

Desde el cobre a la innovación

Roadmap Tecnológico 2015-2035

Coordinado por Fundación Chile



CORFO



FCH
FUNDACIÓN CHILE



Desde el cobre a la innovación

Roadmap Tecnológico 2015-2035



Esta publicación fue elaborada en el marco del Programa Nacional de Minería Alta Ley

Primera edición

Santiago, 2016

Comité editorial

Fundación Chile · Hernán Araneda · Francisco Klima · Marcos Kulka · Patricio Meller · Enrique Molina · Andrés Pesce
Programa Alta Ley · Mauro Valdés

Equipo de redacción y desarrollo de contenidos

Fundación Chile · Manuel Arre · Carolina Águila · Marietta Barsocchini · Mauricio Becerra · Ulrike Broschek · Olaya Cambiaso · Axel Dourojeanni · Tomás González · Milena Grunwald · Javiera Iribarren · Roberto Larraechea · Macarena León · Ricardo Morgado · Ángela Oblasser · Paulina Peña · Mauricio Rodríguez · Philip Wood
Corfo · Jonathan Castillo
MICOMO · Luis Felipe Mujica

Equipo de edición

Fundación Chile · Carmen Gloria Solís · Nicole Valdebenito · Consuelo Montalva
Independiente · José Miguel Valenzuela · Gerardo de la Maza

Se agradece la valiosa colaboración de

Marcela Angulo · Eduardo Bitran · Jorge Cantalloppts · Cleve Lightfoot · Claudio Maggi · Ignacio Moreno · Ricardo Muhr · Petar Ostojic · Víctor Pérez · Jaime Rivera · Pedro Sierra · Agustín Sepulveda · Osvaldo Urzúa

Diseño y diagramación

MagiaLiquid

Impresión

A IMPRESORES

ISBN

978-956-8200-30-5

Elaborado por



Este libro fue realizado con el apoyo del Ministerio de Minería y de Corfo, en el marco del convenio de cooperación que ambas entidades sostienen con Fundación Chile.



Con el apoyo de



ÍNDICE

CARTAS PRESENTACIÓN	19
DIRECTORIO PROGRAMA NACIONAL DE MINERÍA ALTA LEY	36
PROLOGO	45
SÍNTESIS EJECUTIVA	49
CAPÍTULO 1	59
ROL DEL COBRE EN LA ECONOMÍA CHILENA	
CAPÍTULO 2	79
LÓGICA Y METODOLOGÍA DE LA HOJA DE RUTA TECNOLÓGICA	
HOJAS DE RUTA TECNOLÓGICAS: EXPERIENCIAS INTERNACIONALES Y MEJORES PRÁCTICAS	81
METODOLOGÍAS Y ETAPAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA HOJA DE RUTA DE LA MINERÍA CHILENA	83
Construcción y validación de la visión	84
Identificación de desafíos tecnológicos y priorización de núcleos de trabajo	85
Talleres de elaboración de la Hoja de Ruta	89
Validación de la Hoja de Ruta	92
EL CASO DE AMIRA COPPER TECHNOLOGY ROADMAP 2004 - 2006	94
Componentes de la presente Hoja de Ruta y sus diferencias respecto del trabajo de Amira	96
CAPÍTULO 3	99
LA MINERÍA DEL FUTURO, VISIÓN AL 2035	
VISIÓN ESTRATÉGICA AL 2035 Y PRINCIPALES MÉTRICAS DE IMPACTO	101
Métricas de impacto	102
Brecha en la capacidad de producción	104
Brecha en los costos de la industria	106
Brecha en empresas proveedoras de clase mundial	107

Brecha en exportación de bienes y servicios asociados a la minería	109	MINERÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO: TRANSICIÓN HACIA UNA ECONOMÍA CIRCULAR	183
DIVERSIFICACIÓN PRODUCTIVA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN TORNO LA MINERÍA	111	CAMBIOS NORMATIVOS Y NUEVOS USOS DEL COBRE	191
Introducción	111	Desafíos de un Escenario Normativo Complejo	193
El desarrollo en torno a la minería: un proceso evolutivo	117	Una Brecha de Capacidades Profesionales y Técnicas	194
Una Hoja de Ruta (Roadmap) para la Etapa III	120	Innovación y Promoción de Usos Sustentables del Cobre	195
CAPÍTULO 4 DESAFÍOS DE LA MINERÍA CHILENA	123	CAPÍTULO 5 NÚCLEOS TRACCIONANTES	199
ESCENARIO ACTUAL Y DESAFÍOS DE CORTO PLAZO	125	NÚCLEO RELAVES	201
Costos de la industria minera	125	Antecedentes	201
Productividad de la industria minera	130	Catastro de los depósitos de relaves en Chile	208
Problemas regulatorios, sostenibilidad y licencia social	133	Desafíos, soluciones y líneas de I+D	212
EVOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD DE EXPLORACIÓN, LOS RECURSOS Y LAS RESERVAS DE COBRE EN CHILE	143	NÚCLEO FUNDICIÓN Y REFINERÍA	228
Evolución de los recursos y reservas en Chile	147	Antecedentes	228
Gestión de la propiedad minera en Chile	151	Situación actual de las fundiciones y refinerías en Chile	232
Concentración de la propiedad	152	Desafíos, soluciones y líneas de I+D	242
Utilización de la propiedad	156	NÚCLEO OPERACIÓN Y PLANIFICACIÓN MINERA	260
Actividad exploratoria	158	Antecedentes	260
CONDICIONES PARA POTENCIAR LA EXPLORACIÓN MINERA EN CHILE	163	Desafíos, soluciones y líneas de I+D	268
ENERGÍA	165	NÚCLEO CONCENTRACIÓN DE MINERALES	292
AGUA	174	Antecedentes	292
		Desafíos, soluciones y líneas de I+D	299

NÚCLEO HIDROMETALURGIA	316	POTENCIAR LA ACTIVIDAD DE	374
Antecedentes	316	EXPLORACIÓN EN CHILE	
Desafíos, soluciones y líneas de I+D	320		
CAPÍTULO 6	339	HABILITAR EL DESARROLLO DE UNA	376
NÚCLEOS HABILITADORES		MINERÍA INTELIGENTE	
CAPITAL HUMANO	341	DESARROLLO DE CAPITAL HUMANO	378
Capital Humano Especializado	341	ESPECIALIZADO ACORDE A LOS	
Capital Humano Avanzado	344	REQUERIMIENTOS ACTUALES Y FUTUROS	
		DE LA INDUSTRIA	
PROVEEDORES E INNOVACIÓN	352	BIBLIOGRAFÍA	381
MINERÍA INTELIGENTE	355		
CAPÍTULO 7	361		
PRIORIDADES ESTRATÉGICAS PARA LA			
IMPLEMENTACIÓN DEL ROADMAP			
MINERÍA SUBTERRÁNEA: DESARROLLO	363		
DE UNA MINERÍA PROFUNDA A GRAN			
ESCALA			
MEJORAR LA COMPETITIVIDAD DE LAS	365		
FUNDICIONES Y REFINERÍAS			
RELAVES MINEROS: ENFRENTAR LA	368		
CRECIENTE ESCASEZ DE SUPERFICIE Y			
MINIMIZAR SU IMPACTO			
MEJORA DE PRODUCTIVIDAD EN LA	370		
MINERÍA A CIELO ABIERTO: MOVIMIENTO			
DE GRANDES VOLÚMENES DE TIERRA A			
TRAVÉS DE LARGAS DISTANCIAS			
POTENCIAR EL DESARROLLO DE	372		
PROVEEDORES INTENSIVOS EN			
CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA			

ÍNDICE DE DIAGRAMAS, FIGURAS, GRÁFICOS Y TABLAS

FIGURAS

Figura 1 / Comparación de población, PIB y reservas de cobre entre China y Chile	67
Figura 2 / Etapas para la construcción de la Hoja de Ruta	84
Figura 3 / Núcleos Hoja de Ruta y metas al 2035	88
Figura 4 / Estructura de trabajo núcleos traccionantes	90
Figura 5 / Síntesis del proceso de construcción de HRT	91
Figura 6 / Línea base 2015 y metas al 2035	103
Figura 7 / Círculo virtuoso, construyendo nuevas capacidades a partir de los desafíos	112
Figura 8 / Proveedores de servicios, tecnologías y equipos mineros (STEM)	114
Figura 9 / Portafolio con una visión integral de esfuerzos	116
Figura 10 / El proceso evolutivo de desarrollo de minería – historia y proyección	118
Figura 11 / Uso de agua de mar en la minería de cobre 2009-2014	129
Figura 12 / Uso de agua de mar en la minería de cobre 2009-2014 (%)	129
Figura 13 / Fiscalizaciones realizadas por la SMA en 2013	135

Figura 14 / Fiscalizaciones realizadas por la SMA en 2014	136	Gráfico 2 / Producción de Cobre de Chile 1950-2014 (miles de TM) n°2	63
Figura 15 / Concentración de propiedad minera en las regiones XV, I y II	153	Gráfico 3 / Participación de Chile en la producción mundial de cobre	66
Figura 16 / Estimación de pertenencias mineras	157	Gráfico 4 / Participación de Chile en las reservas mundiales de cobre	67
Figura 17 / Diagrama economía circular	186	Gráfico 5 / Valor de las exportaciones de cobre 1960 – 2014 (MM US\$)	70
Figura 18 / Las cuatro dimensiones de la gestión sustentable de un producto	192	Gráfico 6 / Participación de las exportaciones de cobre en las exportaciones totales de bienes de Chile, 1960 – 2014.	71
Figura 19 / Composición de un tranque de relaves	202	Gráfico 7 / Participación del cobre en los ingresos fiscales de 1995 – 2014	72
Figura 20 / Recursos futuros mineros Zona Central	207	Gráfico 8 / Evolución del aporte del cobre al fisco 1995 – 2014	72
Figura 21 / Estado de depósito de relaves en Chile según región	209	Gráfico 9 / Capacidad estimada de producción de cobre mina en Chile al año 2026 kt de Cu fino	105
Figura 22 / Las fases de la conversión y niveles de estudio	265	Gráfico 10 / Estructura de costos de la industria minera en Chile, según cuartiles	107
Figura 23 / Productividad per cápita versus desarrollo digital	357	Gráfico 11 / Ley promedio de mineral de cobre en las operaciones mineras en Chile por tipo de proceso	126
GRÁFICOS		Gráfico 12 / Consumo nacional de energía en la minería del cobre 2001-2014	127
Gráfico 0 / Proyección del precio del cobre para el periodo 2015 - 2035	47	Gráfico 13 / Evolución de la productividad, medida como PTF, en la minería del cobre	131
Gráfico 1 / Producción de Cobre de Chile 1950-2014 (miles de TM) n°1	62		

