



UNIVERSIDAD TECNICA
FEDERICO SANTA MARIA

Departamento de Obras Civiles

HANDBOOK DE GEOMECÁNICA PARA LA PEQUEÑA MINERÍA Y LA MINERÍA ARTESANAL DE CHILE

Memoria de Título presentada por

GABRIELA IGNACIA BARBOSA QUEZADA

como requisito parcial para optar al título de la carrera de

INGENIERÍA CIVIL

Profesor Guía
Matías Felipe Silva Illanes

Febrero de 2021



UNIVERSIDAD TÉCNICA
FEDERICO SANTA MARÍA

TÍTULO DE LA TESIS:

**HANDBOOK DE GEOMECÁNICA PARA LA PEQUEÑA MINERÍA Y LA
MINERÍA ARTESANAL DE CHILE**

AUTORA:

GABRIELA IGNACIA BARBOSA QUEZADA

TRABAJO DE MEMORIA, presentado como requisito parcial para optar al título de la carrera de INGENIERÍA CIVIL de la Universidad Técnica Federico Santa María.

Matías Silva Illanes

Gonzalo Suazo Fuentealba

Jorge Cortez Campaña

Cristian Soto Pérez

Valparaíso, Chile, Febrero de 2021

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Marcela y Alberto, por su amor incondicional y estar presentes en todo momento. Por ser mis pilares fundamentales, y darme todo lo necesario (y más) para poder realizar mis estudios y finalizarlos exitosamente. A mis hermanas y hermano, Camila, Loreta y Ricardo, por acompañarme, alegrarme, y brindarme una mano siempre que lo necesito. A Rosi, por acompañarme desde que tengo memoria y darme siempre tanto amor. A todos mis familiares que han estado presentes a lo largo de este camino y me han brindado su apoyo.

A todas y todos quienes me han acompañado desde mi etapa escolar, han sido largos años de amistad y espero que perduren en el tiempo. A quienes tuve la fortuna de conocer en la Universidad como compañeras(os) de carrera, y en otras actividades como PPI, Centro de Alumnos, Jornada de Inserción Mechona y AMIN. Estoy muy feliz por haberles conocido, les agradezco enormemente por hacer de esta etapa una tan entretenida e inolvidable, por enseñarme y ayudarme a convertirme en quien soy hoy. Nunca olvidaré las clases en el M con el profe Szántó, las reuniones en la salita del LEMCO, las “Semanas Previas”, almuerzos, carretes, fiestas de año nuevo, y el gran viaje a Lago Ranco. Solo espero que nos volvamos a encontrar pronto para revivir tan lindos momentos.

A mi profesor guía, Matías Silva, por darme la oportunidad de ser su ayudante y alumna memorista. Gracias por creer y confiar en mí, por motivarme a seguir el área geotécnica desde sus clases de Mecánica de Suelos II, y por ser un excelente profesor. También agradezco a la Sociedad Chilena de Mecánica de Rocas y SERNAGEOMIN por permitirme participar del proyecto del Handbook.

A mis profesores de enseñanza básica y media, Carlos Lanata, Enrique Valle y Christian Rojas, por enseñarme el mundo de la física y las matemáticas, y alentarme a seguir este camino.

A todas las mujeres que se han encantado con el mundo STEM, que han abierto las puertas a nuevas generaciones de mujeres como yo, y que se han convertido en grandes referentes. A todas las niñas que les gusta la ciencia y que les gustaría emprender este emocionante y desafiante viaje. Espero poder guiarlas, apoyarlas y motivarlas.

“Que nunca te limite la imaginación limitada de los demás”

- Mae Jemison.

ÍNDICE DE CONTENIDO

Resumen.....	7
1 Introducción	7
2 Objetivos	8
2.1 Objetivos Generales	8
2.2 Objetivos Específicos	8
3 Metodología	9
4 Estado del Arte	10
4.1 La Industria Minera Chilena	10
4.1.1 Producción Minera	10
4.1.2 Institucionalidad de la Minería en Chile	12
4.1.3 Categorías de Empresas Mineras	13
4.1.4 Seguridad Minera y Fiscalización.....	14
4.2 Antecedentes nacionales	16
4.3 Revisión de guías internacionales	16
5 Aspectos relevantes de la Mecánica de Rocas.....	19
5.1 El Macizo Rocoso	19
5.2 Caracterización del Macizo Rocoso	20
5.2.1 Criterio de Barton (1974)	20
5.2.2 Criterio de Bieniawski (1989)	20
5.3 Factores geológicos determinantes	21
6 Operaciones Unitarias y Auxiliares en la Pequeña Minería y la Minería Artesanal	22
6.1 Perforación	22
6.2 Tronadura	23
6.3 Carguío y Transporte	23
6.4 Ventilación.....	24
6.5 Acuñadura	25
6.6 Fortificación.....	25
7 Procesamiento de Imágenes de visitas a terreno	26
8 Propuestas y Recomendaciones.....	28
8.1 Propuesta de Metodología de Evaluación del Macizo Rocoso	28
8.2 Propuesta de contenidos para el <i>Handbook</i>	30
8.3 Propuesta para etapa de masificación del <i>Handbook</i>	31
9 Conclusiones.....	32
10 Referencias	33

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Metodología para el desarrollo de la Memoria.	10
Figura 2. Evolución del PIB nacional desde 2006 a 2019. Adaptado de SERNAGEOMIN, 2020.	12
Figura 3. Organigrama de la institucionalidad minera en Chile.	12
Figura 4. Distrito Collahuasi. Fuente: Collahuasi, 2021.	13
Figura 5. División Chuquicamata. Fuente: El Referente, 2019.	14
Figura 6. Cantidad de accidentes y trabajadores fallecidos en la minería chilena en el periodo 2000 – 2020. Adaptado de SERNAGEOMIN, 2020.	15
Figura 7. Porcentaje de trabajadores fallecidos por categoría en el periodo 2000 – 2020. Fuente: SERNAGEOMIN, 2020.	15
Figura 8. Número de trabajadores fallecidos por tipo de accidente en el periodo 2000 – 2020. Fuente: SERNAGEOMIN, 2020.	15
Figura 9. Macizo rocoso de arenisca. Fuente: G. de Vallejo et al., 2004.	19
Figura 10. Rumbo y buzamiento. Fuente: SNMPE, 2004.	19
Figura 11. Excavaciones estables e inestables. Fuente: SNMPE, 2004.	21
Figura 12. Equipo “Track Drill”. Fuente: Rumbo Minero, 2020.	22
Figura 13. Transporte vertical con Huinche. Fuente: SERNAGEOMIN, 2013.	24
Figura 14. Transporte con Huinche. Fuente: SERNAGEOMIN, 2013.	27
Figura 15. Polvorín de tipo gallinero. Cortesía de Jorge Cortez, ULS.	27
Figura 16. Transporte en mina subterránea. Cortesía de Jorge Cortez, ULS.	27
Figura 17. Taludes subverticales. Cortesía de Jorge Cortez, ULS.	28
Figura 18. Portal sin fortificación. Cortesía de Jorge Cortez, ULS.	28

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de la producción nacional y mundial de minerales metálicos en 2019. Adaptado de SERNAGEOMIN, 2020.	10
Tabla 2. Comparación de la producción nacional y mundial de minerales no metálicos en 2019. Adaptado de SERNAGEOMIN, 2020.	11
Tabla 3. Recursos energéticos producidos en Chile durante 2019. Adaptado de SERNAGEOMIN, 2020.	11
Tabla 4. Resumen de la producción minera metálica por categoría y producto. Adaptado de SERNAGEOMIN, 2020.	11
Tabla 5. Categorías de Empresas Mineras. Adaptado de SERNAGEOMIN, 2020.	13
Tabla 6. Debilidades y fortalezas de la Pequeña Minería y la Minería Artesanal en Chile. Adaptado de H. Hernández, 2020.	14
Tabla 7. Resumen de la revisión de documentos nacionales.	17
Tabla 8. Resumen de la revisión de guías internacionales.	18
Tabla 9. Valoraciones por parámetro para obtención de RMR.	21
Tabla 10. Factores de riesgo en la operación de Perforación.	23
Tabla 11. Factores de riesgo en la operación de Tronadura.	23
Tabla 12. Factores de riesgo en la operación de Carguío y Transporte.	24
Tabla 13. Factores de riesgo en la operación de Ventilación.	24
Tabla 14. Factores de riesgo en la operación de Acuñaadura.	25
Tabla 15. Factores de riesgo en la operación de Fortificación.	25
Tabla 16. Comentarios sobre fotografías de minas de la Región de Coquimbo.	27
Tabla 17. Cuadro para la propuesta de Metodología de Evaluación del Macizo Rocoso.	29

HANDBOOK DE GEOMECÁNICA PARA LA PEQUEÑA MINERÍA Y LA MINERÍA ARTESANAL DE CHILE

G. Barbosa ¹, M. Silva²

¹ Universidad Técnica Federico Santa María, Campus Casa Central, Valparaíso, Chile.

² Universidad Técnica Federico Santa María, Campus San Joaquín, Santiago, Chile.

Resumen

En Chile, la industria minera es la actividad económica más importante debido a la gran variedad de minerales y recursos energéticos presentes en la corteza terrestre. Consecuentemente, la minería genera una amplia oferta de trabajos y es el sustento de muchas familias, destacando el caso de aquellas relacionadas a la Pequeña Minería y Minería Artesanal. Estas categorías generan un aporte productivo mínimo al país, pero son un motor de crecimiento y desarrollo social para zonas en las que la minería es la única forma de subsistir. Pero, debido a que los pirquineros cuentan con un bajo nivel de competencias en Geomecánica, y que prácticamente no tienen acceso a mejores tecnologías, la ocurrencia de accidentes es frecuente considerando que en general la tendencia de la accidentabilidad minera es a la disminución. En este segmento de empresa, el tipo de accidente más habitual es el provocado por las caídas de bloques de roca, y que ha sido tipificado por SERNAGEOMIN como “Golpeado por roca”. De esta forma, la presente memoria de titulación se enmarca en un acuerdo colaborativo del SERNAGEOMIN y la Sociedad Chilena de Mecánica de Rocas, para apoyar en el desarrollo de un *Handbook* de Geomecánica que tiene como objetivo principal disminuir la accidentabilidad relacionada a rocas en la Pequeña Minería y la Minería Artesanal. Como resultados de este trabajo se entrega una nueva metodología cualitativa de evaluación del macizo rocoso, una propuesta de contenidos para la Guía y los fundamentos de un plan para la masificación de esta.

Palabras claves: *Pequeña Minería, Minería Artesanal, Accidentabilidad Minera, Geomecánica.*

1 Introducción

La minería es una de las actividades económicas más importantes a nivel mundial, centrada esencialmente en la explotación, procesamiento y comercialización de minerales metálicos, minerales no metálicos o rocas y minerales industriales (RMI), y recursos energéticos. Esta actividad se desarrolla permanentemente en continentes como América y Asia, destacándose en la producción de minerales y/o rocas países como Estados Unidos, Canadá, Perú, Chile, China y Rusia (SERNAGEOMIN, 2019).

Considerando la extracción de minerales metálicos, en 2019 Chile fue reconocido como el primer productor de cobre a nivel mundial y segundo en molibdeno, mientras que, en el área de rocas y minerales industriales, fue destacado en el primer lugar de la producción de yodo y segundo de litio. Durante el mismo año, la participación de la minería en el PIB nacional alcanzó un 9,4%, donde el 8,4% correspondió netamente al aporte de la minería del cobre.

Así, esta industria es uno de los principales sustentos en cuanto al crecimiento económico y el desarrollo sustentable del país. En este sentido, el Ministerio de Minería es la institución encargada de diseñar, ejecutar y evaluar políticas de minería, orientadas a elevar y difundir la contribución del sector minero al desarrollo nacional. En tanto, el Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN, asesor del Ministerio de Minería, es el organismo técnico descentralizado responsable de generar, mantener y difundir información de geología básica y de recursos y peligros geológicos del territorio nacional, y de regular y fiscalizar el cumplimiento de normativas mineras en materia de seguridad, propiedad y planes de cierre, para contribuir al desarrollo de la minería nacional.

El Servicio clasifica a las empresas mineras según la cantidad de horas persona (H.P.) trabajadas anualmente en Minería Artesanal (menos de 30.000 H.P.), Pequeña Minería (30.000 – 200.000 H.P.), Mediana Minería (200.000 – 1M H.P.) y Gran Minería (más de 1M H.P.). De la producción total de minerales metálicos de 2019, las dos categorías más pequeñas representaron menos de un 1% (SERNAGEOMIN, 2019), sin embargo, en los últimos 20 años se han visto considerablemente afectadas en lo relativo a accidentabilidad.

En el periodo 2000 – 2020 se ha observado una tendencia a la disminución en el número de accidentes fatales y los fallecimientos, habiéndose registrado 10 accidentes y 14 fallecidos en 2019, versus 29 accidentes y 36 fallecidos en 2000. Pero, si se estudia el porcentaje de trabajadores fallecidos por categoría de empresa en el mismo periodo, se observa que el 50% de los fallecimientos se han producido en los sectores de la Pequeña Minería y la Minería Artesanal, y que estas cifras son aún más preocupantes debido a que la cantidad de trabajadores en estas categorías es mucho menor a las de las grandes mineras (Gran Minería y Mediana Minería). Además, si se analizan las mismas estadísticas bajo el criterio del tipo de accidente, se visualiza que el más frecuente es el tipificado como “Golpeado por roca” alcanzando un total de 181 registros de un total de 572 accidentes, y que, de estos 181 accidentes, 137 son situaciones ocurridas en la Pequeña Minería y la Minería Artesanal.

