantabria. Tema 2.1: Presiones en la geotecnia [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://ocw.unican.es/pluginfile.php/2899/course/section/2824/TEMA%202.1.%20Presiones.pdf>
30. Rodríguez R. Drenaje y gestión del agua de mina [Internet]. Universidad Politécnica de Madrid; 2019 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en:



Minería Subterránea Moderna

https://oa.upm.es/70252/3/DRENAJE_Y_GESTION_DEL_AGUA_DE_MINA_LM2B5T2_R0-20190424.pdf

31. Fernández Díaz E. Mecánica de rocas [Internet]. Universidad Politécnica de Madrid; 2015 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en:

https://oa.upm.es/14183/1/MECANICA_DE_ROCAS_1.pdf

32. Agencia Nacional de Minería. Guía de seguridad para el sostenimiento en minería subterránea [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en:

https://www.anm.gov.co/sites/default/files/guia_de_seguridad_para_sostenimiento.pdf

33. Onix Underground. La importancia del perno expansivo en minería subterránea y construcción de túneles [Internet]. 2024 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en:

<https://www.onixunderground.com/es/2024/01/23/la-importancia-del-perno-expansivo-en-mineria-subterranea-y-construccion-de-tuneles/#:~:text=En%20resumen%2C%20el%20perno%20expansivo,una%20enorme%20capacidad%20de%20carga.>

34. Bison. ¿Qué son los anclajes de resina química y cómo se utilizan? [Internet]. 2023

[citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.bisonuk.com/news/what-are-chemical-resin-anchors-and-how-do-i-use-them/>

35. Estructuras Metálicas Colombia. Consideraciones al instalar la malla metálica expandida [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en:

<https://www.estructurasmetalicascolombia.com/mallas-y-cerramientos-en-bogota-colombia/mallas-metalicas/malla-metalica-expandida/consideraciones-al-instalar-la-malla-metalica-expandida>

36. Sika. Manual de hormigón proyectado [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5].

Disponible en: <https://arg.sika.com/dms/getdocument.get/0e89ae0f-f95d-3009-8e44-59d6d655b8e6/ManualHormig%C3%B3nProyectado.pdf>

37. Victory Epes. Hormigón proyectado por vía seca [Internet]. 2024 [citado 2025 Feb

5]. Disponible en: <https://victoryepes.blogs.upv.es/2024/09/04/hormigon-proyectado-por-via-seca/>

38. International Tunnelling and Underground Space Association. Excavación

convencional [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://tunnel.ita-aites.org/es/how-to-go-underground/construction-methods/conventional-tunnelling>

39. MyPhor. Grandes obras de túneles y métodos de excavación I [Internet]. 2023

[citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.myphor.com/grandes-obras-de-tuneles-y-metodos-de-excavacion-i/>



Laura Valero Sánchez

- 40.** Ferrovial. Máquina tuneladora [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.ferrovial.com/es/stem/tuneladora/#:~:text=Una%20m%C3%A1quina%20tuneladora%2C%20generalmente%2C%20realiza,estar%20fabricados%20de%20diferentes%20materiales.>
- 41.** Agencia Nacional de Minería. Folleto de minería: ventilación [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/folleto_mineria_ventilacion.pdf
- 42.** Soler & Palau. Aplicación de la ventilación en la minería subterránea [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: [[https://www.solerpalau.com/es-es/blog/aplicacion-de-la-ventilacion-en-la-mineria-subterranea/#:~:text=De%20forma%20gen%C3%A9rica%20\(porque%20en,01%20%25%20restante%20de%20otros%20gases\)](https://www.solerpalau.com/es-es/blog/aplicacion-de-la-ventilacion-en-la-mineria-subterranea/#:~:text=De%20forma%20gen%C3%A9rica%20(porque%20en,01%20%25%20restante%20de%20otros%20gases)(https://www.solerpalau.com/es-es/blog/aplicacion-de-la-ventilacion-en-la-mineria-subterranea/#:~:text=De%20forma%20gen%C3%A9rica%20(porque%20en,01%20%25%20restante%20de%20otros%20gases))]([https://www.solerpalau.com/es-es/blog/aplicacion-de-la-ventilacion-en-la-mineria-subterranea/#:~:text=De%20forma%20gen%C3%A9rica%20\(porque%20en,01%20%25%20restante%20de%20otros%20gases\)](https://www.solerpalau.com/es-es/blog/aplicacion-de-la-ventilacion-en-la-mineria-subterranea/#:~:text=De%20forma%20gen%C3%A9rica%20(porque%20en,01%20%25%20restante%20de%20otros%20gases)))
- 43.** Induambiente. Ventilación subterránea [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.induambiente.com/informe-tecnico/climatizacion/ventilacion-subterra>
- 44.** Agencia Nacional de Minería. Folleto de minería: ventilación [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: https://www.anm.gov.co/sites/default/files/folleto_mineria_ventilacion.pdf
- 45.** Macinser. Axiales mineros [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.macinser.com.pe/axiales-mineros>
- 46.** López S. Estudio sobre la ventilación en minería subterránea [Internet]. Universidad de La Coruña; 2019 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://ruc.udc.es/dspace/bitstream/handle/2183/6137/CA-18-19.pdf?isAllowed=y&sequence=1>
- 47.** Universidad de Chile. Manual de eficiencia energética para minería [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/139884/Manual-de-eficiencia-energetica-para-mineria.pdf?sequence=1>
- 48.** Induambiente. Luces para las mineras [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.induambiente.com/especial/energia/luces-para-las-mineras>
- 49.** Cóndorchem. Tratamiento de aguas residuales en la industria minera [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en:



Minería Subterránea Moderna

https://condorchem.com/es/blog/tratamiento-aguas-residuales-industria-minera/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_campaign=20189498542&utm_content=161613441298&utm_term=&gad_source=1&gclid=CjwKCAiA74G9BhAEEiwA8kNfpaMI3XJ4hSPRUQcVLgfbOngpdn1dn8xtH0Auz6JbVFtbsBf_jHFrXxoCf3UQAvD_BwE

50. Asociación Española de Áridos. Un enfoque geomorfológico para las restauraciones mineras [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en:

<https://www.aridos.org/un-enfoque-geomorfologico-para-las-restauraciones-mineras/>

51. GEMM. Geofluv: Geomorfología fluvial [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5].

Disponible en:

https://www.aulados.net/GEMM/Documentos/Geofluv/Geofluv_GEMM.pdf

52. Sirenas Electrónicas. Riesgos en la minería y cómo minimizarlos [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.sirenaselectronicas.com/riesgos-en-la-mineria-y-como-minimizarlos/>

53. Universidad Politécnica de Madrid. Seguridad y salud en minería [Internet]. 2009 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en:

https://oa.upm.es/10673/8/SEGURIDAD_Y_SALUD_EN_MINERIA_080509_2.pdf

54. Tecnología Minera. Cómo diseñar un sistema de detección de riesgos potenciales en minería subterránea [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en:

<https://tecnologiaminera.com/noticia/como-disenar-un-sistema-de-deteccion-de-riesgos-potenciales-en-mineria-subterranea-1728943238>

55. HSE Software. Planes de emergencias en la industria minera: la comunicación es clave [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en:

<https://hse.software/2023/08/25/planes-de-emergencias-en-la-industria-minera-la-comunicacion-es-clave/#:~:text=Procedimientos%20y%20medidas%20a%20seguir,desastres%20en%20as%20operaciones%20mineras.>

56. QF2. Formación en seguridad para empresas mineras [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://qf2.es/formacon-seguridad-empresas-mineras/>

57. Xepelin. ¿Qué son los costos operativos? Ejemplos [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://xepelin.com/blog/educacion-financiera/que-son-costos-operativos-ejemplos>

58. Slideshare. Costos unitarios en la minería subterránea [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://es.slideshare.net/slideshow/costos-unitarios-en-la-mineria-subterranea/266983547>



Laura Valero Sánchez

- 59.** Asociación para el Progreso de la Dirección. Lean Six Sigma: ¿cómo funciona? [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.apd.es/lean-six-sigma-como-funciona/>
- 60.** Fractal. ¿Qué es el TPM (Mantenimiento Productivo Total) y cómo implementarlo? [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]. Disponible en: <https://www.fractal.com/es/guias-mantenimiento/que-es-el-tpm-mantenimiento-productivo-total-y-como-implementarlo>
- 61.** Pensemos. Indicadores de gestión: tipos y ejemplos [Internet]. 2023 [citado 2025 Feb 5]