Gráfico 14 / Productividad laboral en la minería del cobre y remuneraciones 2006 – 2014	132	Gráfico 26 / Consumo eléctrico nacional de la minería del cobre 2014-2015, según los casos Máximo, Esperado y Mínimo 2014-2015 (Terawatts-hora)	166
Gráfico 15 / Tiempo promedio (en días) para la obtención de una RCA	133	Gráfico 27 / Consumo eléctrico esperado de la minería del cobre por procesos a nivel nacional	169
Gráfico 16 / Emisiones de GEI directos por proceso	139	Gráfico 28 / Proyección de la demanda acumulada de potencia eléctrica, medida en MW, requerida por la minería del cobre a partir del 2015 en el SING, SIC y total nacional.	171
Gráfico 17 / Coeficientes unitarios de emisiones de GEI por tonelada de cobre fino	140	Gráfico 29 / Evolución del consumo esperado de agua fresca y de mar en la minería de cobre 2009-2026 (b) (m3/s).	175
Gráfico 18 / Proyectos de inversión en minería n°1	141	Gráfico 30 / Relación entre mineral tratado y cobre fino contenido en el concentrado producido	203
Gráfico 19 / Proyectos de inversión en minería n°2	142	Gráfico 31 / Número de tranques de relave según metal de beneficio	210
Gráfico 20 / Total reservas de cobre en el mundo y vida útil estimada	148	Gráfico 32 / Capacidades y tecnologías fundiciones chilenas	232
Gráfico 21 / Evolución reservas de cobre en Chile	149	Gráfico 33 / Tecnología de la electro-depositación (Cátodos permanentes)	236
Gráfico 22 / Evolución hectáreas concesionadas (Millones de ha).	152	Gráfico 34 / Tecnología de la electro-depositación (Láminas iniciales)	237
Gráfico 23 / Porcentaje de área transada promedio por región en el período 2006-2013	155	Gráfico 35 / Tecnología de refinación v/s productividad (HH/t catch) (Cátodos permanentes)	238
Gráfico 24 / Evolución gasto en exploración mundial y participación de Chile	159		
Gráfico 25 / Gasto en exploración en Chile por etapa (Millones US\$).	161		

Gráfico 36 / Tecnología de refinación v/s productividad (HH/t catch) (Láminas iniciales)	239	Tabla 3 / Índice de Rendimiento de la Arquitectura Energética (EAPI) 2015	173
Gráfico 37 / Mineral extraído en Chile y el mundo, 2000-2030	261	Tabla 4 / Capacidad instalada de uso de agua de mar en minería del cobre	177
Gráfico 38 / Desglose por etapas del gasto en operación del proceso de concentración	295	Tabla 5 / Caracterización de operaciones en base a agua fresca n°1	179
Gráfico 39 / Costo operacional de la etapa de molienda	296	Tabla 6 / Caracterización de operaciones en base a agua fresca n°2	180
Gráfico 40 / Balance oferta- demanda de bolas de acero (2014-2025)	297	Tabla 7 / Incidentes recientes asociados a depósitos de relaves a nivel mundial	204
Gráfico 41 / Producción esperada de cobre en Chile al 2026	317	Tabla 8 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / enfrentar la creciente escasez de agua y superficie	213
Gráfico 42 / Demanda acumulada de internos y proveedores [Miles de personas]	342	Tabla 9 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / minimizar el impacto de las infiltraciones y asegurar la estabilidad de los depósitos	216
Gráfico 43 / Programas de postgrado para minería	347	Tabla 10 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / promover la conversión desde un pasivo a un activo	219
Gráfico 44 / Matrículas de los programas vinculados a minería	350	Tabla 11 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / propiciar la inclusión y aceptación comunitaria	220
TABLAS			
Tabla 1 / Proveedores de clase mundial	108	Tabla 12 / Margen Bruto Fundición	233
Tabla 2 / Exportación y número de empresas proveedoras 2010 – 2014	109	Tabla 13 / Margen Bruto Refinerías	234
		Tabla 14 / Brechas de productividad de las fundiciones chilenas	243

Tabla 15 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / aumentar la eficiencia de los procesos de fundición y refinería	244	Tabla 26 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / cuidado del medio ambiente y responsabilidad social	320
Tabla 16 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / disminuir el impacto medioambiental	247	Tabla 27 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / aumento de la productividad	321
Tabla 17 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / mejorar las condiciones laborales	249	Tabla 28 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / incremento de los recursos y reservas minerales	322
Tabla 18 / Mayores operaciones en Chile (principalmente rajo) y su aporte de cobre fino	263	Tabla 29 / Personal dedicado a I+D en empresas mineras (2013)	345
Tabla 19 / Desafíos y fases del núcleo operaciones y planificación minera	269	Tabla 30 / Objetivo de la investigación desagregado	346
Tabla 20 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / Aumento de la productividad	271	Tabla 31 / Minería subterránea / Desarrollo de una minería profunda a gran escala	364
Tabla 21 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / Incremento de los recursos y reservas minerales	275	Tabla 32 / Mejorar la competitividad de las Fundiciones y Refinerías	366
Tabla 22 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / Cuidado del medio ambiente y responsabilidad social	276	Tabla 33 / Relaves mineros / enfrentar la creciente escasez de superficie y minimizar su impacto	369
Tabla 23 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / Mayor seguridad y calidad en los ambientes de trabajo	277	Tabla 34 / Mejora de productividad en la minería a cielo abierto / movimiento de grandes volúmenes de tierra a través de largas distancias	371
Tabla 24 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / aumento de la productividad	300	Tabla 35 / Potenciar el desarrollo de proveedores intensivos en conocimiento y tecnología	373
Tabla 25 / Soluciones y líneas de I+D. Desafío / incremento de los recursos y reservas minerales	301	Tabla 36 / Potenciar la actividad de exploración en Chile	375

Tabla 37 / Habilitar el desarrollo de una minería inteligente	377	Infografía 5: Vigilancia Tecnológica Refinería (Patentes)	256
Tabla 38 / Desarrollo de capital humano especializado acorde a los requerimientos actuales y futuros de la industria	379	Infografía 6: Vigilancia Tecnológica Refinería (Publicaciones)	258
		Infografía 7: Vigilancia Tecnológica Planificación (Patentes)	280
DIAGRAMAS HOJA DE RUTA DE MINERÍA			
Diagrama 1 / Núcleo Relaves	222	Infografía 8: Vigilancia Tecnológica Planificación (Publicaciones)	282
Diagrama 2 / Núcleo Fundición y Refinerías	250	Infografía 9: Vigilancia Tecnológica Exploración (Patentes)	284
Diagrama 3 / Núcleo Operación y Planificación Minera	278	Infografía 10: Vigilancia Tecnológica Exploración (Publicaciones)	286
Diagrama 4 / Núcleo Concentración de Minerales	302	Infografía 11: Vigilancia Tecnológica Operación (Patentes)	288
Diagrama 5 / Núcleo Hidrometalurgia	324	Infografía 12: Vigilancia Tecnológica Operación (Publicaciones)	290
INFOGRAFÍAS			
Infografía 1: Vigilancia Tecnológica Relaves (Patentes)	224	Infografía 13: Vigilancia Tecnológica Chancado (Patentes)	304
Infografía 2: Vigilancia Tecnológica Relaves (Publicaciones)	226	Infografía 14: Vigilancia Tecnológica Chancado (Publicaciones)	306
Infografía 3: Vigilancia Tecnológica Fundición (Patentes)	252	Infografía 15: Vigilancia Tecnológica Molienda (Patentes)	308
Infografía 4: Vigilancia Tecnológica Fundición (Publicaciones)	254	Infografía 16: Vigilancia Tecnológica Flotación (Publicaciones)	310
		Infografía 17: Vigilancia Tecnológica Molienda (Patentes)	312

Infografía 18: Vigilancia Tecnológica Flotación (Publicaciones)	314
Infografía 19: Vigilancia Tecnológica Electro-obtención (Patentes)	326
Infografía 20: Vigilancia Tecnológica Electro-obtención (Publicaciones)	328
Infografía 21: Vigilancia Tecnológica Extracción por solventes (Patentes)	330
Infografía 22: Vigilancia Tecnológica Extracción por solventes (Publicaciones)	332
Infografía 23: Vigilancia Tecnológica Lixiviación (Patentes)	334
Infografía 24: Vigilancia Tecnológica Lixiviación (Publicaciones)	336



Fotografia Codalco (vista aerea Radomiro Tomic)





LUIS FELIPE CÉSPEDES

Ministro de Economía,
Fomento y Turismo

La minería es una de las principales fuentes de progreso que ha acompañado a Chile a lo largo de toda su historia reciente. A partir de ella se han generado gran parte de los ingresos que han permitido financiar obras de infraestructura, hospitales y colegios. También la ampliación de la cobertura en educación, distintos programas y beneficios sociales y una serie de otros logros de los cuales, como país, podemos sentirnos orgullosos. En la evolución de la industria minera hemos visto también el paso de generaciones de trabajadores, lo que ha forjado la cultura y el desarrollo profesional de millones de chilenos y chilenas.

Pero la minería es por sobre todo futuro. Aquí están y seguirán estando las fuentes de oportunidades para un Chile que se encamina al desarrollo y a la formación de una sociedad más equitativa.

El Chile de las próximas décadas debe descansar sobre nuevos pilares de desarrollo económico. Para ello es indispensable una mayor diversificación productiva, en especial en torno a sectores que incorporen mayor conocimiento. Y como gobierno estamos convencidos que para ser efectiva, una estrategia de este tipo no puede darle la espalda a la minería, sino por el contrario debe construirse a partir de ella.

Y es que la minería de las próximas décadas enfrentará enormes desafíos. Se requerirá de un esfuerzo considerable en términos de innovación, desarrollo tecnológico, formación de capital humano y por sobre todo capacidad de coordinación y articulación para compatibilizar legítimos intereses ambientales y sociales. Pero estos desafíos son asimismo una oportunidad clara de apalancar nuestra posición de potencia

en explotación de minerales, y convertirnos en líderes en la exportación de bienes y servicios vinculados a la minería. Y a partir de ese conocimiento y capacidades, de apoyar el desarrollo y capacidad exportadora de otras industrias. Esta mirada de futuro requiere de la acción y del compromiso de todos: del sector público, las empresas, la academia, los trabajadores y la sociedad civil. La clave está en que como país no dispersemos los esfuerzos, sino que generemos espacios permanentes de coordinación y articulación en pos de un objetivo común.

Estos elementos forman la columna vertebral de la Agenda de Productividad, Innovación y Crecimiento que lidera el Ministerio de Economía. Pilar fundamental de ella son los Programas Estratégicos, política que hemos comenzado a implementar y de la cual esta Hoja de Ruta es el primer resultado concreto. En estos Programas buscamos acelerar la innovación, la productividad y el crecimiento a través de esfuerzos aunados que resuelvan problemas específicos de nuestras industrias y que requieren un Estado coordinado, conocimiento de punta y un sector privado comprometido y con una mirada de futuro. Estos programas buscan consensuar una visión de desarrollo para el sector, detectando y analizando las principales brechas de competitividad y generando acciones concretas que las resuelvan, las que se plasman en hojas de ruta.