De esta forma, el SERNAGEOMIN, responsable de mejorar la seguridad de los trabajadores y disminuir la accidentabilidad a través de la mejora de la fiscalización y de generar competencias en seguridad minera para el desarrollo de una actividad segura, y la Sociedad Chilena de Mecánica de Rocas (SCMR), a cargo de establecer una dinámica de construcción permanente y colectiva de conocimientos en mecánica de rocas, han decidido colaborar conjuntamente para elaborar una Guía de Geomecánica (*Handbook*) la cual tiene por objetivo principal disminuir la accidentabilidad relacionada a rocas en los pequeños sectores de la minería chilena.

Luego, la presente memoria de titulación se enmarca en dicho acuerdo colaborativo, que pretende apoyar en aspectos técnicos a los trabajadores de la Pequeña Minería y la Minería Artesanal, así como otorgar herramientas simples que les permitan desarrollar más habilidades y competencias en el área de mecánica de rocas y, como consecuencia, disminuir los accidentes del tipo “Golpeado por roca” en el sector bajo estudio.

2 Objetivos

2.1 Objetivos Generales

- I. El objetivo principal de la Memoria corresponde a contribuir en el desarrollo del *Handbook* de Geomecánica para la Pequeña Minería y la Minería Artesanal de Chile, con el fin de disminuir la accidentabilidad y fallecimientos asociados a accidentes del tipo “Golpeado por Roca” en las categorías mencionadas.
- II. Complementar los documentos nacionales oficiales que el SERNAGEOMIN emplea actualmente para los procesos de fiscalización de faenas, tales como el Reglamento de Seguridad Minera (Decreto N° 132) y las Guías de Operación del Título XV del Reglamento de Seguridad Minera, desarrolladas específicamente para el sector de la Pequeña Minería.
- III. Apoyar el desarrollo profesional de los pequeños mineros, elevando su nivel de competencias en el área de mecánica de rocas, a través de la entrega de una metodología simple de evaluación del macizo rocoso, adecuada a sus condiciones y escala de trabajo.

2.2 Objetivos Específicos

- I. Caracterizar la situación actual de la industria minera chilena, enfatizando en la Pequeña Minería y la Minería Artesanal de Chile.

- II. Establecer las operaciones, unitarias o auxiliares, críticas de la Pequeña Minería y la Minería Artesanal de Chile, y sus factores de riesgo respectivos.
- III. Proporcionar una propuesta preliminar de contenidos para el *Handbook*.
- IV. Contrastar la información teórica de las operaciones con imágenes reales tomadas en visitas a minas del norte de Chile.
- V. Identificar factores geomecánicos relevantes para la elaboración de la metodología de evaluación del macizo rocoso.
- VI. Desarrollar una metodología simple de evaluación del macizo rocoso susceptible de aplicar por los pequeños mineros en sus respectivas minas.
- VII. Entregar la propuesta final de contenidos para el *Handbook*.

3 Metodología

Para el desarrollo de los objetivos establecidos, se ha dividido el plan de trabajo de la memoria en cuatro etapas, donde cada una contribuye al cumplimiento de ciertos objetivos específicos. A continuación, se detalla cada etapa y sus objetivos respectivos.

- Etapa 1: Estado del Arte de la Industria Minera Chilena (Objetivo Específico I)

Definición del estado actual de la minería chilena, destacando las categorías de interés, mediante revisión bibliográfica y entrevistas. Se contempla el análisis de la producción, institucionalidad, categorías de empresa, seguridad y fiscalización, antecedentes nacionales e internacionales, y de los aspectos geomecánicos más importantes relacionados al tipo de accidente bajo estudio.

- Etapa 2: Identificación de las Operaciones Unitarias y Auxiliares Críticas (Objetivos Específicos II y III)

Estudio de las operaciones unitarias y auxiliares de las pequeñas categorías e identificación de las operaciones críticas basándose en los factores de riesgo evidenciados en cada una, mediante revisión bibliográfica y entrevistas. La denominación “crítica” se otorga a aquellas operaciones donde se evidencie una relación más estrecha con los accidentes del tipo “Golpeado por roca” y que además tengan una alta tasa de ocurrencia. Asimismo, se presenta una propuesta preliminar de contenidos para el *Handbook*.

- Etapa 3: Procesamiento de Imágenes en Terreno (Objetivos Específicos IV y V)

Análisis de fotografías de visitas a faenas de la IV Región de Coquimbo, efectuadas por la Universidad de La Serena, que permiten evidenciar o refutar la información analizada en la etapa anterior respecto de la realidad de las pequeñas mineras. Con ello, se identifican factores geomecánicos, que puedan ser fácilmente observados en terreno por los pequeños mineros, útiles en el desarrollo de la metodología de evaluación del macizo rocoso en la Etapa 4.

- Etapa 4: Propuesta de Recomendaciones (Objetivos Específicos VI y VII)

Generación de una metodología simple para evaluar la calidad del macizo e identificación de zonas peligrosas *in situ*, considerando los factores propuestos en la Etapa 3, y las condiciones de trabajo de las pequeñas categorías. Conjuntamente, se hace entrega de la propuesta final de contenidos para el *Handbook*.

En la **Figura 1** se presenta el diagrama de la metodología propuesta para el desarrollo de la presente memoria y las actividades correspondientes a cada etapa. Además, se incluyen las herramientas que ayudan a cumplir con cada una de las actividades, donde RB corresponde a revisión bibliográfica; EaE, entrevistas a expertos; AdR, análisis de resultados y EdC, elaboración de conclusiones.

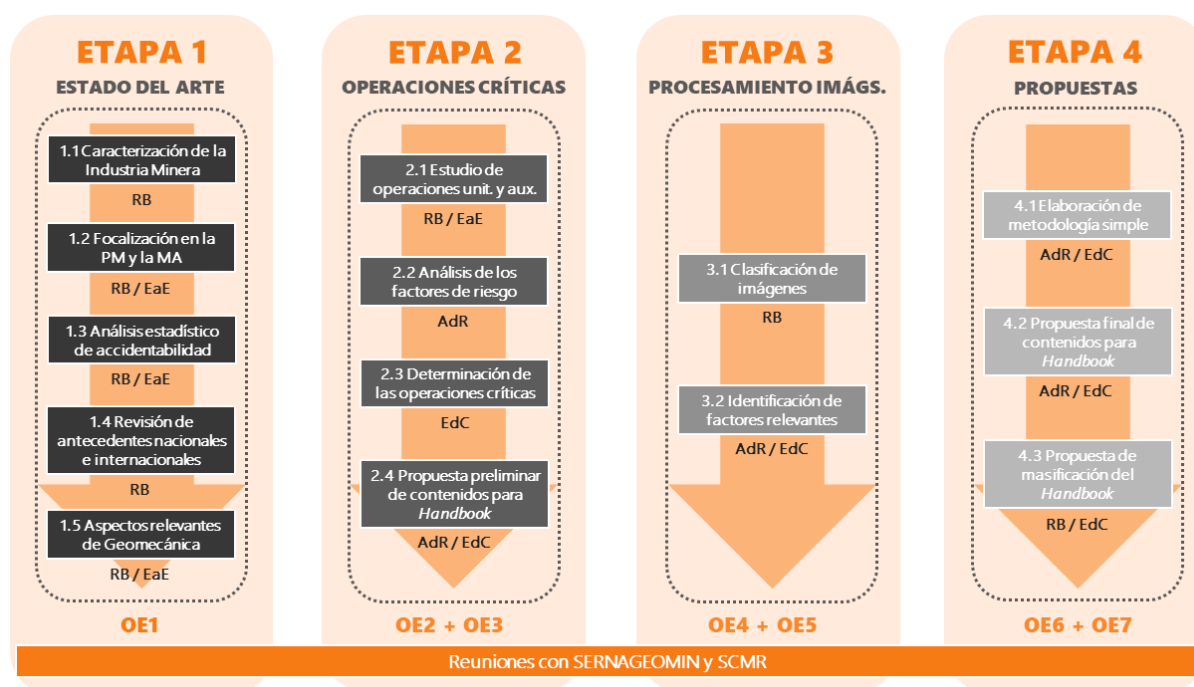


Figura 1. Metodología para el desarrollo de la Memoria.

4 Estado del Arte

4.1 La Industria Minera Chilena

4.1.1 Producción Minera

Chile produce en la actualidad siete minerales metálicos, ocupando el primer lugar a nivel mundial en la producción de cobre (Cu) y segundo en molibdeno (Mo). Solo en 2019 produjo 5.822.050 toneladas métricas de cobre, lo cual equivale al 28,4% de la producción total mundial, y se tradujo en un aporte del 8,4% al PIB nacional (SERNAGEOMIN, 2020).

Los minerales metálicos son cualquier concentración natural de algún elemento o compuesto metálico contenido en la corteza terrestre, con potencial para ser explotado para la obtención de minerales. Además de cobre y molibdeno, en la categoría de minerales metálicos, la industria mineral nacional produce plata (Ag), oro (Au), hierro (Fe), plomo (Pb) y cinc (Zn). En la **Tabla 1** se indica el detalle de la producción de dichos minerales a nivel nacional y mundial en 2019.

Tabla 1. Comparación de la producción nacional y mundial de minerales metálicos en 2019.
Adaptado de SERNAGEOMIN, 2020.

Mineral Metálico	Producción Mundial 2019	Producción Nacional 2019	Participación en la Producción Mundial [%]
Cobre [tm x 1.000]	20.532	5.822	28,4
Molibdeno [tm]	291.441	53.541	18,4
Oro [tm]	3.325	38	1,1
Plata [tm]	27.189	1.309	4,8
Hierro [tm x 1.000.000]	4069,4*	21,5*	0,5
Plomo [tm x 1.000]	4.500	0,0	0,0
Cinc [tm x 1.000]	12.756	6	0,0

*Nota: Considerando el mineral utilizable y el hierro contenido.

Los minerales no metálicos, o rocas y minerales industriales, corresponden a una amplia gama de minerales, rocas y sedimentos, y también algunos materiales sintéticos, utilizados como materia prima o aditivos en la elaboración de insumos y productos finales con valor agregado. Actualmente, Chile produce 20 rocas y minerales industriales, situándose en el primer lugar a nivel mundial en la producción de yodo (I), y en el segundo de compuestos de litio (Li).

En la **Tabla 2** se presenta la comparación entre la producción nacional y mundial de 10 rocas y minerales industriales que se producen en Chile.

Tabla 2. Comparación de la producción nacional y mundial de minerales no metálicos en 2019. Adaptado de SERNAGEOMIN, 2020.

Mineral No Metálico	Producción Mundial 2019	Producción Nacional 2019	Participación en la Producción Mundial [%]
Litio [tm]	80.131	20.931	26,1
Potasa [tm x 1.000]	41.061	681	1,7
Boro [tm x 1.000]	<i>n.d.*</i>	352*	<i>n.d.*</i>
Nitrógeno [tm x 1.000]	145.421	121	0,1
Yodo [tm]	30.676	20.826	67,9
Sal [tm x 1.000]	294.847	10.477	3,6
Cal [tm x 1.000]	426.600	1.400	0,6
Pumicita [tm x 1.000]	18.000	681	3,8
Silicio [tm x 1.000]	7.195	169	2,3
Azufre [tm x 1.000]	78.671	1.261	1,6

*Nota: n.d.: no determinable. Países producen compuestos diferentes no sumables. Chile produce ulexita.

En cuanto a la producción de recursos energéticos, hasta 2019 se tienen registros de extracción de carbón, petróleo y gas natural. Los recursos energéticos son todas las sustancias de las cuales es posible obtener energía: combustibles fósiles y nucleares, calor terrestre y solar, corrientes, entre otros. En la **Tabla 3** se detalla la producción de esta categoría durante 2019.

Tabla 3. Recursos energéticos producidos en Chile durante 2019. Adaptado de SERNAGEOMIN, 2020.

Recurso Energético	Producción Nacional 2019
Carbón [t]	1.606.554
Petróleo [t]	179.465
Gas Natural [m³ x 1.000]	1.338.696

Para dimensionar el aporte que realizan las distintas categorías de empresas mineras, en la **Tabla 4** se presenta el resumen de la producción de minería no metálica según este criterio, y según producto, durante 2019. A partir de esta información, se concluye que la mayor contribución a los totales es realizada por las grandes y medianas empresas mineras, y que las pequeñas empresas solo aportan a tres de los siete minerales metálicos que actualmente se producen en Chile.

Tabla 4. Resumen de la producción minera metálica por categoría y producto. Adaptado de SERNAGEOMIN, 2020.

Mineral Metálico	Total	Grandes	Medianas	Pequeñas
Cobre [tmf]	5.822.050	5.623.712 (96,6%)	147.603 (2,5%)	50.735 (0,9%)
Molibdeno [tmf]	53.541	53.541	-	-
Oro [kg]	38.455	32.485 (84,48%)	4.369 (11,36%)	1.601 (4,16%)
Plata [kg]	1.309.321	1.239.740 (94,69%)	59.469 (4,54%)	10.112 (0,77%)
Hierro [tmf]	8.427.224	4.648.928 (55,17%)	3.778.296 (44,83%)	-
Plomo [tmf]	7	-	7	-
Cinc [tmf]	5.620	5.614 (99,89%)	6 (0,11%)	-

Finalmente, respecto al aporte al Producto Interno Bruto (PIB) nacional, los datos desde 2006 a 2019 permiten evidenciar la importante participación de la minería en el índice económico, siendo siempre mayor al 8%. De esta forma, la minería es considerada como un agente macroeconómico de dinamización de la economía y la producción, debido a que el aporte al valor del PIB supera el 6% en un periodo mayor a 10 años, tal como se indica en la **Figura 2**.

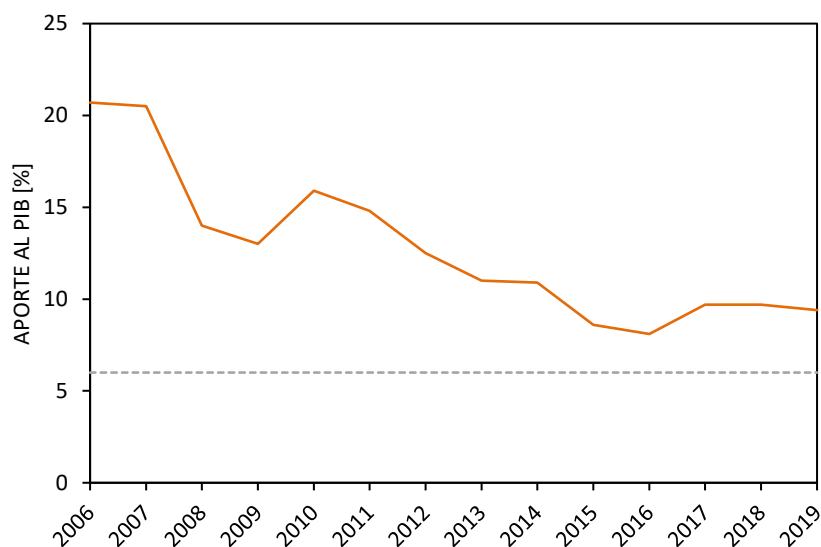


Figura 2. Evolución del PIB nacional desde 2006 a 2019. Adaptado de SERNAGEOMIN, 2020.

4.1.2 Institucionalidad de la Minería en Chile

En la **Figura 3** se presenta el organigrama donde se detalla la relación entre las instituciones mineras chilenas, siendo el Ministerio de Minería el actor principal.

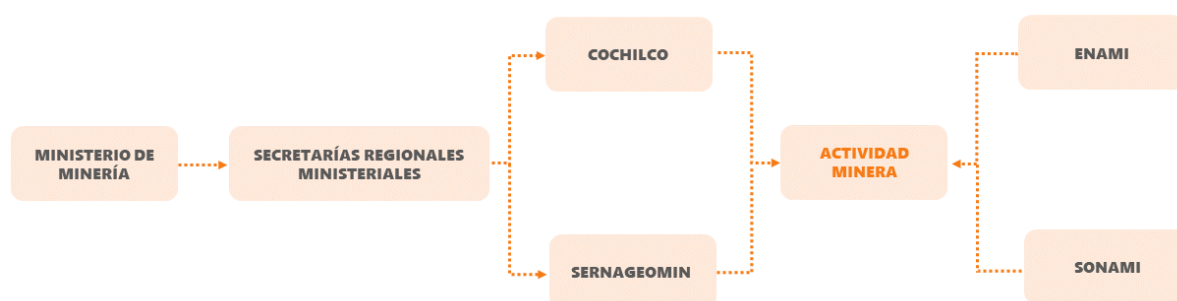


Figura 3. Organigrama de la institucionalidad minera en Chile.

El Ministerio de Minería es la institución gubernamental encargada de diseñar, ejecutar y evaluar políticas de minería, orientadas a elevar y difundir la contribución del sector minero al desarrollo nacional. Dentro de los objetivos estratégicos del Ministerio se encuentran: posicionar al sector minero como un motor de recuperación del crecimiento y generación de empleo, desarrollar una minería más sustentable ambientalmente e inclusiva socialmente, y modernizar y fortalecer la institucionalidad minera (Ministerio de Minería, 2020).

El Servicio Nacional de Geología y Minería, SERNAGEOMIN, es el organismo técnico responsable de asesorar al Ministerio de Minería en asuntos relacionados a la geología y minería. Sus tareas son generar, mantener y difundir información de geología básica y de recursos y peligros geológicos del territorio nacional, regular y fiscalizar el cumplimiento de normativas mineras en materia de seguridad, propiedad y planes de cierre, contribuyendo al desarrollo de la minería nacional. Algunos de sus

objetivos estratégicos corresponden a mejorar la acción fiscalizadora en seguridad minera, mejorar el proceso de revisión de proyectos mineros, generar competencias en materias de seguridad minera y asistir técnicamente a concesiones o autoridades (SERNAGEOMIN, 2020).

La Comisión Chilena del Cobre, COCHILCO, es un organismo técnico especializado que asesora al Gobierno de Chile en materias relacionadas con la producción de cobre y sus subproductos, además de todas las sustancias minerales metálicas y no metálicas, exceptuando el carbón y los hidrocarburos. También apoya en la elaboración, implementación y evaluación de políticas, estrategias y acciones que contribuyen al desarrollo sustentable del sector minero nacional y a fortalecer el aporte a la economía. Por otra parte, resguarda los intereses del Estado en sus empresas mineras, mediante la fiscalización y evaluación de la gestión e inversiones de estas (COCHILCO, 2020).

La Empresa Nacional de Minería, ENAMI, es una empresa estatal que contribuye al fomento de la pequeña y mediana minería, creando condiciones efectivas para el desarrollo sustentable del sector y asegurando la extracción de riquezas mineras económicamente viables a pequeña y mediana escala. La empresa busca potenciar el alcance de la actividad minera, diversificando la cartera productiva e identificando oportunidades de negocios y manteniendo un equilibrio financiero (ENAMI, 2020).

La Sociedad Nacional de Minería, SONAMI, es la institución gremial que representa a la actividad minera de gran, mediana y pequeña escala, metálica y no metálica, y que tiene por objetivo impulsar y fomentar el desarrollo productivo y el perfeccionamiento institucional y legal de la minería chilena, para construir mejores realidades para Chile.

4.1.3 Categorías de Empresas Mineras

En Chile existen diversas clasificaciones de las categorías mineras según la institución minera. Para efectos de esta memoria, se emplearán las definiciones elaboradas por el SERNAGEOMIN, las cuales se basan en la cantidad de trabajadores/as en faenas mineras y sus horas persona (H.P.) anuales trabajadas en las respectivas empresas, según lo registrado en las declaraciones de accidentabilidad (ver **Tabla 5**). En base a esta clasificación, las empresas de la Pequeña Minería y la Minería Artesanal corresponderían a la categoría D, y en algunos casos a la C.

Tabla 5. Categorías de Empresas Mineras. Adaptado de SERNAGEOMIN, 2020.

Categoría	Producción Nacional 2019
A	Empresas mineras en que se trabaja más de un millón de H.P. en el año (corresponde al trabajo promedio aproximado de igual o mayor de 400 trabajadores/as durante un año).
B	Empresas en que se trabaja entre un millón y doscientos mil H.P. en el año (corresponde al trabajo promedio aproximado de un mínimo de 80 y un máximo de 400 trabajadores/as durante un año).
C	Empresas en que se trabaja menos de doscientas mil y más de treinta mil H.P. en el año (corresponde al trabajo aproximado de un mínimo de 12 y un máximo de 80 trabajadores/as durante un año).
D	Empresas en que se trabaja menos de treinta mil H.P. en el año (corresponde al trabajo promedio de menos de 12 trabajadores/as durante un año).

Todas las grandes empresas mineras actuales iniciaron como pequeñas mineras, siendo dos ejemplos emblemáticos el Distrito Collahuasi (ver **Figura 4**, explotado por la Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi SCM, y la División Chuquicamata (ver **Figura 5**), administrada por la empresa estatal Codelco. A diferencia de las grandes empresas, la Pequeña Minería y la Minería Artesanal no producen grandes cantidades de mineral y su producción es muy sensible a la



Figura 4. Distrito Collahuasi. Fuente: Collahuasi, 2021.

variación del precio del mineral, puesto que al bajar los precios el negocio es difícilmente sustentable por los altos costos productivos. Sin embargo, la relevancia de las pequeñas mineras está en el rol social que cumplen debido a que se desarrollan en zonas donde la única actividad económica relevante es la minería, siendo una palanca



Figura 5. División Chuquicamata. Fuente: El Referente, 2019.

de desarrollo para comunas con menores oportunidades y para la formación de microempresarios. En la **Tabla 6** se detallan otras debilidades y fortalezas de la Pequeña Minería y la Minería Artesanal.

Tabla 6. Debilidades y fortalezas de la Pequeña Minería y la Minería Artesanal en Chile. Adaptado de H. Hernández, 2020.

Debilidades	Fortalezas
▪ Nula mecanización. ▪ Falta de optimización de operaciones. ▪ Bajo conocimiento técnico. ▪ Excesivo trabajo físico. ▪ Herencia de metodología de trabajo. ▪ Defectuosos procedimientos de mantención. ▪ Inexistentes métodos de análisis de costos. ▪ Problemas para determinar ley del mineral. ▪ Comercialización intermitente. ▪ Elevados costos de producción. ▪ Baja seguridad laboral.	▪ Permite explorar nuevos yacimientos. ▪ Dinamiza las economías locales. ▪ Posee un retorno rápido (baja inversión). ▪ Disminuye el desempleo en las zonas en que se desarrolla la actividad. ▪ Creación de agrupaciones con objetivos comunes (asociaciones gremiales). ▪ Apoyo gubernamental.

4.1.4 Seguridad Minera y Fiscalización

Las faenas e instalaciones de la industria extractiva mineral nacional son fiscalizadas por el SERNAGEOMIN. Dentro de las obligaciones y facultades del Servicio en esta materia se encuentran: controlar y fiscalizar el cumplimiento de las normas y exigencias del Reglamento de Seguridad Minera (Decreto N° 132); investigar los accidentes del trabajo, sobre todo aquellos que involucren fallecimientos; exigir el cumplimiento de acciones correctivas; y proponer la dictación de normas, instructivos o desarrollo de actividades preventivas para mejorar los estándares de seguridad (Ministerio de Minería, 2013).

Actualmente, el documento oficial de apoyo para la fiscalización es el Decreto N° 132: “Reglamento de Seguridad Minera”, el cual establece el marco regulatorio al que deben someterse las faenas, velando por la seguridad de los trabajadores y la protección de las instalaciones e infraestructura. La última actualización del Reglamento fue efectuada en 2013 al incorporar un nuevo título (Título XV) que tiene por objetivo principal simplificar los procesos para cumplir con las normas de seguridad por parte de las empresas o productores mineros, cuyas faenas tengan una capacidad de extracción subterránea o a rajo abierto y/o tratamiento de minerales igual o inferior a 5.000 toneladas por mes (Pequeña Minería y Minería Artesanal).

Las estadísticas de accidentabilidad en el periodo 2000 - 2020 muestran una tendencia a la disminución de accidentes fatales (ver **Figura 6**), lo cual es evidencia de los esfuerzos realizados para tener una industria minera más segura. Pero, si estos mismos registros son analizados bajo el criterio de la categoría de empresa minera, se visualiza que el 50% de los accidentes fatales se han registrado en las

categorías de interés, la Pequeña Minería y la Minería Artesanal (ver **Figura 7**). Al contar con un número mucho menor de trabajadores en estos sectores, la cifra se hace aún más preponderante, puesto que, al normalizar la cantidad de accidentes fatales por la cantidad de trabajadores según la categoría, son las pequeñas categorías aquellas que presentan una mayor frecuencia de accidentabilidad y fallecimientos.