La Hoja de Ruta del Programa Nacional de Minería Alta Ley, que aquí se presenta, es el resultado de esta alianza. Aquí se proyectan acciones consensuadas, claras y potentes, una agenda concreta para lograr una mayor productividad en el sector en las próximas décadas, a través del desarrollo de proveedores de alto nivel, investigación de punta, desarrollo tecnológico para incrementar la automatización, sustentabilidad y transparencia ambiental y social. Es un compromiso transversal, esencial para sostener nuestro crecimiento y desarrollo en base a la colaboración y confianza. Contiene además, una serie de metas e indicadores con las correspondientes acciones que permitirán alcanzar los objetivos trazados.

Como Gobierno, estamos convencidos que a través de la colaboración público-privada en torno a la innovación, el conocimiento y la sustentabilidad, Chile consolidará su desarrollo. La Hoja de Ruta de Minería es un paso esencial. Nuestro agradecimiento es a todos quienes han participado y seguirán participando de este esfuerzo. Y es que son muchas las personas y organizaciones que han compartido su tiempo, conocimiento y experiencia, poniendo por delante el interés de Chile. Y como esta es una carrera de largo aliento, nuestro compromiso y llamado es a consolidar este esfuerzo, permitiendo que perdure y se proyecte en el tiempo.



AURORA WILLIAMS BAUSSA

Ministra de Minería

Como una industria de nivel mundial, la minería chilena ha logrado un impacto fundamental en la economía nacional y, al mismo tiempo, ha acumulado una experiencia destacada durante las últimas décadas. Este conocimiento de la actividad nos ha llevado a comenzar una nueva etapa de desarrollo, más sofisticada y exigente.

Con importantes inversiones planificadas para los próximos años, el país está en condiciones de elaborar una mirada de futuro ambiciosa.

Es lo que nos plantea hoy la Hoja de Ruta de la Minería que estamos presentando, y que ha sido construida colectivamente por los actores del sector minero, lo que se traducirá en una política pública estable y permanente.

Sin duda, es un logro importante, porque nos planteamos el concepto de una industria aún más eficiente y comprometida con el medio ambiente. Hablamos de una minería virtuosa, con altos estándares, sostenible, e inclusiva, contribuyendo así a mejorar la calidad de vida de las generaciones actuales y futuras.

La minería puede seguir aportando en el bienestar de los chilenos. Para ello debe actuar con sentido de urgencia y, definitivamente, lograr el desarrollo del clúster minero. Es el camino para alcanzar un potente encadenamiento productivo y transformar a Chile, no solo en exportador de minerales, sino que en un importante exportador de bienes y servicios.

Por lo anterior, debemos concentrar los esfuerzos en potenciar a la minería como un gran motor de innovación tecnológica y desarrollar una industria de proveedores de clase mundial. Y tal como se menciona en el documento Minería: Una plataforma de futuro para Chile, "Una minería de estas características será una fuente de inspiración para el país, que permitirá abrir rutas culturales y científicas que están en la frontera del conocimiento mundial".



EDUARDO BITRAN COLODRO

Vicepresidente Ejecutivo de Corfo

Chile enfrenta el desafío de acelerar el proceso de convergencia de su ingreso per cápita al de los países desarrollados. Actualmente, este índice ha alcanzado cerca del 60% del promedio de los países de OCDE. Hoy, el mayor desafío que enfrenta el país, para seguir convergiendo al nivel de PIB per cápita de las economías desarrolladas, es aumentar la tasa de crecimiento de la productividad, la que desde el año 2000 ha caído a un tercio de la observada en la década previa. Esta caída del crecimiento de la productividad se explica, principalmente, por una declinación de la productividad en sectores de recursos naturales, que fueron los que tiraron el carro del crecimiento en los años noventa. De particular relevancia es la declinación en la productividad total de factores en la minería, sector que por sí solo explica la mayor proporción de la caída de la productividad global de la economía.

La minería enfrenta un progresivo agotamiento de sus reservas de bajo costo y crecientes restricciones medioambientales y energéticas que explican el deterioro de productividad. La declinación del precio del cobre ha afectado la inversión en el sector, acentuado el efecto en el crecimiento de corto plazo.

Pese al difícil escenario de la minería de cobre, hoy existe consenso en que Chile debe aprovechar sus reservas de este mineral, pasando de un enfoque de actividad extractiva a una minería virtuosa que desarrolla proveedores sofisticados, incorpora tecnología y genera capacidades de I+D en el país. Esto permitirá a la minería abordar con innovación, tecnología e inversión en capital humano los enormes desafíos de productividad y sustentabilidad que el sector enfrenta, generando encadenamientos productivos y negocios basados en conocimiento que nos transformen en un país exportador de servicios y tecnología sofisticados. La minería es posiblemente la única actividad económica en que nuestro

país tiene la escala y demanda para generar empresas de bienes y servicios sofisticados que nos permitan competir globalmente y, por tanto, la oportunidad para desarrollar una actividad exportadora basada en conocimiento es evidente.

No obstante, esto requiere un cambio de enfoque en la relación entre las empresas mineras y sus proveedores, pasando de una relación predominantemente transaccional a una visión de valor compartido, de modo de abordar conjuntamente los desafíos del sector. Los centros de investigación y empresas de base tecnológica, por su parte, deben orientar sus capacidades y proyectos hacia los desafíos del sector, proponiendo nuevos modelos de negocio y soluciones que impacten de forma significativa en la productividad y sustentabilidad del negocio minero. El Estado Chileno está disponible para co-financiar la inversión en capacidades y conocimiento en estos ámbitos.

Con el fin de desarrollar una agenda de innovación que tenga un impacto significativo en sofisticación y diversificación productiva, Corfo está apoyando, con un enfoque de especialización inteligente, la generación de bienes públicos, capital humano y conocimiento específico, tomando a la minería como un sector emblemático. Este enfoque incorpora a expertos del sector público, empresarial, y académico además de actores de la sociedad civil, con el fin de establecer hojas de ruta que permitan aprovechar las oportunidades identificadas, remover obstáculos y generar trayectorias de innovación que aumenten la productividad y crecimiento de la economía. El desafío institucional es vincular el sistema nacional de innovación, con sus diversos instrumentos y actores, con las dinámicas de desarrollo de sectores de alto potencial de sofisticación, diversificación y crecimiento.

La minería, a través del Programa Alta Ley, ha dado un paso fundamental en la dirección descrita, al consensuar en un ejercicio altamente colaborativo una Hoja de Ruta que nos permita focalizar los esfuerzos de innovación tecnológica en este sector. Durante el año 2015, más de 150 actores claves han trabajado en forma rigurosa para converger en un conjunto de prioridades

para la inversión pública y privada en innovación. El presente documento constituye el primer ejemplo de una forma de trabajo inédita en el país y que, esperamos, se traduzca en resultados visibles en la próxima década, fortaleciendo a la minería como una plataforma de innovación y pilar clave del tránsito de Chile hacia una economía más basada en el conocimiento.



JOAQUÍN VILLARINO HERRERA

Presidente Ejecutivo Consejo Minero

La minería enfrenta en Chile un conjunto de desafíos de gran magnitud para seguir contribuyendo al país en forma competitiva y sustentable, con los correspondientes beneficios que esto implica para el desarrollo y bienestar de su gente.

Durante los tres últimos años ha existido un trabajo de reflexión profunda de los diversos actores interesados en el desarrollo sólido y sustentable de la Gran Minería en Chile. En 2013 el Consejo Minero publicó el documento Minería 2020: Competitividad y Desarrollo, que resume los diagnósticos y propuestas sectoriales en estas materias. Posteriormente se han desarrollado otras agendas, como la liderada por el ex presidente Ricardo Lagos, que a su vez dio origen al documento Minería: Una Plataforma de Futuro para Chile, publicado en diciembre 2014, y que propone una minería virtuosa, sostenible e inclusiva.

Recientemente, el Consejo Minero e ICARE convocaron a diversos actores a una reflexión que denominamos "2016 el Año de la Productividad. Otra Mirada para el Crecimiento". En la ocasión se realizó una encuesta que nos permitió obtener una lista priorizada de desafíos claves para la minería, que requieren de buena política pública. Entre éstos, obtuvieron los tres primeros lugares los siguientes: la productividad en los procesos mineros, la innovación productiva en el sector y la disponibilidad del capital humano para operar en un entorno de creciente tecnologización, y que aspira a operar con altos grados de productividad.

Durante 2015 el Ministerio de Economía puso en marcha el Programa Nacional de Minería Alta Ley, que recoge las visiones ampliamente concordadas en los informes previos y que se propone alinear la inversión pública y privada con las prioridades de investigación y desarrollo tecnológico identificadas en los informes mencionados. El Consejo Minero, y las compañías que

lo componen, han participado activamente en este esfuerzo de análisis prospectivo y de construcción de una Hoja de Ruta que articule estos esfuerzos, con una mirada de largo plazo.

En el Consejo Minero pensamos que el sector necesita contar con políticas públicas adecuadas, que apoyen y estimulen la concreción de las inversiones que son claves para dar el salto en producción que, como lo señala el presente informe, puede hacer que Chile mantenga su liderazgo en el mercado global del cobre y continúe jugando el rol clave que hasta ahora ha tenido, para el desarrollo y bienestar de los chilenos. En tal sentido, celebramos el resultado del esfuerzo colaborativo del último año, que se expresa en el presente documento.

Confiamos en que los desafíos identificados y las rutas para abordarlos se traduzcan en una agenda de política pública efectiva en materia de investigación, desarrollo e innovación y en el fortalecimiento de aspectos habilitantes claves como son el capital humano y las capacidades tecnológicas y empresariales de las empresas proveedoras del sector.



MAURO VALDÉS RACZYNSKI

Presidente Programa Nacional
de Minería Alta Ley

Durante el año 2015 hemos puesto en marcha el Programa Nacional de Minería Alta Ley, trabajando codo a codo con distintos actores de la minería chilena -autoridades, compañías mineras, proveedores, emprendedores y representantes de la academia- para alcanzar un doble propósito: por un lado, fortalecer y dinamizar la minería chilena para mantener y consolidar nuestro liderazgo a nivel mundial, y por otro, fomentar un sistema de innovación abierta que aproveche la existencia y liderazgo de esta industria, y sus desafíos, todo esto con el fin de desarrollar las capacidades humanas, institucionales, de emprendimiento y de innovación que son indispensables para transitar desde una economía basada en recursos naturales a una basada en conocimiento.

El programa Alta Ley nace precisamente de la convicción de que el cobre y nuestra minería tienen un rol central en el desarrollo y la sustentabilidad del país. Más allá del financiamiento del presupuesto fiscal, más allá de la contribución a la balanza de pagos de Chile, la minería, nuestra principal industria, aquella por la cual somos conocidos a nivel global, tiene el potencial de abrirnos las puertas del futuro, las puertas de la innovación, del fortalecimiento de nuestro capital humano y del desarrollo institucional, científico y tecnológico.