Luego, al estudiar las causas de estos accidentes (ver **Figura 8**), se tiene que el más frecuente es el tipificado por SERNAGEOMIN como “Golpeado por roca”. Enseguida, se sitúan “Caída desde altura”, “Ocasionado por Vehículos Motorizados” y “Apretado, atrapado, succionado, etc.”. De los 181 trabajadores fallecidos por accidentes del tipo “Golpeado por roca” más de 130 corresponden a

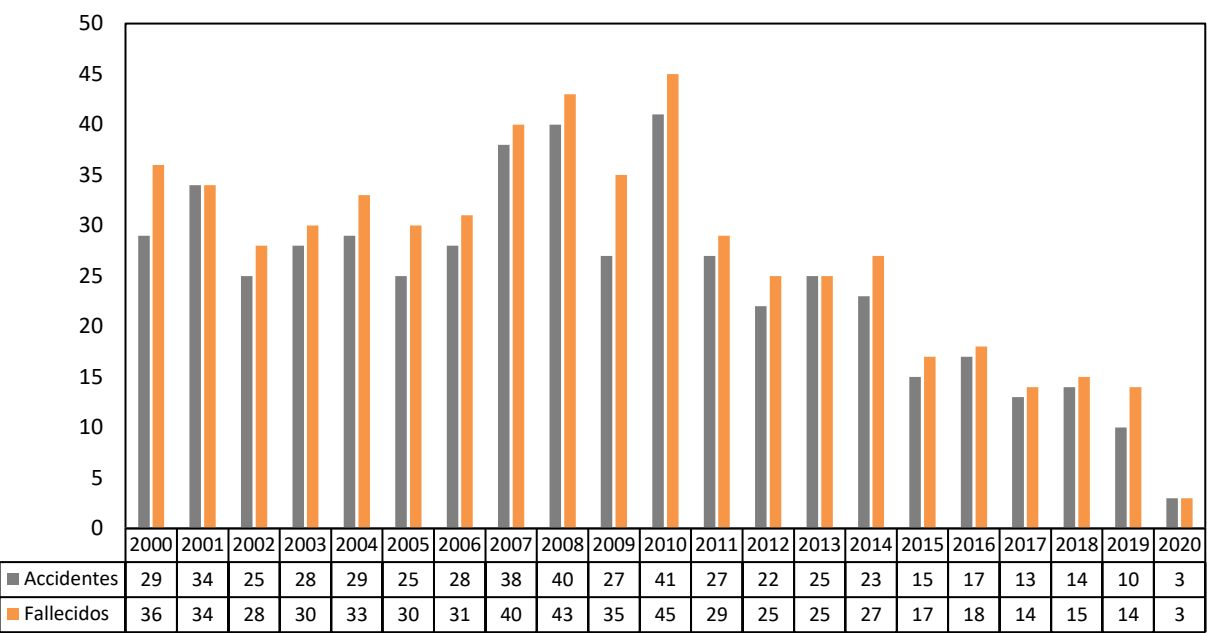


Figura 6. Cantidad de accidentes y trabajadores fallecidos en la minería chilena en el periodo 2000 – 2020. Adaptado de SERNAGEOMIN, 2020.

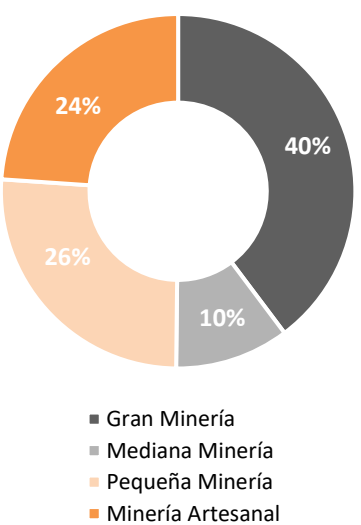


Figura 7. Porcentaje de trabajadores fallecidos por categoría en el periodo 2000 – 2020. Fuente: SERNAGEOMIN, 2020.

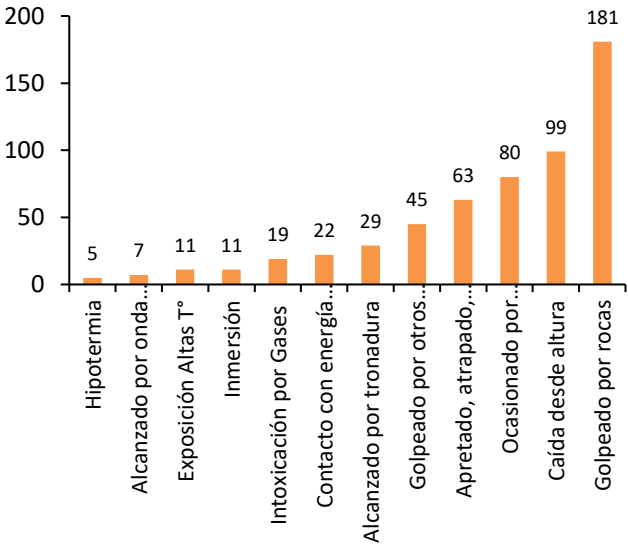


Figura 8. Número de trabajadores fallecidos por tipo de accidente en el periodo 2000 – 2020. Fuente: SERNAGEOMIN, 2020.

eventos registrados en la Pequeña Minería y la Minería Artesanal, por lo que resulta fundamental el desarrollo de metodologías y técnicas para disminuir las estadísticas en este sector específico.

En términos generales, las causas inmediatas de los accidentes son diferenciadas en dos clasificaciones. Las condiciones inseguras corresponden a aquellos factores relacionados a condiciones materiales y ambientales de los puestos de trabajo, mientras que los actos inseguros se asocian a las acciones personales de los trabajadores(as). Así, en el quinquenio 2015 – 2019, las condiciones inseguras más habituales fueron: “Falta de resguardo o defensa inadecuada”, “Método o procedimientos peligrosos” y “Defecto del terreno”. Por otra parte, los actos inseguros más frecuentes del periodo fueron: “Actuar sin orden o desobedecer a éstas”, “Colocarse en posición o postura peligrosa” y “No asegurar ni advertir el peligro”.

Estudiando los registros de los accidentes fatales de SERNAGEOMIN, en la Pequeña Minería y la Minería Artesanal se hace más evidente la falta de conocimientos técnicos en mecánica de rocas y, la falta de capacitación de los trabajadores mineros en cuanto a seguridad y elementos de protección personal. Además, dichos registros permiten notar la diferencia de recursos económicos y técnicos entre las grandes y pequeñas categorías, como los materiales que se emplean para fortificar. Por ello, es necesario que en la confección del *Handbook* se consideren estas variables y se adecúe el contenido a ello, indicando recomendaciones que sean apropiadas y comprensibles para los pequeños mineros.

4.2 Antecedentes nacionales

Con el fin de diagnosticar la situación actual en que se encuentra el país en cuanto a material técnico asociado a la accidentabilidad y seguridad de los pequeños mineros, se realiza una revisión de documentos nacionales, los cuales se detallan en la **Tabla 7**.

Como se mencionó anteriormente, las fiscalizaciones realizadas por el Servicio se fundamentan en el Decreto N° 132 (Reglamento de Seguridad Minera) y en las Guías de Operación del Título XV, en el caso de la Pequeña Minería. Salvo por los documentos mencionados anteriormente, la mayoría del material revisado en esta sección incluye tópicos geomecánicos relevantes, pero son revisados de forma bastante general, y sin hacer un enfoque del lenguaje o la presentación a los segmentos de baja escala. De hecho, algunos de ellos son en formato de “cómic”, siendo que el material va dirigido a un público adulto. Las Guías del Título XV contienen información más detallada de las operaciones que se desarrollan en la Pequeña Minería, pero aun así carece de información relevante o metodologías que se emplean en la realidad. Además, contiene instrucciones o conceptos confusos, y algunas de las imágenes presentadas no complementan al texto de buena forma.

Todo lo anterior recalca la necesidad de generar nuevo material técnico para las categorías de baja escala, enfatizando en las necesidades, competencias y habilidades del público objetivo. El *Handbook* puede ser llamativo sin la necesidad de recurrir al uso de caricaturas o animaciones.

4.3 Revisión de guías internacionales

Asimismo, resulta de gran interés estudiar guías de geomecánica que han sido desarrolladas en otros países mineros para visualizar su contenido, formato y presentación, como una primera noción para la elaboración del *Handbook* en Chile. El compilado de guías analizadas se presentan en la **Tabla 8**.

Considerando los objetivos de la Guía de Geomecánica a desarrollar, el *Manual de Geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea* resulta ser una buena base. El documento es bastante completo en cuanto a contenidos, comenzando con una introducción a la Geología, para luego ahondar en el área geomecánica y finalizar con conceptos y aplicaciones mineras. A pesar de contar con una extensión de 240 páginas, el formato es amigable y se hace empleo de varias imágenes reales que ayudan a comprender los conceptos de mejor forma, por lo que es fácil seguir los tópicos abordados.

Tabla 7. Resumen de la revisión de documentos nacionales.

Documento	Autor	Contenido
<i>“Decreto N° 132: Reglamento de Seguridad Minera”</i>	Ministerio de Minería	i. Objetivos, alcance y atribuciones del SERNAGEOMIN.
		ii. Normas generales.
		iii. Explotación de minas subterráneas.
		iv. Explotación de minas a rajo abierto.
		v. Explotación minería del carbón.
		vi. Explotación minería del petróleo.
		vii. Procesamiento de sustancias minerales.
		viii. Construcción de proyectos y obras civiles en la industria.
		ix. Instalaciones y servicios de apoyo.
		x. Normas sobre cierre de faenas mineras.
		xi. Generalidades de explosivos en la minería.
		xii. Puertos de embarque de minerales.
		xiii. Sanciones.
		xiv. Disposiciones finales.
<i>“Guías de Operación del Título XV del Reglamento de Seguridad Minera”</i>	SERNAGEOMIN	i. Guía N°1: Descripción de proyectos de explotación, tratamiento de minerales y cierre de faenas.
		ii. Guía N°2: Operación y tránsito de equipos, vehículos y personas.
		iii. Guía N°3: Manejo de explosivos.
		iv. Guía N°4: Perforación y tronadura.
		v. Guía N°5: Fortificación y acuñadura.
		vi. Guía N°6: Manejo de mineral y residuos mineros.
		vii. Guía N°7: Manejo de residuos industriales y domésticos.
		viii. Guía N°8: Manejo de sustancias peligrosas.
		ix. Guía N°9: Prevención y control de incendios.
		x. Guía N°10: Instalación y mantenimiento de sistemas eléctricos.
<i>“Guía de las buenas prácticas en seguridad minera en la Pequeña Minería”</i>	SONAMI	i. Operaciones unitarias mineras.
		ii. Caracterización de las operaciones unitarias en la Pequeña Minería.
		iii. Los 12 pasos seguros.
		iv. La seguridad de las operaciones mineras.
		v. Los elementos de protección y sus usos.
		vi. Las condiciones y acciones inseguras.
		vii. Agente del riesgo y su tratamiento.
		viii. Emergencias y contingencias.
		ix. Procedimientos frente a los accidentes.
		x. Recomendaciones generales frente al riesgo.
		xi. Legislación en Chile.
		xii. Glosario minero.
<i>“Manual de prevención de accidentes por caída de rocas”</i>	CORESEMIN	i. Cómic: Conociendo la roca.
		ii. Cómic: Acuñadura manual.
<i>“Acuñadura Manual”</i>	ACHS	i. Factores que generan la caída de rocas.
		ii. Medidas preventivas generales para evitar la caída de rocas.
		iii. Causas específicas de los accidentes.
		iv. Recursos necesarios en la operación de acuñadura.
		v. Procedimiento de acuñadura.
		vi. Acuñaduras especiales.

Tabla 8. Resumen de la revisión de guías internacionales.

País	Guía	Cuerpo de la Guía
Ghana	<i>"Artisanal and Small-Scale Mining Handbook for Ghana with a regional perspective"</i>	i. Obligaciones de las autoridades y entidades mineras. ii. Geología básica. iii. Recomendaciones para adquirir licencia, organización y desarrollo de un sitio de pequeña minería o minería artesanal. iv. Procesamiento de minerales. v. Salud y seguridad. vi. Relación con el medio ambiente. vii. Perfil socio económico de la pequeña minería y minería artesanal.
España	<i>"Guía sobre control geotécnico en minería subterránea"</i>	i. Caracterización geotécnica. ii. Elección del método de sostenimiento. iii. Sostenimientos en minería. iv. Control de las empresas mineras. v. Fenómenos de inestabilidad. vi. Evaluación geotécnica.
Perú	<i>"Manual de Aplicación de Geomecánica y de Sostenimiento en la Mina Cerro de Pasco"</i>	i. Conceptos básicos de geología y geomecánica. ii. Clasificaciones geomecánicas. iii. Condición de los macizos rocosos y definición del sostenimiento. iv. Descripción de los tipos de sostenimiento y forma de colocación. v. Procedimientos y aplicación práctica en diferentes labores.
Perú	<i>"Manual de Geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea"</i>	i. Conociendo la roca. ii. Identificación de los problemas del terreno. iii. Métodos de control de estabilidad. iv. Sostenimiento. v. Zonificación geomecánica. vi. Desatado de rocas.
Perú	<i>"Manual de Minería"</i>	i. La industria minera y los procesos de producción. ii. Ciclo de vida de un proyecto minero. iii. Minería a cielo abierto. iv. Minería subterránea. v. Concentración. vi. Fundición y refinación. vii. Pérdidas y recuperaciones del mineral en cada fase. viii. Tratamiento de los minerales de oro.
Perú	<i>"Manual del Pequeño Minero"</i>	i. Muestreo. ii. Perforación. iii. Voladura. iv. Sostenimiento. v. Ventilación. vi. Seguridad e higiene minera. vii. Utilización del mercurio. viii. Utilización del cianuro. ix. Enfermedades ocupacionales. x. Primeros auxilios. xi. Recopilación de accidentes.