Esta Hoja de Ruta es fruto de una inédita colaboración entre los actores señalados, y de una profunda lógica de beneficio mutuo: la minería puede y debe crecer, y al hacerlo virtuosa, inclusiva y sustentablemente se beneficia también el país.

En este trabajo hemos procurado especialmente identificar cuáles son los desafíos y problemas que enfrentamos actualmente en las distintas etapas de la cadena de valor de la minería (núcleos traccionantes), y cuáles son las capacidades que necesitamos

desarrollar y fortalecer para resolverlos (núcleos habilitadores). Señalar las intersecciones entre ambos tipos de ejes es clave para enfocar nuestros esfuerzos como proveedores, emprendedores y academia en materias mineras, para indicar con propiedad a las autoridades nacionales dónde podemos apalancar el desarrollo nacional con la minería, y para identificar con claridad dónde existen espacios de colaboración entre los distintos actores que nos impulsen hacia la economía de la innovación y del conocimiento. La rueda virtuosa ha empezado a moverse, y trabajaremos para que crezca y se expanda como una bola de nieve.

Por todo esto hemos bautizado este programa nacional como "Alta Ley". Las altas leyes de las cuales carecemos hoy en día en nuestras operaciones mineras, son precisamente las que nos impulsarán a desarrollar la alta ley del conocimiento. El conocimiento que prevalecerá más allá de las actuales operaciones mineras, más allá de la industria minera y de nuestras propias fronteras, y de paso, fortaleceremos las confianzas indispensables para avanzar al desarrollo y contribuiremos a dar una base sólida para las políticas públicas de largo plazo, que este sector requiere para operar y prosperar.

MARCOS KULKA KUPERMAN

Gerente General Fundación Chile

En los últimos dos años se ha logrado un importante consenso nacional sobre la urgencia de contar con una visión de largo plazo sobre el desarrollo de la minería del cobre en Chile. Previamente, predominó una visión rentista sobre la contribución de este sector, centrada en maximizar los ingresos que el país puede obtener de él, fundamentales para financiar las políticas públicas. Diversos antecedentes –que se analizan en el presente informe- indican que los desafíos que debe enfrentar la minería para mantener y potenciar su contribución al país requieren un cambio de enfoque.

En primer lugar la visión rentista no permite enfrentar adecuadamente los desafíos de sustentabilidad del sector, toda vez que se requieren importantes acuerdos entre los diversos actores –compañías, Estado, comunidades, entre otros- para concretar las inversiones que se proyectan para las próximas décadas.

En segundo lugar, y quizás más importante aún, el nuevo enfoque debe reconocer a la minería como una oportunidad única para que la economía de nuestro país avance hacia una basada en conocimiento y tecnología, contribuyendo a acercar la ansiada e indispensable meta de la diversificación productiva.

La participación de mercado que Chile ostenta en el negocio global del cobre (31%) y la magnitud de las reservas de cobre en el territorio (30% de las reservas mundiales) son señales inequívocas de la magnitud de la oportunidad que tenemos como país. La alta calificación de los profesionales que trabajan en el sector, la existencia de una creciente red de centros de investigación centrados en la minería y la incipiente generación de proveedores nacionales de clase mundial son también factores muy favorables.

En junio de 2014 un conjunto de actores de diversos ámbitos, liderados por el ex Presidente Ricardo Lagos, presentaron a la

Presidencia de la República el documento “**Minería y Desarrollo Sostenible de Chile. Hacia una Visión Compartida**”. El documento propone avanzar hacia una minería **virtuosa, inclusiva y sostenible**, y enuncia los grandes desafíos que esto supone (en el texto del presente documento se utiliza el término minería “innovadora” en lugar de “virtuosa”, para describir con mayor precisión el objetivo a lograr). En enero 2015 una comisión convocada por el Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo (CNID) hizo entrega a la Presidencia de la República de un nuevo documento que expande y profundiza los conceptos de minería innovadora, inclusiva y sostenible. Desde entonces el documento “**Minería: Una Plataforma de Futuro para Chile**” se transformó en la referencia para el desarrollo de agendas de trabajo específicas en los tres ámbitos mencionados.

En el caso de la minería **innovadora**, y como parte del Programa Estratégico de Especialización Inteligente impulsado por el Ministerio de Economía a través de Corfo, en octubre de 2015 se instituyó el Programa Alta Ley. La misión de Alta Ley es diseñar y acompañar la implementación de una estrategia para mejorar la competitividad de la minería en el largo plazo, fortaleciendo el contenido local y asegurando que el país disponga de las capacidades tecnológicas y del capital humano técnico-profesional y avanzado para sustentar los planes de crecimiento del sector.

La magnitud de esta tarea es formidable y no debe subestimarse. Se requiere persistencia, una fuerte inversión pública y privada y grados de colaboración inéditos entre los diversos actores de la cadena de valor de la minería chilena.

Pero además, se requiere una **hoja de ruta** o **carta de navegación** que, siendo de largo plazo, identifique desafíos específicos que puedan traducirse en un portafolio de I+D+i de alto potencial de agregación de valor. Ese es el propósito del ejercicio de *Technology Roadmapping* que Fundación Chile ha coordinado durante 2015 y cuyos resultados tenemos el orgullo de presentar.

Me permito agradecer al equipo técnico de Fundación Chile que ha trabajado con rigurosidad y profesionalismo en la construcción

de la Hoja de Ruta. En particular agradezco a Patricio Meller, presidente de Fundación Chile, por la visión, empuje y apoyo permanentes. También deseo reconocer a Hernán Araneda, Andrés Pesce, Francisco Klima, Enrique Molina, Tomás González, Nicole Valdebenito, Philip Wood, Cristóbal Arteaga, Ricardo Morgado, Olaya Cambiaso, Angela Oblasser, Luis Felipe Mujica, Manuel Arre y todos los profesionales de Fundación Chile que directa o indirectamente colaboraron en este esfuerzo. Vayan también los reconocimientos para todas las compañías, proveedores, asociaciones gremiales, expertos y entidades públicas que generosamente participaron en esta iniciativa. Sus nombres son presentados al interior de esta publicación.

Fundación Chile trabaja desde 2012 en dos iniciativas que anticipan la agenda de Alta Ley. La primera es el Programa de Proveedores de Clase Mundial y la segunda el Consejo de Competencias de la Minería, esta última junto al Consejo Minero. Ambas iniciativas confluyen naturalmente en este *Technology Roadmap*, junto a muchas otras que se requieren para lograr las metas planteadas para el 2035.

Finalmente, quiero agradecer particularmente a Corfo y al Ministerio de Minería por la confianza depositada en nuestra institución, y la oportunidad de haber contribuido en este momento decisivo de la historia de la minería en Chile.

DIRECTORIO PROGRAMA NACIONAL DE MINERÍA ALTA LEY



Mauro Valdés
Presidente Programa
Nacional de Minería
Alta Ley



Aldo Cipriano
Pontificia Universidad
Católica



Álvaro García
Valor Minero



Andrés Zahler
Ministerio de Economía



Carlos Orlandi
Minnovex



Carlos Urenda
Consejo Minero



Christian Nicolai
Conicyt



Claudio Maggi
Corfo



Cleve Lightfoot
BHP Billiton



Elías Arze
Minnovex



Fernando Cortéz
Asociación de Industriales
de Antofagasta



Ignacio Moreno
Ministerio de Minería



Jaime Álvarez
CNID



Jaime Rivera
Codelco



Javier Ruiz del Solar
AMTC



Joaquín Villarino
Consejo Minero



José Herrera
Enami



Marcela Angulo
Corfo



Marcos Kulka
Fundación Chile



Maximiliano Santa Cruz
Inapi



Marlene Sánchez
Corfo



María Cristina Betancour
Sonami



Osvaldo Urzúa
BHP Billiton



Pamela Chávez
Aguamarina



Pascual Veiga
Aprimin



Patricio Meller
Fundación Chile



Pedro Asenjo
Comité de Inversiones
Extranjeras



Pedro Sierra
Corfo



Petar Ostojic
Neptuno Pumps



Ricardo Álvarez
Mitsui



Ricardo Mühr
Antofagasta Minerals



Rodrigo Moya
Antofagasta Minerals



Rolando Carmona
Minnovex





PRÓLOGO

La visión que inspira esta Hoja de Ruta Tecnológica se estableció en el informe “**Minería y Desarrollo Sostenible en Chile. Hacia una Visión Compartida**” (Consejo de Innovación para el Desarrollo [CNID], 2014), el cual fue el resultado del trabajo de un grupo transversal conformado por políticos, ex ministros, empresarios, trabajadores y dirigentes sociales, encabezado por el ex Presidente Ricardo Lagos.

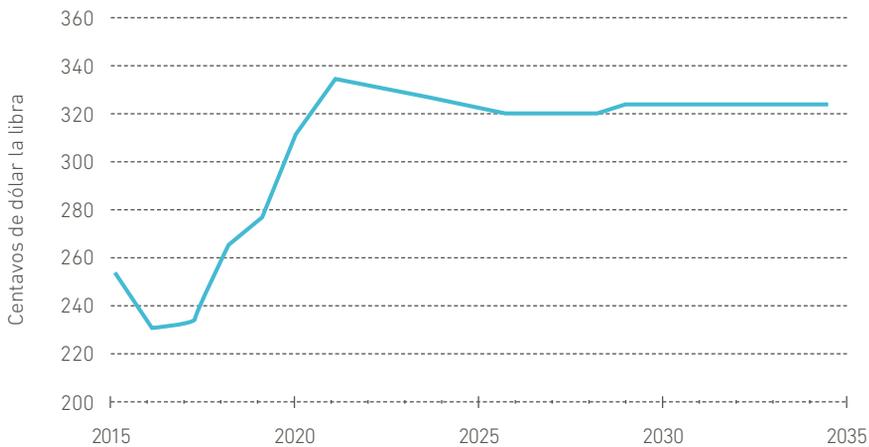
A partir de este informe, el CNID constituyó la “**Comisión Minería y Desarrollo de Chile**”, que elaboró la Agenda “**Minería: Una Plataforma de Futuro para Chile**” (2014), documento que define un conjunto de prioridades estratégicas para que la minería chilena consolide sus aspiraciones, reafirme su liderazgo a nivel mundial, genere un círculo virtuoso de innovación en su entorno y se convierta en un modelo de sustentabilidad e inclusividad. De aquí surgen dos programas público-privados cuya finalidad consiste en la elaboración de propuestas para la implementación del gran objetivo de transformar a la minería en un sector innovador, inclusivo y sustentable: La Alianza Valor Minero (presidida por Álvaro García) y el Programa Alta Ley (presidido por Mauro Valdés).