5 Aspectos relevantes de la Mecánica de Rocas

El análisis de la accidentabilidad de eventos relacionados a geomecánica requiere de la comprensión de la mecánica de rocas y, por tanto, el comportamiento del macizo rocoso y sus características más importantes. El presente capítulo pretende mostrar de forma resumida los conceptos clave para entender el origen de los accidentes del tipo “Golpeado por roca”, y también para el desarrollo de la Etapa 4: Propuesta de Recomendaciones.

Cabe mencionar que las definiciones y conceptos a presentar fueron elaborados a partir de lo indicado en el libro *Ingeniería Geológica* (González de Vallejo et al., 2004) y en el *Manual de Geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea* (SNMPE, 2004).

5.1 El Macizo Rocos

Las rocas son conjuntos de sustancias minerales que constituyen parte importante de la corteza terrestre, pudiendo tener distintos orígenes según lo cual se clasifican en ígneas, sedimentarias y metamórficas. Por lo general cuentan con fracturas (discontinuidades) y sus propiedades son muy heterogéneas debido a los procesos de intemperización, o meteorización, por la acción de agentes atmosféricos, y a eventos de alteración, producidos por la ascensión de fluidos o gases magmáticos a altas temperaturas.

El macizo consta de dos grandes subestructuras: la roca intacta y las discontinuidades (ver **Figura 9**). La roca intacta es el bloque de roca entre discontinuidades, mientras que las discontinuidades son superficies que separan bloques del macizo. Las características de las discontinuidades son las que determinan, en gran parte, la mecánica o comportamiento del macizo, de carácter discontinuo y anisótropo. Además, la presencia de estos planos de discontinuidad son la principal diferencia entre las masas rocosas y los suelos, y por lo que existen dos disciplinas distintas para el estudio de cada uno.

Los tipos de discontinuidades se dividen principalmente en planos de estratificación, fallas, zonas de corte, diaclasas, planos de foliación, contactos litológicos y venillas. Otros rasgos geológicos importantes en estructuras rocosas son los pliegues, diques y chimeneas. Las propiedades geomecánicas características de las discontinuidades, y que permiten comprender de mejor forma el comportamiento del macizo, son:

- **Orientación:** posición de la discontinuidad en el espacio. Generalmente se describe por su rumbo y buzamiento (ver **Figura 10**). Si existen muchas discontinuidades con similar orientación, se denomina como una “familia de discontinuidades”.
- **Espaciamiento:** distancia perpendicular entre discontinuidades adyacentes, lo que determina el tamaño de bloques de roca intacta.
- **Persistencia:** extensión en área o tamaño de una discontinuidad.
- **Rugosidad:** aspereza de la superficie de la discontinuidad.

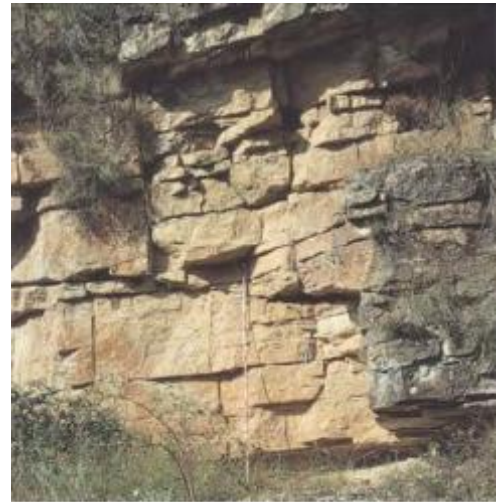


Figura 9. Macizo rocoso de arenisca.

Fuente: G. de Vallejo et al., 2004.

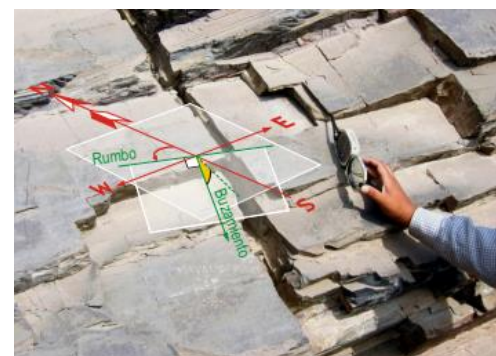


Figura 10. Rumbo y buzamiento.

Fuente: SNMPE, 2004.

- **Abertura:** separación entre paredes rocosas.
- **Relleno:** materiales presentes dentro de la discontinuidad.

5.2 Caracterización del Macizo Rocosó

La caracterización del macizo y sus discontinuidades se compone de observaciones en terreno (“mapeo”) y de ensayos *in situ* o laboratorio. El profesional geomecánico debe monitorear constantemente el macizo debido a su naturaleza cambiante, sobre todo en faenas mineras donde el avance de labores significa una alteración en el macizo.

Las propiedades del macizo, que lo definen y permiten estudiar su comportamiento, son:

- Composición mineralógica, fábrica y textura, tamaño de grano y color.
- Porosidad, contenido en humedad y permeabilidad.
- Peso específico.
- Durabilidad y alterabilidad.
- Resistencia a compresión simple y a tracción.
- Velocidad de ondas primarias y secundarias.
- Resistencia.
- Deformabilidad (deformación elástica estática o dinámica).

Luego, para definir las condiciones del macizo de forma sistemática, existen diversos criterios de clasificación geomecánica, siendo los desarrollados por Barton (1974) y Bieniawski (1989), los más utilizados para establecer valores estimativos de la resistencia global.

5.2.1 Criterio de Barton (1974)

La clasificación del Q de Barton fue desarrollada para estimar parámetros del macizo y diseñar sostenimientos para túneles u otras obras subterráneas. Q se calcula empleando la **Ecuación 1**.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \quad (1)$$

Donde: RQD es el *Rock Quality Designation*, J_n es el índice de diaclasado, J_r el índice de rugosidad de las discontinuidades, J_a el índice de alteración de las discontinuidades, J_w el factor de reducción por presencia de agua, y SRF el *Stress Reduction Factor*.

De esta forma, las fracciones de la Ecuación 1 representan el tamaño de los bloques, la resistencia al corte entre ellos y la influencia del estado tensional, respectivamente. Los valores del Q de Barton varían entre 0,001 (roca excepcionalmente mala) y 1000 (roca excepcionalmente buena).

Además, el estudio de Grimstad y Barton (1993) permite determinar la metodología de sostenimiento, por ejemplo, en túneles, a partir del Q de Barton.

5.2.2 Criterio de Bieniawski (1989)

El criterio RMR (*Rock Mass Rating*) de Bieniawski considera cinco parámetros: la resistencia uniaxial de la matriz rocosa, el grado de fracturación en términos del RQD (*Rock Quality Designation*), el espaciado de las discontinuidades, las condiciones de las discontinuidades, las condiciones geológicas y la orientación de las discontinuidades con respecto a la excavación.

Para realizar la clasificación mediante este método, se divide la zona a estudiar en tramos de características geológicas similares de acuerdo con las observaciones hechas *in situ*, y se efectúan las observaciones o ensayos necesarios para determinar la valoración de cada uno de los parámetros indicados en la **Tabla 9**.

Luego de obtener la valoración por parámetro, se suman las cantidades y se clasifica el macizo según su clase: Muy buena (Clase I, 100 – 81), Buena (Clase II, 80 – 61), Media (Clase III, 60 – 41), Mala (Clase IV, 40 – 21) y Muy mala (Clase V, 20 – 0).

Tabla 9. Valoraciones por parámetro para obtención de RMR.

1	Resistencia de roca sana	Ensayo de carga puntual [MPa]	> 10	4 – 10	2 – 4	1 – 2	En valores bajos se prefiere ensayos a compresión uniaxial.		
		Compresión simple [MPa]	> 250	100 – 250	50 – 100	25 – 50	5 – 25	1 – 5	< 1
	Valoración		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD [%]		90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 50	< 25		
	Valoración		20	17	13	6	3		
3	Separación entre diaclasas [m]		> 2	0,6 – 2	0,2 – 0,6	0,06 – 0,2	< 0,06		
	Valoración		20	15	10	8	5		
4	Estado de las diaclasas		Muy rugosas. Discontinuas sin separaciones. Bordes sanos y duros.	Ligeramente rugosas. Abertura < 1 [mm]. Bordes duros.	Ligeramente rugosas. Abertura < 1 [mm]. Bordes blandos.	Espejos de falla con relleno < 5 [mm] o abiertas 1 – 5 [mm]. Diaclasas continuas.	Relleno blando > 5 [mm] o abertura > 5 [mm]. Diaclasas continuas.		
	Valoración		30	25	20	10	0		
5	Agua freática	Caudal por 10 [m] de túnel [l/min]	Nulo	< 10	10 – 25	25 – 125	> 125		
		Relación presión agua tensión princ. mayor	0	0,0 – 0,1	0,1 – 0,2	0,2 – 0,5	0,5		
		Estado general	Seco	Ligeramente húmedo	Húmedo	Goteos	Flujos		
	Valoración		15	10	7	4	0		

5.3 Factores geológicos determinantes

Los factores geológicos que dominan el comportamiento y propiedades mecánicas de los macizos son: la litología, la estructura geológica y las discontinuidades, el estado de esfuerzos, el grado de alteración o meteorización, y las condiciones hidrogeológicas.

La presencia de agua genera tensiones de igual magnitud en todas direcciones, afectando especialmente a rocas porosas o solubles. El agua influye en el desempeño mecánico del macizo, ya que es capaz de reducir la resistencia de rocas porosas, desencadenar procesos de meteorización o generar reacciones químicas que podrían cambiar la composición del agua. Además, al reducir la capacidad resistente también aumenta de la deformabilidad.

Cualquier alteración en el macizo rocoso, como excavaciones o tronaduras, se traduce en una variación del estado de tensiones naturales y la formación preferencial de cuñas (ver **Figura 11**). La caída de rocas es uno de los mayores riesgos en la minería

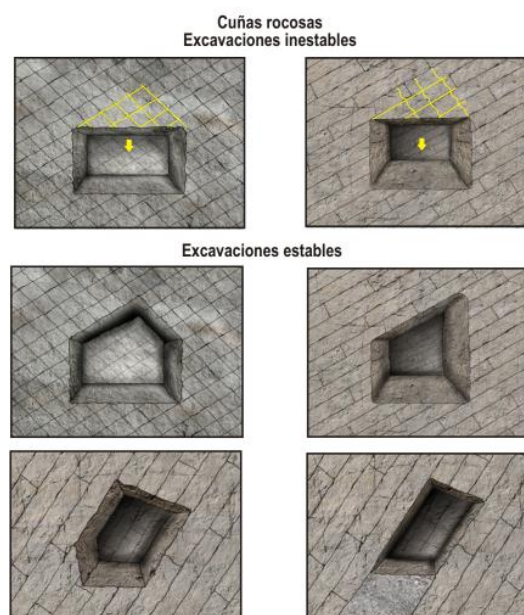


Figura 11. Excavaciones estables e inestables. Fuente: SNMPE, 2004.

subterránea, siendo en Chile la principal causa de accidentes. Por ello, es fundamental la identificación de problemas de inestabilidad del macizo rocoso y su monitoreo constante, permitiendo la prevención y correcto manejo de situaciones indeseadas.

Al inducir un nuevo estado tensional, pueden generarse zonas donde se disipan los esfuerzos y otras donde se concentran. Las áreas de concentración de esfuerzos pueden llegar a sobrepasar la resistencia de la roca, desencadenando en problemas de estabilidad y potenciales caídas de rocas o planchones. En general, existen diferentes terrenos, como rocas facturadas, estratificadas, o con presencia de fallas, donde es necesario estudiar en detalle la influencia de los esfuerzos de forma de poder estimar y proyectar el comportamiento del macizo. Para minimizar los problemas asociados a la inestabilidad del macizo, pueden tomarse variadas medidas complementarias como: estudiar y planear una adecuada secuencia de avance en el minado, implementar técnicas de tronadura apropiadas y seguir las recomendaciones de la autoridad competente, asegurar correctas prácticas al momento de acuñar planchones sueltos, utilizar estructuras de sostenimiento en las zonas inseguras y realizar controles instrumentales de la estabilidad, como la medición de deformaciones.

6 Operaciones Unitarias y Auxiliares en la Pequeña Minería y la Minería Artesanal

Las operaciones unitarias son aquellas etapas básicas que permiten producir minerales desde un depósito, junto a las operaciones auxiliares que dan soporte a las anteriores. Las operaciones unitarias son propias del ciclo de producción, que consiste en la secuencia “Perforación – Tronadura – Carguío y Transporte” (Castillo & Hernández, 2020).

En las siguientes secciones cada una de las operaciones es detallada, explicando en qué consiste, cómo se realiza en las pequeñas categorías, e indicando cuáles son los factores de riesgo asociados que podrían generar eventuales accidentes. Cabe destacar que los factores de riesgo identificados en cada operación son aquellos que se consideran relevantes en cuanto a su relación a la accidentabilidad, y que son característicos de la operación. De esta forma, se considera que los factores asociados a la capacitación, habilitación y actitud de los operadores son transversales a todas las operaciones y, por tanto, no se toman en cuenta dentro de los factores determinantes característicos de cada operación. De todas formas, se destaca que los operadores deben estar capacitados para desarrollar sus labores adecuadamente, encontrarse en condiciones óptimas durante su turno de trabajo, y priorizar su seguridad por sobre todo.