Con el apoyo de Corfo y el Ministerio de Minería, el Programa Alta Ley coordinó el proceso de construcción de esta Hoja de Ruta Tecnológica en la que participaron más de 150 expertos vinculados a más de 60 instituciones relacionadas con el sector minero, principalmente compañías mineras (Codelco, BHP Billiton, Antofagasta Minerals, Anglo American, Mitsui & Co Mineral Resources Development, Doña Inés de Collahuasi, Marubeni LP Holding), empresas proveedoras (Aguamarina, Neptuno Pumps, MICOMO), asociaciones gremiales (Consejo Minero, Sonami, Asociación de Industriales de Antofagasta, Minnovex, Aprimin, Asociación de Ingenieros Consultores, Asociación de Industriales de Iquique), universidades (Universidad de Chile, Universidad de Concepción, Universidad Católica, Universidad Católica del Norte, Universidad de Antofagasta y Universidad Adolfo Ibáñez), centros de I+D (AMTC, Fraunhofer) y entidades estatales (Corfo, Ministerio de Minería, Cochilco, Sernageomin, INAPI, Conicyt, Ministerio de Economía, Consejo Nacional de Innovación, Comité de Inversiones Extranjeras).

Esta Hoja de Ruta Tecnológica aparece ahora cuando estamos experimentando el fin del ciclo de precios altos del cobre. En efecto, el precio del cobre oscila actualmente en torno a los 210 centavos de dólar la libra y las proyecciones sugieren valores por debajo de los 240 centavos para este año y el próximo. No obstante lo anterior, queremos enfatizar que el foco de esta Hoja de Ruta Tecnológica es de largo plazo, vale decir que el objetivo es identificar los desafíos que enfrentará la producción de cobre chilena en los próximos 20 años, del 2015 al 2035.

GRÁFICO

Proyección del precio del cobre para el periodo 2015-2035



Se ha utilizado el promedio simple de ambas proyecciones.

Las estimaciones de precio están en dólares de 2016 (enero)

Fuente: Elaboración propia en base a estimaciones de CRU y Wood Mackenzie.

En consecuencia, lo pertinente es visualizar la evolución del precio del cobre en el largo plazo. Las proyecciones existentes (CRU Group, 2015; Wood Mackenzie, 2015) sugieren que el precio del cobre superará los 320 centavos de dólar a partir del año 2020.

Esta Hoja de Ruta Tecnológica ha sido posible gracias al importante apoyo de Corfo y el Ministerio de Minería, y a la cooperación de las compañías mineras, organizaciones gremiales, universidades, centros de I+D y a todos aquellos profesionales que contribuyeron con su conocimiento técnico en su elaboración.

SÍNTESIS EJECUTIVA

El impacto nacional de la producción de cobre ha aumentado considerablemente en las últimas dos décadas, influyendo en el diseño de las políticas públicas y en la estabilidad macroeconómica del país. Al considerar este planteamiento vale la pena preguntarse algunas cuestiones fundamentales: ¿Seguirá siendo el cobre el motor de la economía chilena? ¿Hasta cuándo va a cumplir ese rol? ¿El salto al desarrollo depende de este mineral?

La premisa tras esta Hoja de Ruta Tecnológica (HRT) radica en que el cobre puede desempeñar un rol crucial vinculado a la innovación tecnológica. Cuando un país representa el 30% de la producción mundial de un *commodity* y, además, posee un porcentaje similar de las reservas mundiales, cabe preguntarse: ¿por qué este país no es el centro mundial de la investigación, desarrollo e innovación tecnológica asociada a éste?

La producción cuprífera chilena actual es cercana a los 6 millones de toneladas métricas (TM). Debido al envejecimiento de los yacimientos y a la disminución de la ley del mineral, si no se efectúan importantes inversiones el nivel de producción caerá a 4 millones de TM al 2025. Dado que Chile tiene el 30% de las reservas mundiales,

se ha planteado como objetivo que mantenga su participación actual de 30% de la producción cuprífera mundial. Esto implica llegar a producir alrededor de 8 millones de TM en el año 2035.

El logro de este objetivo involucra enormes y variados desafíos tecnológicos, cuya resolución abre una oportunidad única de diversificación productiva y sofisticación. En particular, exportar productos y servicios intensivos en conocimiento es posible si se tiene como base y pivote a la minería, cuyos desafíos económicos, sociales y ambientales operan como fuerzas movilizadoras únicas tanto para construir las capacidades necesarias para hacer frente a estos desafíos, como para avanzar en el desarrollo de una canasta exportadora de servicios, tecnologías y equipos. La identificación de estos desafíos es el propósito de esta HRT para la minería del cobre.

En esencia, la hipótesis implícita en una hoja de ruta es que el futuro puede ser construido, lo que se contrapone a una actitud pasiva para la cual el futuro simplemente ocurre. Por ello, la etapa inicial para producir una hoja de ruta consiste en concordar una visión de futuro y especificar los objetivos y dilemas del sector, en este caso la minería, para un período de 20 años.

La visión que inspira esta HRT se estableció en la Agenda **"Minería: Una Plataforma de Futuro para Chile"**, documento que define un conjunto de prioridades estratégicas para que la minería chilena consolide sus aspiraciones, reafirme su liderazgo a nivel mundial, genere un círculo virtuoso de innovación en su entorno y se convierta en un modelo de sustentabilidad e inclusividad. Dicho documento fue elaborado

a través de un proceso de trabajo participativo con actores públicos y privados en el marco de la **"Comisión Minería y Desarrollo de Chile"**, conformada durante 2014 al alero del Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo (CNID).

Para construir esta HRT se consideraron los resultados de experiencias previas disponibles (*Australian Minerals Industry Association* [Amira], 2004 y 2006), se entrevistó a alrededor de 70 ejecutivos y especialistas de la industria minera, se realizaron tres mesas técnicas de trabajo con expertos vinculados al sector minero y se validó con el Consejo Directivo del Programa Nacional de Minería Alta Ley. Durante el proceso participaron más de 150 actores vinculados a más de 60 instituciones relacionadas con el sector minero, principalmente compañías mineras, empresas proveedoras, asociaciones gremiales, universidades, centros de I+D y entidades estatales.

ESCENARIO ACTUAL Y DESAFÍOS FUTUROS DE LA MINERÍA

Aun cuando el potencial de Chile en producción minera se ha mantenido intacto, las condiciones que posibilitan el desarrollo de esta industria han cambiado. Los costos han aumentado, la productividad ha disminuido y la sostenibilidad ambiental y social se ha vuelto un imperativo para su desarrollo. Todos ellos constituyen desafíos que la industria debe enfrentar en el corto plazo si se desea asegurar la producción actual y materializar los proyectos futuros.

El deterioro de la calidad del recurso geológico, específicamente la disminución de las leyes de cobre, en los actuales yacimientos, ha configurado

un escenario bajo el cual las compañías mineras deben hacer grandes esfuerzos para mantener su nivel de producción. Las grandes distancias de acarreo como consecuencia de la profundización de los yacimientos, el mayor movimiento de material producto del deterioro de la calidad del recurso y el procesamiento más complejo debido a la mayor dureza y presencia de contaminantes, se han traducido en importantes factores de disminución de productividad.

Considerando que la minería es una industria intensiva en el uso de energía (más de un 20% de sus costos están explicados por este ítem), la situación descrita se traduce en un incremento de los costos por el aumento del consumo unitario de electricidad y combustible. Entre 2005 y 2014 los costos de operación han aumentado un 10% en promedio por año, mientras que la productividad ha disminuido alrededor de 20%.

En los meses recientes el precio del cobre ha mostrado una disminución significativa, lo que sumado al escenario descrito y al aumento de los tiempos e incertidumbre asociada a la tramitación de las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA), se ha traducido en la postergación de algunos proyectos de inversión en minería.

Adicionalmente, hoy se observa un alto grado de concentración y bajo nivel de rotación de la propiedad minera, lo cual se traduce en una restricción para el ingreso de nuevos actores y el descubrimiento de nuevos yacimientos de mejor calidad que los que se explotarán en los próximos años. En dicho contexto, una de las propuestas planteadas en esta HRT sugiere la necesidad de revisar el sistema de concesiones

chileno y trabajar en la generación de consensos que permitan que la propiedad actualmente asignada sea efectivamente aprovechada para lo que fue entregada y genere valor para el país. Junto con ello, se plantea la necesidad de fomentar la actividad exploratoria, para lo cual se propone perfeccionar la información geológica precompetitiva pública, a través de una base de datos integrada *vía online* con actualización permanente, y desarrollar instrumentos de fomento y capital de riesgo para incentivar la exploración en el país.

Otro desafío que la industria minera debe abordar es el de las emisiones de gases de efecto invernadero. Durante los últimos 15 años, la minería en Chile ha aumentando sus emisiones de gases invernadero a una tasa anual de aproximadamente 5,3%, debido al mayor consumo de electricidad y de combustibles producto de las razones explicadas anteriormente.

La aplicación de políticas de eficiencia energética y la incorporación de fuentes de energías renovables no convencionales a la matriz energética constituyen actualmente las principales medidas utilizadas por las compañías mineras para disminuir su huella de carbono. No obstante, éstas no son suficientes para reducir de manera significativa las emisiones directas e indirectas.

En Chile, una faena minera genera entre 300 y 400 toneladas mensuales de desechos en materiales, entre componentes y equipos, que son generalmente vendidos o simplemente desechados como chatarra con un precio por kilo al mejor postor. Sin embargo, bajo un modelo de economía circular, la reutilización de materiales y

la re-manufactura de productos podría significar para las empresas proveedoras, una disminución del consumo energético de hasta 60%, una reducción de emisiones de CO₂ de hasta 70% y una disminución de sus desechos de hasta 75%.

Otro desafío que la minería chilena debe abordar es el de los cambios normativos que podrían limitar el acceso de la producción nacional de cobre a los mercados internacionales. En este ámbito, la industria enfrenta hoy una muy diversa gama de desafíos normativos relacionados con la composición química de la producción de cobre y los peligros o riesgos que ésta puede representar para la salud humana y el medio ambiente.

La aplicación de dichas normativas está exigiendo niveles cada vez más altos de capacidad técnica y científica en la evaluación de los peligros y riesgos químicos, toxicológicos y ecotoxicológicos de los productos. Estos niveles son particularmente sofisticados para productos con composiciones químicas complejas, heterogéneas y variables, como es el caso de muchos productos de la minería metálica (por ejemplo, concentrados minerales).

NÚCLEOS TRACCIONANTES

Se utilizó el término “**traccionantes**” para denotar todos aquellos ámbitos que, en el corazón del proceso minero, constituyen los desafíos tecnológicos más cruciales para la evolución de la industria. Los núcleos priorizados en la presente HRT son: **Relaves; Fundición y refinería; Operaciones y planificación minera; Concentración de minerales; Hidrometalurgia.** A continuación se describen los desafíos asociados a cada uno de ellos.