6.1 Perforación

La Perforación es la operación unitaria efectuada para crear pozos en el macizo rocoso, con una distribución y geometría adecuadas, donde se alojarán cargas explosivas.

En el caso de la minería subterránea a baja escala, lo usual es la utilización de equipos de rotopercusión como las perforadoras manuales, que son montadas sobre émbolos, y necesitan aire comprimido y agua para su funcionamiento. En algunos casos, menos habituales, se emplean pequeños “jumbos”, hidráulicos o neumáticos. Por otra parte, en faenas a cielo abierto, es usual la utilización de equipos livianos tipo “Jack Leg” o “Track Drill”, como el presentado en la **Figura 12**.



Figura 12. Equipo “Track Drill”. Fuente: Rumbo Minero, 2020.

A continuación, en la **Tabla 10** se indican los factores que podrían desencadenar en accidentes durante las labores de la operación de Perforación. Es importante destacar que, en la minería a baja escala los diagramas de tiro no suelen ser diseñados y son ejecutados según lo aprendido mediante el método de “ensayo y error”, en complemento con el conocimiento heredado de las generaciones mineras predecesoras.

Tabla 10. Factores de riesgo en la operación de Perforación.

Factor de Riesgo	Descripción
Condiciones del entorno	Las condiciones ambientales deben ser las adecuadas para que el trabajo sea seguro. La galería debe ser revisada en toda su extensión, verificando que no existan restos de explosivos, y se deben acuñar las zonas con rocas sueltas. La operación debe realizarse en húmedo para preservar la calidad del aire, barrer el mineral molido, refrigerar las barras y sellar las paredes fracturadas del tiro.
Inspección y mantención de equipos y herramientas	Las maquinarias y elementos de operación deben ser revisados periódicamente y, además, inspeccionados cada vez que deban utilizarse. Cualquiera de estas tareas debe realizarse cerrando la llave de paso a la red, sin aire en el circuito, con mangueras y otros elementos desacoplados y, sin entorpecer el tránsito.
Conocimiento del macizo	Una correcta caracterización del macizo permite que la operación sea realizada de forma segura, determinando previamente la geometría y disposición en la zona a perforar. Además, durante la misma operación debe tenerse especial atención al comportamiento del macizo, respecto de desmoronamientos, desprendimientos y estabilidad de paredes y crestas (rajos abiertos).

6.2 Tronadura

La operación de Tronadura corresponde a aquella que tiene por objetivo principal fragmentar y arrancar el mineral desde el macizo rocoso eficientemente, aprovechando la energía liberada por los explosivos situados en los tiros realizados en la etapa previa. Se realiza en minería a rajo abierto y subterránea.

En términos generales, el procedimiento se divide en seis pasos: actividades preliminares para aislar adecuadamente al área a tronar, preparación del cebo o prima, carguío de los tiros, taqueado de los tiros, encendido de los tiros (Tronadura) y eliminación de los tiros quedados.

El uso de explosivos en este procedimiento eleva las posibilidades de ocurrencia de accidentes graves, por lo que los trabajadores que manipulan estos materiales deben contar con una licencia otorgada por la Dirección General de Movilización Nacional. En la **Tabla 11** se detallan los factores riesgosos de la operación.

Tabla 11. Factores de riesgo en la operación de Tronadura.

Factor de Riesgo	Descripción
Planificación de la operación	El área a tronar debe estar libre de caída de rocas y otros riesgos. La operación debe ser programada señalizando debidamente el área para asegurar que solo tengan acceso los operadores y responsables. Además, debe contemplarse el tiempo de espera luego de la Tronadura para observar la respuesta del macizo.
Uso de explosivos	La utilización de explosivos requiere de un manejo cuidadoso, y convierte a esta operación en una de las más riesgosas. Las cantidades y disposición de estos deben ser estudiados detalladamente, para no generar efectos indeseados. También debe verificarse la presencia de “tiros quedados” después de tronar.
Conocimiento del macizo	Este factor toma especial relevancia durante y después de la operación. Los operadores deben ser capaces de interpretar las señales que muestra el macizo y actuar responsablemente según ello (ej: aparición de agua). Además, después de tronar, debe considerarse que el macizo requiere de tiempo para ajustarse luego de la variación tensional, quedando debilitado después de la Tronadura.

6.3 Carguío y Transporte

La operación de Carguío y Transporte incluye todos los procedimientos necesarios para transportar personas o materiales dentro en una faena, ya sea subterránea o rajo abierto. Una de las principales finalidades es retirar el material volado en la Tronadura desde la frente de trabajo.

Debido a la magnitud de las obras en las faenas de las pequeñas categorías mineras, los equipos y maquinaria empleados son simples y de capacidades bajas. Las modalidades más utilizadas son los carros manuales, equipos mecanizados de bajo tonelaje, transporte vertical a través de buzones de descarga y huinches y vehículos livianos. El transporte vertical con huinche (ver **Figura 13**), que ayuda a trasladar material a cotas más elevadas, es uno de los más utilizados en la minería a baja escala.

Los factores de riesgo asociados a esta operación unitaria son variados, incluyendo desde la capacitación de los operadores hasta la mantención de los equipos o vehículos. En la **Tabla 12** se presenta el detalle de dichos factores.

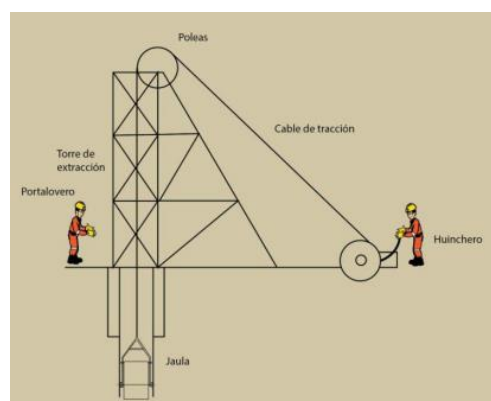


Figura 13. Transporte vertical con Huinche. Fuente: SERNAGEOMIN, 2013.

Tabla 12. Factores de riesgo en la operación de Carguío y Transporte.

Factor de Riesgo	Descripción
Condiciones del entorno	El terreno debe mantenerse en condiciones óptimas, libre de obstáculos. Los anchos y pendientes de caminos y rampas deben ser acordes al tamaño y capacidad de los vehículos. Además, se debe señalizar adecuadamente.
Mantención de equipos o vehículos	Todos los equipos y vehículos deben ser revisados frecuentemente, de manera completa y adecuada. Al realizar cualquier procedimiento de mantención, debe asegurarse que el vehículo o equipo esté inmóvil y des-energizado.
Planificación del tránsito de personas y vehículos	La minera debe contar con planos de labores que detallen por donde transitan personas, vehículos y equipos. Dichos planos deben estar siempre actualizados y disponibles para revisión. Por otro lado, se debe asegurar que vehículos o equipos con motores bencineros no sean utilizados en minas subterráneas.

6.4 Ventilación

La Ventilación contempla los procedimientos que permiten suministrar el oxígeno suficiente para las personas y equipos, diluir y extraer gases tóxicos, y reducir la temperatura en minas subterráneas.

Todas las faenas subterráneas deberán ser ventilados, de forma natural o forzada, para mantener un suministro permanente de aire limpio. El caudal de aire es determinado según la cantidad de trabajadores y maquinarias de la mina. Si no es posible emplear un circuito de ventilación natural, puede diseñarse un sistema auxiliar o con aire comprimido. En la Pequeña Minería y la Minería Artesanal es común el empleo del método de ventilación natural, haciendo uso de túneles piques existentes. En la **Tabla 13** se indican los factores de riesgo de esta operación auxiliar.

Tabla 13. Factores de riesgo en la operación de Ventilación.

Factor de Riesgo	Descripción
Caudal de aire	El caudal debe ser determinado considerando todas las personas y equipos que existan en la mina, y el mínimo aceptado por norma. Esto permitirá que las labores puedan desarrollarse de forma óptima.
Condiciones del entorno	Los sistemas de ventilación deben ser construidos de forma de asegurar que no se vean afectados por obstrucciones o derrumbes, o sean contaminados, impidiendo su correcto funcionamiento.
Mantención y control de sistemas	Los circuitos deben ser monitoreados frecuentemente para asegurar que el sistema se encuentre funcionando como se espera, renovando el aire viciado. Los registros de controles deben estar disponibles para su fiscalización.

6.5 Acuñadura

La Acuñadura se refiere a la actividad para detectar y desprender controladamente planchones de roca sueltos, ya sea del techo o cajas de una labor minera. Los acuñadores (operadores) utilizan “barretillas de seguridad” para identificar planchas sueltas (golpeando la roca con uno de los extremos) y desprenderlas. El largo de la barretilla se relaciona a con la zona o labor específica para la cual se empleará, existiendo versiones desde 1,2 a 4,5 metros de largo.

Los accidentes relacionados a la caída de rocas son frecuentes, siendo unas de las causas más comunes la falta de acuñadura, acuñadura deficiente y las acciones inseguras al acuñar. En la **Tabla 14** se detallan los factores de riesgo evidenciados en esta operación.

Tabla 14. Factores de riesgo en la operación de Acuñadura.

Factor de Riesgo	Descripción
Conocimiento del macizo	Aunque la caracterización del macizo podría ser de ayuda en esta operación, lo fundamental recae en poder evidenciar visualmente, y auditivamente, las condiciones en las que se encuentra el macizo. Debe observarse frecuentemente para estudiar nuevos planchones potenciales a desprender. De todas formas, se requiere que el operador golpee con la “barretilla” los potenciales planchones sueltos para asegurarse.
Implementos	Como se mencionó anteriormente, para la actividad de Acuñadura se utilizan herramientas de fierro duro, aluminio o fibra de vidrio, denominadas “barretillas de seguridad” o “acuñadores”. En ningún caso deben emplearse elementos diferentes a estos, que no cumplan con las dimensiones o características.

6.6 Fortificación

Finalmente, la Fortificación corresponde al conjunto de procedimientos para estabilizar las labores de una mina subterránea cuando su condición no es auto soportante. Los objetivos principales son mantener las labores seguras, con espacio suficiente para la circulación de equipos o personas, y disminuir el movimiento del macizo rocoso, impidiendo su desmoronamiento.

Según el mecanismo de sostenimiento, se identifican tres tipos de Fortificación: activa, pasiva y combinada. El primer caso corresponde a aquel en que los refuerzos ejercen una carga sobre el macizo. En el caso pasivo, los elementos solo aplican carga cuando el macizo se deforma. Por último, la opción combinada considera la utilización de soportes y refuerzos.

En la **Tabla 15** se presentan los factores de riesgo asociados a la Fortificación.

Tabla 15. Factores de riesgo en la operación de Fortificación.

Factor de Riesgo	Descripción
Conocimiento del macizo	La caracterización del macizo permite conocer su capacidad autosoportante, y analizar la necesidad de reforzar. Asimismo, es relevante monitorear el comportamiento del macizo y evaluar el desempeño de los refuerzos.
Diseño y construcción del soporte o refuerzo	El segundo paso es diseñar el sistema de soporte para poder realizar las labores de forma segura, con el macizo estable. Se espera que exista un apoyo técnico en esta etapa, para asegurar un buen diseño y ejecución.
Materiales	En las pequeñas mineras es muy común el empleo de madera para la Fortificación. La materia prima debe ser bien seleccionadas y estudiada respecto a su calidad y desempeño ante cargas, para cumplir con los requerimientos.
Monitoreo y control	Los sistemas de refuerzo o soporte deben ser monitoreados para analizar su comportamiento a través del tiempo y dar un tratamiento oportuno ante situaciones peligrosas, como deformaciones excesivas o presencia de agua.

Por lo tanto, considerando que el objetivo del proyecto del *Handbook* es reducir los accidentes del tipo “Golpeado por roca”, preliminarmente se tiene que de las seis operaciones estudiadas existen cuatro de ellas que guardan mayor relación a este tipo de accidentes según lo señalado en las **Tablas 10 a 15**. Estas son: Perforación, Tronadura, Fortificación y Acuñadura.

Luego, basándose en las estadísticas de accidentabilidad del SERNAGEOMIN, de acceso público, se observa que de los accidentes fatales registrados en las categorías de la Pequeña Minería y la Minería Artesanal entre 2016 y 2019, la mayoría se asociaban a desprendimientos de “planchones”. Por tanto, se establece que las operaciones auxiliares de Acuñadura y Fortificación son las más críticas por su frecuencia en los registros de accidentes fatales y su relación al tipo de accidente bajo estudio.

7 Procesamiento de Imágenes de visitas a terreno

Preliminarmente, el proyecto del *Handbook* consideraba visitas a terreno con el objetivo de conocer presencialmente la realidad de los pequeños mineros, sus faenas de trabajo y los procedimientos de fiscalización actuales del SERNAGEOMIN. Pero, dada la contingencia de la pandemia, se decidió avanzar a través de entrevistas *online* y la revisión de imágenes obtenidas en visitas a minas de la Región de Coquimbo, realizadas por equipos disciplinares de la Universidad de La Serena.

Dicha base de imágenes, agrupadas según la mina visitada, constaba de más de 1.200 fotografías por lo que la primera tarea consistió en realizar una revisión minuciosa y selección de las imágenes que resultaran representativas de la muestra, para luego clasificarlas en cinco categorías: Equipos/Maquinaria, Explosivos, Labores Subterráneas, Portales, Taludes/Laderas. Esto permitió disminuir la cantidad de imágenes a 174 unidades.

En base al análisis las fotografías seleccionadas, se concluyó que lo observado es concordante con la información indagada en la Etapa 2, donde se estudiaron las operaciones unitarias y auxiliares. Aun así, se evidenciaron situaciones riesgosas, como sistemas de fortificación inadecuados o inexistentes. En la **Tabla 16** se presenta el compilado de las observaciones realizadas.

Además de permitir la validación de la información recabada en la Etapa 2, la examinación de las imágenes permitió la identificación de factores o parámetros relevantes, susceptibles a observar y evaluar en terreno de forma simple. Esto último con el objetivo de proponer una nueva metodología de evaluación del macizo rocoso *in situ*, que pueda ser implementada por los mismos trabajadores de las pequeñas mineras y así tener un indicio de la calidad de la roca en sus respectivas minas.

La metodología de clasificación geomecánica propuesta por Bieniawski (1989), presentada en el Capítulo 5, es simple, pero requiere de ensayos, obtención de RQD, y por tanto su implementación se hace difícil en las categorías bajo estudio considerando la complejidad de realizar dichas pruebas por parte de los pirquineros, o de tener los recursos para contratar un laboratorio o consultor profesional.

Así, luego de analizar nuevamente los registros fotográficos en la búsqueda de dichos parámetros, y tomando en cuenta lo mencionado en el párrafo anterior, se proponen los siguientes factores:

- Resistencia de la roca
- Rugosidad de la roca.
- Tamaño de bloques.
- Orientación de familias de discontinuidades.
- Abertura de discontinuidades.
- Relleno de discontinuidades.
- “Granulometría” luego de Tronadura.
- Presencia de agua.

Tabla 16. Comentarios sobre fotografías de minas de la Región de Coquimbo.

Clasificación	Comentarios	Fotografías
Equipos/Maquinaria	- Los equipos y maquinarias observados son concordantes con lo indicado en la operación de Carguío y Transporte. Se comprueba la utilización de pequeños camiones, retroexcavadoras y perforadoras manuales. - Además, se logra evidenciar el uso del transporte por huinche en varias minas, contruidos con madera de forma precaria e insegura (ver Figura 14).	 Figura 14. Transporte con Huinche. Fuente: SERNAGEOMIN, 2013.
Explosivos	Se observan polvorines de tipo “gallinero” (ver Figura 15) para el almacenamiento de explosivos en cajas introducidas en hoyos. Dichas cajas son de madera y cuentan con un “filtro” exterior de hormigón.	 Figura 15. Polvorín de tipo gallinero. Cortesía de Jorge Cortez, ULS.
Labores Subterráneas	- Generalmente, el espacio dentro de la mina es reducido, dificultando la circulación y la realización de las labores (ver Figura 16). - En muchos casos, se observan fragmentos de roca en el suelo, que pueden ser indicio de la peligrosidad de la zona. Falta de saneamiento y limpieza. - Falta de iluminación en túneles. Las únicas fuentes de luz son las linternas manuales o en casco. - En la mayoría de las imágenes no se observa ningún tipo de obra de sostenimiento del macizo. - Piques descubiertos, sin protección ante caídas.	 Figura 16. Transporte en mina subterránea. Cortesía de Jorge Cortez, ULS.

Tabla 16. Comentarios sobre fotografías de minas de la Región de Coquimbo.

Clasificación	Comentarios	Fotografías
Laderas/Taludes	Existen taludes de roca muy inclinados, casi verticales y sin contención aparente. Posibilidad de caída de planchones (ver Figura 17).	 Figura 17. Taludes subverticales. Cortesía de Jorge Cortez, ULS.
Portales	- Se muestran variadas entradas a minas subterráneas sin sistema de fortificación alguno, y de dimensiones reducidas (ver Figura 18). También, existen portales realizados en madera, pero muy precarios. - Asimismo, existen minas en donde los portales están bien contruidos. El material más utilizado en fortificación es la madera. - Muy pocas minas presentan estabilización con malla y pernos, o <i>shotcrete</i>. - En la mayoría de los portales se evidencian bloques superiores que podrían desprenderse, provocando accidentes u obstaculizando el paso.	 Figura 18. Portal sin fortificación. Cortesía de Jorge Cortez, ULS.

8 Propuestas y Recomendaciones

En las siguientes secciones se detallan las propuestas emanadas desde el análisis realizado en las etapas anteriores, incluyendo una nueva metodología cualitativa de evaluación del macizo rocoso, un índice guía para la estructuración del *Handbook* de Geomecánica y recomendaciones para la etapa de masificación de este.

8.1 Propuesta de Metodología de Evaluación del Macizo Rcoso

El objetivo principal de la creación de una metodología de evaluación del macizo rocoso es brindar a los pequeños mineros una herramienta simple y comprensible que les permita determinar de forma cualitativa la calidad del macizo en sus minas, a través de observaciones y testeos en terreno fáciles de implementar por ellos mismos.

Para la elaboración de la metodología (ver **Tabla 17**), se genera una instrucción y una pregunta para la evaluación cualitativa de cada uno de los parámetros propuestos en la sección anterior. Los ocho parámetros a evaluar cuentan con cuatro opciones de respuesta, que se ordenan desde la opción más

Tabla 17. Cuadro para la propuesta de Metodología de Evaluación del Macizo Rocoso.

PARÁMETRO	INSTRUCCIÓN PREVIA	EVALUACIÓN	RESPUESTAS			
RESISTENCIA A COMPRESIÓN	Tome su martillo y/o navaja para realizar un ensayo en terreno.	Resistencia de Compresión Simple	<i>Al golpear la roca con el martillo, solo saltan pequeños fragmentos (esquirlas).</i>	<i>Se requieren muchos golpes de martillo para fracturar la roca.</i>	<i>La roca puede fracturarse con un golpe fuerte de martillo. Es muy difícil tallarla con la navaja.</i>	<i>Al golpear la roca con el martillo, quedan pequeñas marcas o se desmenuza. Puede tallarse con navaja.</i>
			> 250 [MPa]	100 - 250 [MPa]	25 - 100 [MPa]	1 - 25 [MPa]
RUGOSIDAD DE LA ROCA	Observe detenidamente el macizo rocoso y toque la superficie.	¿Cómo es la textura predominante de la roca?	<i>Muy rugosa.</i>	<i>Rugosa.</i>	<i>Ligeramente rugosa.</i>	<i>Lisa.</i>
PRESENCIA DE DISCONTINUIDADES	Observe detenidamente el macizo rocoso para identificar fracturas.	¿Se observan discontinuidades en el macizo rocoso?	<i>No, el macizo rocoso no presenta fracturas.</i>	<i>Sí, tiene fracturas espaciadas 60 centímetros y 2 metros.</i>	<i>Sí, tiene fracturas espaciadas entre 6 y 60 centímetros.</i>	<i>Sí, tiene fracturas espaciadas en menos de 6 centímetros.</i>
FAMILIAS DE DISCONTINUIDADES	Observe detenidamente la dirección de las fracturas del macizo.	¿Cuál es la orientación de las discontinuidades?	<i>No se observan fracturas en el macizo rocoso.</i>	<i>La mayoría o todas las fracturas se orientan en una única dirección.</i>	<i>Existe más de una dirección predominante de orientación de las fracturas.</i>	<i>No es posible identificar una dirección predominante de las fracturas.</i>
ABERTURA DE DISCONTINUIDADES	Observe detenidamente el macizo rocoso para identificar fracturas.	¿Cuánto mide el espesor de la abertura de las discontinuidades?	<i>No se observan fracturas en el macizo rocoso.</i>	<i>Menor a 1 milímetro.</i>	<i>Entre 1 y 5 milímetros.</i>	<i>Mayor a 5 milímetros.</i>
RELLENO DE DISCONTINUIDADES	Observe detenidamente la abertura de las fracturas.	¿Qué características tiene el relleno de las discontinuidades?	<i>No se observan fracturas en el macizo rocoso.</i>	<i>Es un relleno duro, en una fractura con abertura menor a 5 milímetros.</i>	<i>Es un relleno duro, en una fractura con abertura mayor a 5 milímetros.</i>	<i>Es un relleno blando.</i>
GRANULOMETRÍA	Observe detenidamente los fragmentos de roca luego de tronar.	¿Cuál descripción es la más parecida?	<i>Grandes fragmentos de roca, parecidos en tamaño.</i>	<i>Variados tamaños de fragmentos de roca, destacando la presencia de tamaños grandes.</i>	<i>Variados tamaños de fragmentos de roca, destacando la roca pulverizada.</i>	<i>Todos o la mayoría de los fragmentos son roca pulverizada o finos.</i>
PRESENCIA DE AGUA	Observe detenidamente el macizo rocoso en busca de agua.	¿Se observa presencia de agua?	<i>No, el macizo rocoso se ve seco.</i>	<i>Sí, se observa presencia de humedad o gotas.</i>	<i>Sí, se observan pequeños flujos de agua.</i>	<i>Sí, se observan flujos considerables de agua.</i>
CLASIFICACIÓN			CLASE I	CLASE II	CLASE III	CLASE IV

favorable a la más desfavorable, de izquierda a derecha, respectivamente. Luego, para emplear el cuadro, basta con realizar la instrucción señalada para cada uno y seleccionar la alternativa que mejor represente al parámetro en estudio. Al finalizar, se debe observar en que zona (color) se concentra la mayoría de los puntos, y con ello clasificar a la zona analizada como la clase indicada en la zona inferior.

A continuación, se entrega una breve explicación de cada una de las clases.

- **Clase I: Muy Buena a Buena.** El macizo no presenta fracturas (discontinuidades), o en caso de tener, son muy espaciadas y tienen buenas características resistentes. Alta resistencia y textura rugosa. No existe presencia de agua, o es muy baja.
- **Clase II: Buena a Regular.** El macizo está fracturado, pero las condiciones de sus discontinuidades son relativamente buenas. Considerable resistencia y textura rugosa. Existe presencia de agua, como humedad o goteos.
- **Clase III: Regular a Mala.** Macizo fracturado, con más de una familia de discontinuidades. Las características de las discontinuidades son desfavorables, y en su gran mayoría presentan un relleno blando o flujos de agua. Baja resistencia y textura más tersa.
- **Clase IV: Mala a Muy Mala.** Macizo muy alterado, con discontinuidades poco espaciadas, sin lograr identificarse un patrón (familias), o existe un flujo de agua considerable a través de ellas. Resistencia muy baja y textura lisa.

Cabe destacar que, para validar y ajustar la metodología esta debe ser probada en terreno, comparando los resultados entregados con clasificaciones geomecánicas como el RMR Bieniawski o el Q de Barton, que son ampliamente utilizadas en el área minera. Se espera que estos ajustes sean realizados como una tarea futura del equipo del proyecto del *Handbook* de Geomecánica. Asimismo, existen otros parámetros que podrían ser útiles para la edición o actualización de la propuesta, como la relación de las clases con la necesidad de aplicar técnicas de sostenimiento, o la coloración y apariencia del macizo rocoso. En este sentido, se podría generar una carta con todos los tipos de roca existentes en las regiones mineras de Chile, clasificándolas según su ubicación en el país, e incluyendo fotografías, sus características y parámetros más importantes.

Como Anexo al presente reporte, se hace entrega de un documento donde se detallan las instrucciones de uso de la metodología, las herramientas necesarias para su aplicación, fotografías reales de macizos con las características definidas en cada una de las clases, y algunas definiciones o recomendaciones útiles.

8.2 Propuesta de contenidos para el *Handbook*

A partir de lo investigado para el desarrollo de la presente memoria se genera una propuesta de contenidos para su inclusión en el *Handbook* de Geomecánica. Enseguida, se enumeran las secciones y se detalla el contenido de cada una.