Relaves

Como se ha mencionado, la industria minera debe remover cada vez mayores cantidades de material para extraer cobre y otros elementos de valor, principal y crecientemente a través de flotación y concentración. Con ello, el volumen de desechos que deben ser dispuestos, ya sea como material estéril o en la forma de relaves, ha aumentado significativamente y lo seguirá haciendo en el futuro. Se estima que la producción de relaves podría casi duplicarse al año 2035: si hoy cada 36 horas se depositan en Chile relaves equivalentes a un cerro Santa Lucía, dentro de 20 años lo haremos sólo en 21 horas.

Aun cuando en nuestro país no se han reportado mayores incidentes en el último tiempo, la experiencia internacional reciente ha demostrado que uno de los principales riesgos asociados a los tranques de relaves radica en la ruptura de los muros de contención producto de sucesos sísmicos o climatológicos externos. La consecuente inundación de los terrenos adyacentes puede tener consecuencias catastróficas en las comunidades aledañas.

Por su parte, las infiltraciones de depósitos de relaves también constituyen un desafío importante que la industria minera debe abordar, debido a sus potenciales efectos negativos sobre la salud y calidad de vida de la población, el medioambiente y el desarrollo de otras actividades económicas como la agricultura y la ganadería.

A futuro se espera que una parte importante de la producción minera se realice en la zona central, donde existe una mayor densidad poblacional y, por ende, mayor competencia por el uso del suelo y del recurso hídrico. Este escenario motiva a que minimizar el impacto y la generación de relaves se constituya en un aspecto central para asegurar

la sustentabilidad futura de la industria minera. La HRT identifica una serie de líneas de I+D con el objetivo de enfrentar el creciente aumento de la producción de relaves, asegurar la estabilidad de los depósitos, minimizar el impacto de las infiltraciones, enfrentar la creciente escasez de superficie, promover la conversión de los relaves (pasivos) a un activo, y propiciar la inclusión y aceptación por parte de las comunidades a través del desarrollo de tecnologías que entreguen información en tiempo real sobre las condiciones de los tranques.

Fundición y refinería

Chile exporta alrededor de 2,7 millones de toneladas de cobre contenidas en concentrados. A futuro se espera que esta cifra aumente debido al agotamiento paulatino de los minerales oxidados de cobre.

Además, una parte importante de la producción de cobre en Chile estará constituida por concentrados complejos debido a su alto contenido de arsénico, cuya comercialización podría verse expuesta a una serie de riesgos debido a su alto nivel de impurezas. Para efectos de su transporte o tratamiento, en los países de destino, podrían verse afectados por regulaciones nacionales o internacionales. Eventualmente, esta situación podría significar descuentos en sus precios de venta asociados al lavado de barcos (adicionales a los de tratamiento), e incluso los concentrados podrían ser rechazados por las fundiciones, reduciéndose así las posibilidades de comercialización. En la HRT se plantea que el país debe anticiparse a este escenario y, en base a ello, fortalecer su posición en el mercado de cátodos.

China es el principal productor de cobre en fundiciones, con más de 6 millones de toneladas

de cobre fino anuales, y el principal país de destino de las exportaciones chilenas de concentrado de cobre. La concentración del negocio de fundiciones otorga al país asiático un gran poder para fijar las tarifas, exponiendo a la industria minera nacional a un escenario de riesgo comercial asociado a oligopsonios. Ahora bien, las fundiciones chilenas se sitúan en una posición desfavorable respecto de otros actores mundiales, lo cual se explica por bajos niveles de ingresos, altos costos (mano de obra y energía) y bajas tasas de recuperaciones metalúrgicas. A esto se agrega la situación de obsolescencia tecnológica de las instalaciones chilenas y su baja escala de operación.

Adicionalmente, a partir de 2018 regirá una nueva normativa ambiental que obliga a las fundiciones a capturar un mínimo de 95% de las emisiones que generan, lo cual implica un importante nivel de inversión, transferencia y adaptación de tecnologías.

Dado este escenario, mejorar la competitividad de las fundiciones chilenas representa un desafío país. Para abordar este desafío, en la HRT se plantean líneas de I+D asociadas a dos ámbitos de solución: i) Mejorar la eficiencia de los procesos de fundición y refinería, ii) Disminuir su impacto medioambiental. Una alternativa diferente radicaría en establecer una alianza estratégica con empresas extranjeras para adquirir tecnologías de vanguardia en los procesos de fundición y refinación.

Operaciones y planificación minera

La minería chilena enfrenta un problema estructural. Las minas a rajo abierto que actualmente se encuentran operando son cada vez más antiguas y profundas. Las leyes de explotación han disminuido, los minerales se han vuelto cada vez más duros y

la cantidad de lastre o material estéril que se debe remover para alcanzar el mineral en profundidad es cada vez mayor. A lo anterior se suma la casi inexistente disponibilidad de agua continental para suplir los consumos de nuevas operaciones y futuros proyectos mineros, lo que obliga a las compañías mineras a impulsar agua de mar a las operaciones muchas veces ubicadas a gran altitud y distancia.

La minería a rajo abierto requiere del desarrollo de soluciones y tecnologías que permitan mover grandes volúmenes de tierra a través de largas distancias y optimizar la gestión de activos. En la presente HRT se expone un conjunto de líneas de I+D que, de desarrollarse e implementarse con éxito, incidirían directamente en la productividad de la industria minera. Entre los aspectos identificados, destaca el desarrollo de tecnologías de fragmentación y tronadura, correas de alto tonelaje, constructibilidad de taludes e integración de mina-planta.

Otro desafío central para la sustentabilidad futura de la industria radica en mejorar los niveles de productividad de la minería subterránea para viabilizar el desarrollo futuro de una minería profunda a gran escala. Construir, gestionar y operar los grandes proyectos de minería subterránea constituye un reto sin precedentes para la industria minera mundial, y en particular para la chilena, tanto por su complejidad como por los volúmenes de producción asociados.

Tanto en la explotación a rajo como subterránea, las tecnologías de información, comunicación y automatización se vuelven fundamentales para el desarrollo de una minería autónoma de modo de transitar desde operaciones manuales, bajos

niveles de mecanización y baja incorporación de tecnología a minas operadas a distancia, más eficientes, seguras y en las que la tecnología y los equipos autónomos ocupen un lugar central.

Concentración de minerales

La etapa de concentración es un aspecto prioritario a abordar si se desea generar transformaciones en pos de resolver los desafíos de productividad que enfrenta la industria. A lo largo de este proceso, la energía eléctrica y el agua son insumos muy determinantes de los costos, en especial debido al proceso inicial de reducción de tamaño o "conminución".

La molienda genera la mayor parte del gasto asociado al proceso de concentración debido a su consumo energético, de hecho, un tercio del consumo de energía eléctrica en la minería metálica corresponde a aquella utilizada en molienda. Esta etapa posee bajos niveles de eficiencia energética.

El agua es altamente requerida en el proceso de concentración, desde la molienda hasta la flotación y para facilitar el transporte de las colas del proceso (relaves). Tradicionalmente se ha utilizado agua continental, pero en los últimos años se ha incorporado crecientemente el agua de mar, con su consecuente impacto en el consumo de energía.

Las tecnologías inteligentes aparecen como un medio para optimizar el uso de activos y mejorar la eficiencia de los procesos. Junto con proporcionar seguridad a las personas, estas tecnologías permiten estabilizar los procesos (menor variabilidad), reducir los costos, aumentar la productividad y mejorar la calidad de los productos intermedios y finales.

Hidrometalurgia

La hidrometalurgia del cobre corresponde a al proceso predominante para el tratamiento de los minerales oxidados de cobre (óxidos) y algunas especies de sulfurados, (SXEW) extracción por solventes y electro-obtención. Los óxidos se forman cerca de la superficie debido a que son minerales derivados del proceso de oxidación de un yacimiento. En los últimos años no se ha incorporado a la base de recursos nuevos yacimientos lixiviables.

La cartera de proyectos y los planes de desarrollo futuro de las empresas mineras están basados fuertemente en el aprovechamiento de minas que ya se encuentran en operación (proyectos *brownfield*). Lo anterior, sumado al deterioro en la calidad del mineral, tanto de las leyes como de sus características de lixivabilidad, lleva a que al año 2020 se prevea una producción de cátodos electro-obtenidos cercana a 1,3 millones, generándose una importante capacidad ociosa en las plantas de SXEW.

Junto con lo anterior, se debe tener presente que la energía es el insumo más relevante en términos de costos en el proceso hidrometalúrgico. Ésta representa, según el precio de compra, entre el 25% y el 30% del total (entre 80% y 90% de este gasto es generado por la electro-obtención).

Mejoras significativas de productividad en el proceso de hidrometalurgia podrían rentabilizar la explotación de recursos marginales que hoy no se entienden como parte de las reservas. En otras palabras, quiebres tecnológicos podrían permitir la conversión de estos minerales descartables en activos. En este contexto, en la HRT se presenta líneas de I+D asociadas al manejo de los residuos y la mejora de los procesos de hidrometalurgia.

NÚCLEOS HABILITADORES

Los **núcleos habilitadores** agrupan aquellas dimensiones que, sin ser exclusivas del proceso minero, condicionan la capacidad de la industria para llevar a cabo su plan de desarrollo. Estos son: **Capital Humano; Proveedores e Innovación y Minería Inteligente (redes y protocolos)**. A continuación se resumen los desafíos identificados para cada uno de estos núcleos.

Capital Humano

El Capital Humano es un eje transversal relevante para gran parte de los desafíos actuales y futuros de la industria minera nacional, y constituye un elemento habilitador para materializar los futuros proyectos de inversión, mejorar la productividad de la industria e incorporar nuevas tecnologías a los procesos de la minería y sus proveedores. Avanzar hacia una minería innovadora depende, en gran medida, de la cantidad y calidad de capital humano disponible para ello.

Las condiciones de operación de la industria minera se han vuelto cada vez más exigentes, y la materialización de los proyectos futuros requerirá, entre otros aspectos, del desarrollo de nuevas tecnologías y de alinear la calidad de la formación del capital humano con los nuevos requerimientos de la industria. En este sentido, el desafío de capital humano para la minería radica en la necesidad de contar con una cantidad adecuada de trabajadores formados en función de los requerimientos actuales y futuros de la minería. Para abordar este desafío se debe trabajar en una serie de brechas, asociadas principalmente a la formación técnica y a profesionales altamente especializados. Aun cuando la minería es la única industria del país que posee un Consejo Sectorial de Competencias que entrega información de calidad a las instituciones de

formación sobre las habilidades y capacidades que deberían tener sus trabajadores, éste es un esfuerzo de largo plazo que debe ser complementado si se desea fortalecer la conexión entre el sector productivo y las instituciones de formación para el trabajo y superar las brechas identificadas.

En otro nivel, también resulta fundamental contar con una cantidad adecuada de profesionales postgraduados dedicados a las labores de I+D en aquellos ámbitos que han sido considerados estratégicos para el desarrollo de la minería del futuro. La evidencia disponible indica que el número de investigadores dedicados a labores de I+D es muy inferior al stock de investigadores que poseen otros países mineros como Australia y Canadá.

Proveedores e Innovación

La industria minera nacional se encuentra transitando hacia una nueva etapa, donde la incorporación de conocimiento, innovación y desarrollo tecnológico se convierten en fuentes significativas de ventajas competitivas. En este contexto, la consolidación de un sector de proveedores STEM (servicios, tecnologías y equipos mineros) constituye un aspecto habilitador para el desarrollo futuro de la minería chilena y, a su vez, ofrece una oportunidad única de desarrollo tecnológico, diversificación productiva y de una canasta exportadora de servicios, tecnologías y equipos para la minería mundial. Para disminuir la dependencia de la minería se requiere que ésta ayude a generar innovación tecnológica.

En Chile existen más de 5.000 empresas proveedoras, con ventas a la industria minera estimadas en US\$20.000 millones (excluyendo energía y combustibles). Durante 2014, los proveedores de la minería exportaron US\$537 millones, lo que

representa una brecha importante respecto de la visión establecida en la presente HRT e indica que el potencial del sector aún no se ha materializado.

El sector de proveedores mineros australianos (METS) es, en este sentido, un referente para Chile. Está compuesto por alrededor de 1.500 empresas, con ventas totales estimadas en AUS\$90.000 millones (US\$87.100 millones) y exportaciones en torno a los AUS\$15.000 millones (US\$14.500 millones) en insumos para la minería en el año 2013.

Potenciar el desarrollo de proveedores locales intensivos en conocimiento y tecnologías requiere de la articulación de un ecosistema de innovación abierta, para lo cual se deben superar una serie de brechas que dificultan el desarrollo de innovación.

Entre ellas se encuentra la inexistencia de espacios de prueba para que en condiciones reales de operación los proveedores puedan probar las soluciones y tecnologías desarrolladas, el limitado acceso a fuentes de financiamiento que sustenten el desarrollo de innovación e I+D, la existencia de relaciones de abastecimiento “transaccionales” entre proveedores y compañías mineras, y los bajos niveles de asociatividad con universidades y centros de I+D.

Minería Inteligente

Gran parte de las soluciones y líneas de I+D identificadas en la presente HRT requieren de la incorporación de tecnologías de la información y las comunicaciones, con capacidades avanzadas de monitoreo, control, optimización, operación remota y funcionamiento autónomo. Aplicadas a la industria minera, estas tecnologías se enmarcan en lo que se ha definido como minería inteligente: faenas autónomas que, a través del

análisis y monitoreo de información, maximizan la eficiencia de los procesos y minimizan la exposición de los trabajadores a situaciones de riesgo.

La adopción de tecnologías inteligentes le permitirá a la minería mejorar su productividad a través de una mejor planificación y coordinación de las actividades. Con ello se lograría mitigar posibles fuentes de incertidumbre y reducir la variabilidad propia de la operación minera. Además, la minería inteligente constituye una oportunidad para potenciar el desarrollo de proveedores nacionales especializados.

El Programa estratégico de Industrias Inteligentes impulsado por Corfo se ha planteado avanzar en el establecimiento de estándares y protocolos para la interoperabilidad, entendida como la habilidad de los sistemas de tecnologías de la información y las comunicaciones de intercambiar datos y permitir que se comparta información y conocimiento. De cara a los desafíos actuales y futuros de la industria, éste es un elemento habilitador para el desarrollo de una minería inteligente.

PRIORIDADES ESTRATÉGICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE LA HRT

A partir de los desafíos identificados durante el proceso de construcción de la hoja ruta, se definieron ocho prioridades estratégicas para abordar las problemáticas levantadas. Para cada una de estas prioridades se conceptualizó un proyecto con sus respectivos componentes y beneficios asociados. A continuación se describen dichas prioridades con sus respectivos proyectos.

1: Minería subterránea: Desarrollo de una minería profunda a gran escala / Proyecto asociado: Diseño y desarrollo de maquinaria para la minería subterránea a gran escala

2: Mejorar de la competitividad de las Fundiciones y Refinerías / Proyecto asociado: Programa de Innovación Tecnológica para la Fundición y Refinería.

3: Relaves mineros: Enfrentar la creciente escasez de superficie y minimizar su impacto / Proyecto asociado: Programa Tecnológico de Monitoreo en Línea de Relaves Mineros.

4: Mejora de productividad en la minería a cielo abierto: Movimiento de grandes volúmenes de material a través de largas distancias / Proyecto asociado: Desarrollo de tecnologías para el movimiento de grandes tonelajes por largas distancias.

5: Potenciar el desarrollo de proveedores intensivos en conocimiento y tecnología / Proyecto asociado: Programa de innovación abierta en la cadena de valor de la gran minería.

6: Potenciar la actividad de exploración en Chile / Proyecto asociado: Incremento del número de agentes que realizan exploración en Chile.

7: Habilitar el desarrollo de una minería inteligente / Proyecto asociado: Organización Internacional de Estándares para la Interoperabilidad en Minería

8: Desarrollo de capital humano acorde a los requerimientos actuales y futuros de la industria / Proyecto asociado: Centro de Transferencia para la formación técnica en la cadena de valor de la minería



01

ROL DEL
COBRE EN LA
ECONOMÍA
CHILENA

El cobre ha sido
fundamental para
el crecimiento
económico de Chile
y se erige como la
clave para dar el
salto al desarrollo

El impacto nacional de la producción de cobre ha aumentado considerablemente en las últimas dos décadas, influyendo en el diseño de las políticas públicas y en la estabilidad macroeconómica del país. Al considerar este planteamiento vale la pena preguntarse algunas cuestiones fundamentales: ¿Seguirá siendo el cobre el motor de la economía chilena? ¿Hasta cuándo va a cumplir ese rol? ¿El salto al desarrollo depende de este mineral?

Actualmente, el rol del cobre es el más significativo que ha tenido en toda la historia. Chile está más cerca de llegar a ser un país desarrollado, pero la experiencia expansiva de la producción cuprífera registrada en estos últimos 20 años es irrepetible¹ (ver *Recuadro 1*). Sumado a esto, el año 2015 se observó el fin del *boom* de precios de los *commodities*.

¹ Entre 1990 y 2015 la producción cuprífera (TM) aumentó 3.5 veces. En los próximos 25 años será difícil expandir la producción actual en más del 40%.

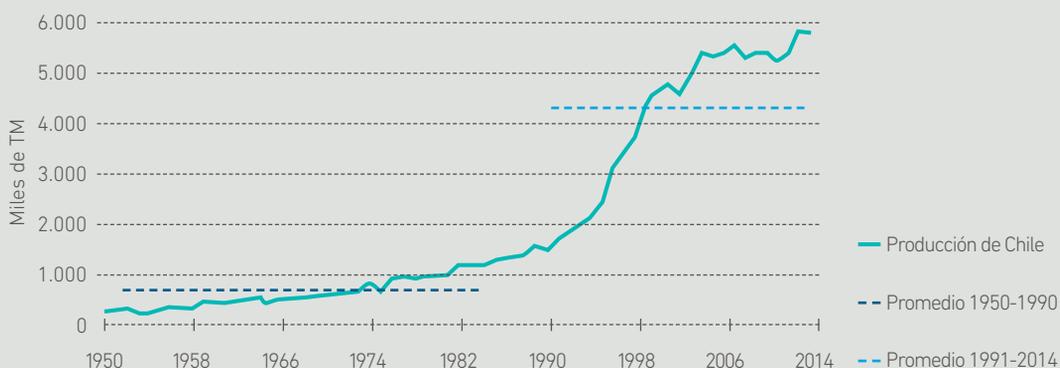
La redacción de este capítulo estuvo a cargo del equipo de Fundación Chile, coordinado por Patricio Meller y compuesto por: Francisco Klima, Tomás González, Hernán Araneda y Nicole Valdebenito.

RECUADRO 1: EVOLUCIÓN DE LA PRODUCCIÓN NACIONAL DE COBRE

GRÁFICO/1

Producción de cobre de Chile 1950 - 2014 (Miles de TM) n°1

En el gráfico se observa cómo ha evolucionado la producción de cobre en Chile en dos grandes periodos. El primero, señalado por la línea punteada ubicada en las 827 mil TM, representa la producción anual promedio entre 1950 y 1990. El segundo periodo, señalado por la línea azul ubicada en las 4,4 millones TM, representa la producción anual promedio de 1991 a 2014.

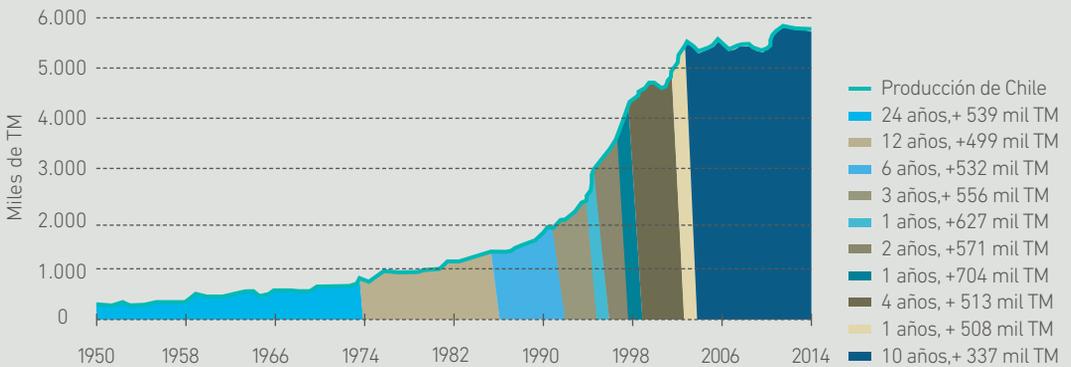


Fuente: elaboración propia a partir de datos de Cochilco

GRÁFICO/2

Producción de cobre de Chile 1950 - 2014 (Miles de TM) n°2

El gráfico muestra el ritmo de evolución de la producción de cobre. Entre 1950 y 1974 la producción aumentó cerca de 500 mil TM y en 1996 aumentó 627 mil TM en un año. En la década siguiente, los volúmenes de crecimiento anual fueron muy altos, alcanzando los 704 mil TM en 1999. En la última década, sólo ha aumentado 337 mil TM sobre lo que se produjo el 2004.



Fuente: elaboración propia a partir de datos de Cochilco



Fotografía Codelco (Fundación El Teniente)



El cobre representa el 55% de las exportaciones (y de las divisas generadas) del país y es la segunda fuente más importante en cantidad de ingresos del Fisco. Por otra parte, ha aumentado significativamente la importancia cuprífera chilena a nivel mundial y como porcentaje de sus exportaciones (*ver Recuadro 3*).

Hasta 1990 la cuota de mercado de la producción cuprífera chilena era el 16% de la producción mundial (porcentaje similar o inferior durante buena parte del siglo XX); en cambio, en el siglo XXI la producción cuprífera chilena alcanza el 30%. Algo similar sucede con la proporción relativa de Chile en las reservas mundiales de cobre (*ver Recuadro 2*).