- I. **Introducción** (Primer capítulo donde se detallan las motivaciones para la creación del *Handbook*, el compromiso del SERNAGEOMIN de mejorar las condiciones de seguridad de los trabajadores a través de la generación de competencias. Precisión del público objetivo, la Pequeña Minería y la Minería Artesanal, además de los fiscalizadores del pequeño sector).
 - i. Presentación
 - ii. Objetivos
 - iii. Compromiso
 - iv. Alcances
- II. **La Industria Minera en Chile** (Capítulo breve que ayuda a contextualizar los tópicos a abordar en secciones posteriores y que entrega información general relevante de la actividad minera. Inclusión de estadísticas y datos que enfatizan en la necesidad de mejorar las condiciones de las categorías mineras bajo estudio. Detalle del accidente tipo “Golpeado por Roca”).
 - i. Historia de la minería

- ii. Importancia de la actividad
 - iii. Categorías de empresa
 - iv. Producción
 - v. Accidentabilidad
 - vi. Fiscalización
- III. **La Pequeña Minería y la Minería Artesanal en Chile** (Focalización en las categorías de interés. Caracterización de cada una, entregando datos más específicos en cuanto a producción, accidentabilidad, fortalezas y debilidades).
 - i. Diagnóstico de la Pequeña Minería
 - ii. Diagnóstico de la Minería Artesanal
- IV. **Mecánica de Rocas** (Sección dedicada a ilustrar conceptos básicos de Geomecánica, que permitan a los pequeños mineros comprender de mejor forma los procedimientos y operaciones que llevan a cabo en sus respectivas faenas. Detalle del fenómeno de caída de rocas, causas y consecuencias, y relación al accidente “Golpeado por Roca”).
 - i. Geología básica
 - ii. Características de la roca intacta y discontinuidades
 - iii. Propiedades físicas y mecánicas del macizo rocoso
 - iv. Clasificaciones Geomecánicas
 - v. Influencia de esfuerzos
 - vi. Presencia de agua
 - vii. Caída de rocas
- V. **Operaciones Unitarias y Auxiliares** (Descripción breve y concisa de cada operación, indicando su importancia dentro del ciclo productivo, sus objetivos y formas en que se debe llevar a cabo).
 - i. Ciclo productivo
 - ii. Perforación
 - iii. Tronadura
 - iv. Carguío y Transporte
 - v. Ventilación
 - vi. Fortificación
 - vii. Acuña dura
- VI. **La Minería del Carbón** (Capítulo exclusivo para la caracterización de la minería del carbón, enfatizando en las diferencias con la minería metálica).
- VII. **Recomendaciones** (Sección de propuestas y consejos para mejorar el desarrollo de las operaciones, y dar a conocer metodologías relacionadas a la mejora de la seguridad minera).
 - i. Metodología de Evaluación del macizo rocoso para la Pequeña Minería y la Minería Artesanal (propuesto en este reporte).
 - ii. Consejos para las operaciones de Fortificación y Acuña dura.
 - iii. Consejos de seguridad.
- VIII. **Glosario Minero** (Listado de conceptos relevantes del área minera explicados de forma breve, incluyendo imágenes que ayuden a comprenderlos de mejor forma, y considerando sinónimos empleados en la jerga minera. La importancia de esta sección yace en la necesidad de aunar el vocabulario técnico y elevar las competencias técnicas de los pequeños mineros).

8.3 Propuesta para etapa de masificación del *Handbook*

Independiente de la estructura y contenidos de la Guía, se debe tener en cuenta que una de las grandes restricciones de su confección es el público al que va dirigido. Por lo general, los pequeños mineros no han tenido una formación profesional sobre esta actividad económica, y los conocimientos con los que cuentan han sido traspasado a ellos por generaciones de mineros anteriores o, han ido aprendiendo sobre la base del “ensayo y error”. La mayoría de ellos trabaja en la minería a baja escala porque es

una de las pocas opciones que tienen para generar ingresos y subsistir. De hecho, existen algunos trabajadores que son analfabetos, por lo que es necesario desarrollar la Guía de la forma más inclusiva posible, con un plan de presentación y masificación del *Handbook* que sea efectivo y que permita cumplir los objetivos del proyecto. En este sentido, se propone la creación de un plan de masificación de la Guía que contemple la asesoría de profesionales del área de la educación y la psicología, de forma tal que el material entregado a los pequeños mineros, emanado desde el proyecto del *Handbook*, tenga un buen recibimiento y sea una herramienta efectiva para ellos.

La Andragogía es una disciplina de la educación que se asocia a la enseñanza a adultos, y se sustenta sobre dos pilares fundamentales: (1) los aprendices son autónomos y capaces de dirigir el aprendizaje, y (2) el profesor debe facilitar el aprendizaje, enfatizando en la opción del aprendiz de elegir sus requerimientos (Fasce, 2006). Asimismo, la Andragogía se rige por los siguientes postulados:

- El aprendiz adulto puede determinar sus necesidades de aprendizaje y cómo alcanzarlas.
- La experiencia del aprendiz adulto es una parte fundamental en su aprendizaje, ya que le aporta en la consolidación del nuevo conocimiento.
- Los adultos darán mayor importancia a las enseñanzas que se relacionen a su trabajo actual o actividades diarias.
- Relacionado a lo anterior, los aprendices mayores mostrarán un mayor interés por desarrollar nuevas competencias que les ayuden a solucionar problemas concretos y que puedan aplicar de forma práctica en sus quehaceres cotidianos.
- Y, por último, los adultos tienden a mostrarse más motivados por aprender debido a la necesidad de encontrar soluciones para sus problemas, que les permitan acercarse a la autorrealización.

Por consiguiente, la asesoría externa debiese basarse sobre los principios recién mencionados, donde expertos del área educacional puedan aportar desde sus diversas perspectivas, para lograr que tanto los receptores de los nuevos conocimientos como quienes hacen entrega de estos, estén alineados respecto a lo que se quiere lograr y cuáles son los pasos a seguir para conseguirlo. En efecto, al terminar la elaboración del *Handbook*, este podría ser presentado idealmente de forma presencial a los pequeños mineros, por parte del SERNAGEOMIN y la SCMR, mediante exposiciones a las Asociaciones Gremiales, por ejemplo. Y, posterior a este hito, podrían desarrollarse cursos de capacitación voluntarios para quienes deseen mejorar sus conocimientos en Geomecánica y/o aprender a utilizar la nueva metodología de evaluación del macizo rocoso.

Por otra parte, podría generarse una alianza con la ENAMI, Empresa Nacional de Minería, quienes cuentan con herramientas y programas de financiamiento para el desarrollo sustentable del sector minero, enfocado en la Pequeña y la Mediana Minería de Chile.

9 Conclusiones

La minería es una de las actividades económicas más importantes en el mundo, donde Chile destaca en la actualidad como el primer productor de cobre y yodo. Gracias a la riqueza de minerales metálicos, no metálicos y recursos energéticos en nuestro país, esta industria genera importantes ingresos económicos que sustentan a gran parte de la población, brindando una gran cantidad de puestos de trabajo. De hecho, al analizar el PIB nacional, se evidencia que la minería es un agente macroeconómico, que dinamiza la economía y la producción.

Según estadísticas de 2020, las dos categorías más grandes, la Mediana Minería y la Gran Minería, aportan cerca del 99% de la producción de minerales metálicos y, por tanto, la Pequeña Minería y la Minería Artesanal, menos del 1%. No obstante, el rol de estas dos menores categorías es fundamental en Chile, ya que cumplen un rol social clave, puesto que se desarrollan en zonas donde la única actividad económica relevante es la minería. La producción de estas empresas es muy baja, pero generan una cantidad de empleos considerable y forman microempresarios, siendo una palanca de

desarrollo para sectores de bajo nivel socioeconómico. Otras de las fortalezas de este sector son la dinamización de las economías locales, disminución del desempleo, y la creación de agrupaciones con objetivos comunes, como las asociaciones gremiales. Por otra parte, la minería a baja escala se caracteriza por su falta de optimización de operaciones y nula mecanización, bajo conocimiento técnico por parte de los mineros, excesivo trabajo físico y baja seguridad laboral producto de los escasos recursos, y gran sensibilidad a la variación del precio del mineral, debido a que los costos productivos son bastante elevados y el negocio solo es sustentable cuando los precios son altos.

“La historia de los grandes yacimientos descubiertos en Chile está relacionada con algún pirquinero o pequeño productor que estuvo allí haciendo su trabajo [...]” (Manuel Viera, presidente de la Cámara Minera de Chile). Cualquier política o medida que apoye al pequeño sector minero será muy positiva para la nación, y deben apuntar al escalamiento de las operaciones para que algún día estas empresas se conviertan a la Mediana Minería. En este sentido, el Ministerio de Minería, el SERNAGEOMIN y la ENAMI cumplen un rol fundamental al desarrollar variados instrumentos de fomento para apoyar el crecimiento de la Pequeña Minería y la Minería Artesanal, como capacitaciones, asistencia técnica y crediticia, estudios distritales, arriendo de equipos y terrenos, entre otros.

Generalmente, la única formación técnica que es proporcionada a los pequeños mineros es la heredada por generaciones previas de mineros. El “aprender haciendo” es una práctica muy común dentro de este segmento, por lo que no es sorprendente que estas categorías presenten altas tasas de accidentabilidad, sobre todo en lo asociado a caídas de rocas o planchones. El accidente tipificado por SERNAGEOMIN como “Golpeado por roca” es el más común en toda la industria, y también en la Pequeña Minería y la Minería Artesanal. Asimismo, los análisis realizados en la presente memoria evidenciaron que las operaciones auxiliares de Fortificación y Acuñadura son las más riesgosas y en las que se han generado la mayoría de los accidentes, producto de falta de conocimiento técnico y ausencia de medidas preventivas para la caída de rocas.

A pesar de no haber podido realizar visitas a terreno, el estudio de fotografías de visitas anteriores fue de gran utilidad para conocer de forma más cercana lo que sucede realmente en las faenas pequeñas. Igualmente, dicha base de registros fue esencial para el desarrollo de la nueva metodología para la evaluación del macizo rocoso. Esta alternativa de metodología es una opción viable para la determinación cualitativa de la calidad del macizo rocoso por los mismos pirquineros, pensada como una herramienta simple y adecuada a sus conocimientos técnicos y acceso a recursos, sin necesidad de realizar ensayos costosos y dificultosos. Se espera que en etapas posteriores del proyecto del *Handbook* la metodología propuesta pueda ser ajustada y validada, para presentarla como un resultado concreto junto con la Guía de Geomecánica.

Finalmente, se destaca la importancia de desarrollar un plan de masificación integral, con un enfoque educativo y psicológico desde los principios de la Andragogía, que permita que todo el trabajo desarrollado durante el proyecto sea efectivo y que se cumplan todos los objetivos planteados desde el inicio. En resumen, el desarrollo y crecimiento de la Pequeña Minería y la Minería Artesanal dependen fuertemente de las decisiones y políticas aplicadas por las autoridades mineras, y solo seguirá siendo posible mientras esta premisa se mantenga dentro de las prioridades del país.

10 Referencias

- CASTILLO, P., HERNÁNDEZ, H. (2020). Nube Minera. Curso de Explotación Minera a Pequeña Escala (EPM). Recuperado el 29 de diciembre de 2020, de: <https://nubeminera.cl/course/pequena-mineria/>
- COLLAHUASI (2021). Collahuasi – Mucho más que cobre. Recuperado el 22 de Enero de 2021, de: <http://www.collahuasi.cl/>
- COMISIÓN CHILENA DEL COBRE (2020). Quienes Somos. Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de: <https://www.cochilco.cl/Paginas/Quienes-Somos/Descripci%C3%B3n-General.aspx>

EL REFERENTE (2019). La NASA publicó una impresionante fotografía satelital de Chuquicamata. Recuperado el 22 de Enero de 2021, de: <https://elreferente.cl/la-nasa-publico-una-impresionante-fotografia-satelital-de-chuquicamata/>

EMPRESA NACIONAL DE MINERÍA (2020). Sobre ENAMI. Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de: <http://www.enami.cl/SobreEnami>

FASCE, E (2006). Andragogía. Rev. Educ. Cienc. Salud 2006; 3 (2): 69-70. Recuperado el 05 de Enero de 2021, de: <http://www2.udec.cl/ofem/recs/anteriores/vol322006/esq32.pdf>

GONZÁLEZ DE VALLEJO, L.I., FERRER, M., ORTUÑO, L., OTEO, C (2004). Ingeniería Geológica. 1a ed. Madrid, España, 2004. 738 p.

MINISTERIO DE MINERÍA (2020). Misión institucional. Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de: <http://www.minmineria.gob.cl/misionimpu-institucional/>

RUMBO MINERO (2020). Perforación en Cotabambas expande mineralización de cobre en zona María José. Recuperado el 22 de Enero de 2021, de: <http://www.rumbominero.com/noticias/mineria/perforacion-en-cotabambas-expande-mineralizacion-de-cobre-en-zona-maria-jose/>

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (2020). Accidentabilidad Minera. Recuperado el 16 de Noviembre de 2020, de: <https://www.sernageomin.cl/accidentabilidad-minera/>

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (2020). Anuario de la Minería de Chile 2019. Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de: https://www.sernageomin.cl/pdf/anuario_2019_act100720.pdf

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (2020). Campaña de Seguridad Minera. Recuperado el 16 de Noviembre de 2020, de: <https://www.sernageomin.cl/campana-de-seguridad-minera/>

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (2013). Guías Título XV. Recuperado el 06 de Enero de 2021, de: <http://sitiohistorico.sernageomin.cl/sminera-guiasxv.php>

SERVICIO NACIONAL DE GEOLOGÍA Y MINERÍA (2020). Misión y Visión institucional. Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de: <https://www.sernageomin.cl/mision-y-vision-institucional/>

SOCIEDAD NACIONAL DE MINERÍA (2020). Quiénes somos. Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de: <https://www.sonami.cl/v2/acerca-de-sonami/>

SOCIEDAD NACIONAL DE MINERÍA, PETRÓLEO Y ENERGÍA (2004). Manual de Geomecánica aplicada a la prevención de accidentes por caída de rocas en minería subterránea. Recuperado el 12 de Octubre de 2020, de: <https://enriquemontalar.com/manual-de-geomecanica-aplicada-a-la-prevencion-de-accidentes-por-caida-de-rocas-en-mineria-subterranea/>