Dada la importancia adquirida por Chile en la minería mundial del cobre ya no se puede ser tan pasivo en el siglo XXI como se fue en el siglo XX.

Chile es pequeño en todo menos en cobre. China tiene la población más grande del mundo, 77 veces la población chilena; el PIB chino es 33 veces el PIB chileno. Pero en cobre, Chile es 7 veces más grande que China y más grande que cualquier otro país.

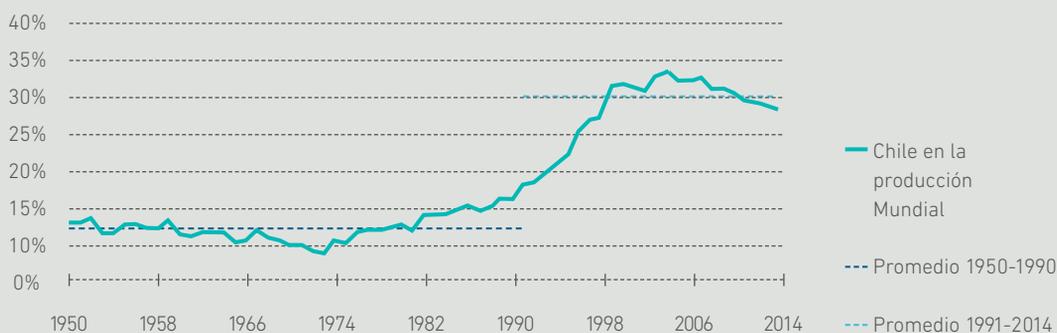
En la actualidad, el cobre puede desempeñar un rol crucial vinculado a la innovación tecnológica. Cuando un país representa el 30% de la producción mundial de un *commodity* y, además, posee un porcentaje similar de las reservas mundiales, cabe preguntarse: ¿Por qué este país no es el centro mundial de la investigación, desarrollo e innovación tecnológica asociada a éste?

En consecuencia, debiéramos potenciar la minería del cobre como plataforma para la generación de innovación tecnológica. Para este efecto, esta Hoja de Ruta Tecnológica (HRT) ha elaborado una serie de propuestas e identificado desafíos específicos.

RECUADRO 2: RELEVANCIA DE CHILE EN EL MERCADO MUNDIAL DEL COBRE

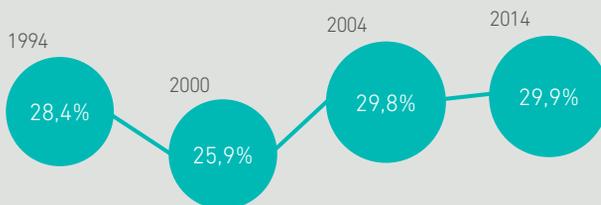
GRÁFICO/3

Participación de Chile en la producción mundial de cobre



Fuente: elaboración propia a partir de datos de Cochilco

GRÁFICO/4 Participación de Chile en las reservas mundiales de cobre

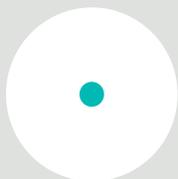


Fuente: elaboración propia a partir de datos del Servicio Geológico de Estados Unidos (*USGS, Mineral Commodity Summaries*)

FIGURA/1 Comparación de población, PIB y reservas de cobre entre China y Chile

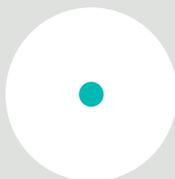
Población / Millones de personas

China 1.357
Chile 17,6



PIB / MM US\$

China 9.240
Chile 227



Reservas de Cobre / % mundiales

China 4%
Chile 30%



Fuente: elaboración propia a partir de datos del Banco Mundial y del Servicio Geológico de Estados Unidos (*USGS*)

El cobre ha sido fundamental para el crecimiento económico de Chile y se erige como la clave para dar el salto al desarrollo. No obstante, estamos frente a una “gran paradoja”: la sociedad chilena no lo reconoce o no lo sabe, y se aprecia un juicio negativo respecto de la minería (ver Recuadro 4).

El alcance de la baja valoración social de la industria minera, y en especial de la cuprífera, pareciera ir más allá de la sociedad civil. Tal como ya se señaló, la minería es el sector productivo que aporta, por lejos, el mayor monto de recursos al Fisco. Sin embargo, es sintomático observar que el Ministerio de Minería es una de las carteras que recibe menos recursos del Presupuesto de la Nación. El monto recibido representa menos de 10% de lo que es asignado al Ministerio de Agricultura; ¿Por qué? ¿Cuál es la lógica de esta tan disímil asignación de recursos? ¿Acaso la agricultura chilena enfrenta problemas de mayor envergadura y complejidad que la minería? ¿Es la agricultura más importante que la minería para el desarrollo chileno? Este indicador presupuestario sintetiza y refleja la valoración y priorización que la sociedad chilena da al cobre. ¿A qué se debe esto? Pareciera prevalecer la imagen productiva de Chile del siglo XIX, mientras que estamos en el siglo XXI.

Pero hay algo adicional: el rol de las ideas respecto del patrón de desarrollo nacional. Existe la noción, algo primitiva, de que sería una especie de “castigo divino” tener cobre (ver Recuadro 5).

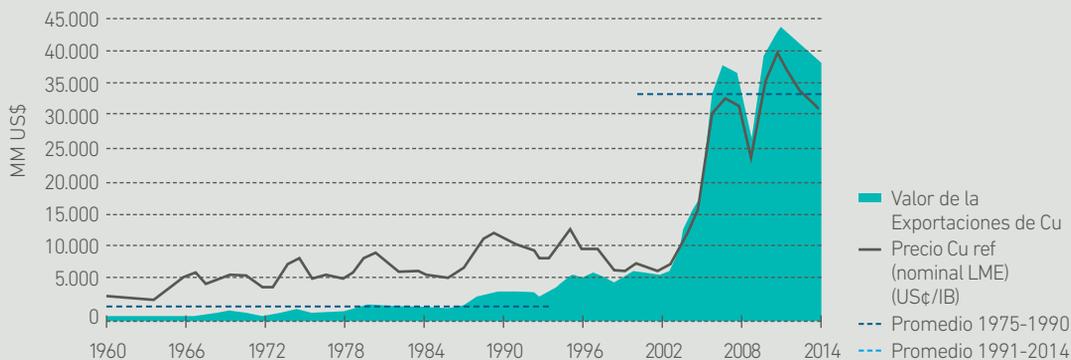


RECUADRO 3: RELEVANCIA DEL COBRE PARA LA ECONOMÍA CHILENA

GRÁFICO/5

Valor de exportaciones de cobre 1960/2014 (MM US\$)

En el gráfico se aprecia el cambio de magnitud que han experimentado las exportaciones de cobre a partir de 2004, las que, con un promedio anual de US\$33.518 millones, superan sustancialmente a los US\$2.628 millones promedio de los años anteriores. En el eje secundario se grafica la evolución del precio del cobre en la Bolsa de Metales de Londres.

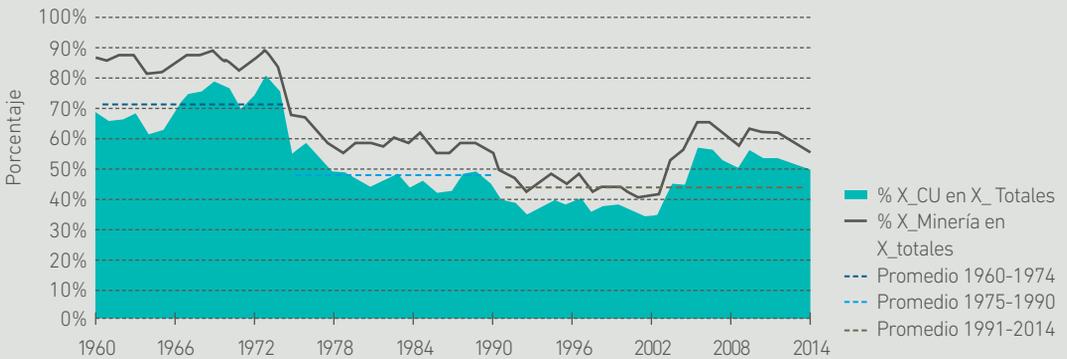


Fuente: elaboración propia a partir de datos de Cochilco

GRÁFICO/6

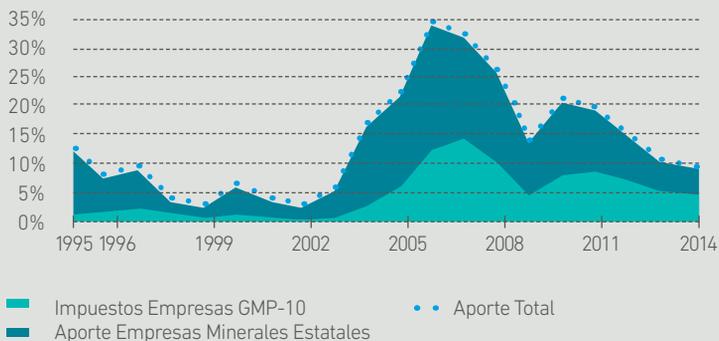
Participación de las exportaciones de cobre en las exportaciones totales de bienes de Chile, 1960 - 2014

El área verde muestra el porcentaje de las exportaciones totales de bienes de Chile que corresponde a cobre, el que a partir de 2006 ha sido siempre mayor al 50%; mientras que la línea gris, muestra el porcentaje de las exportaciones de la minería en general, el que para los últimos años es entre un 7 y un 10% adicional, alcanzando un máximo de 66% en 2007.



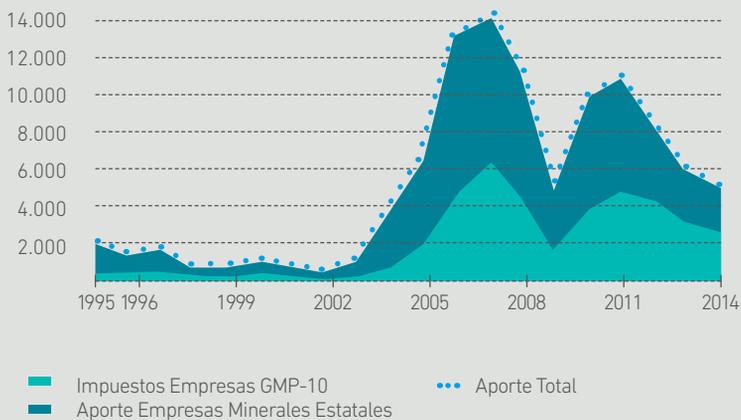
Fuente: elaboración propia a partir de datos de Cochilco

GRÁFICO/7
Participación del
cobre en los ingresos
fiscales de 1995-2014



Fuente: elaboración propia a partir de datos de Cochilco

GRÁFICO/8
Evolución del aporte
del cobre al fisco
1995-2014



Fuente: elaboración propia a partir de datos de Cochilco

La producción cuprífera chilena actual es cercana a los 6 millones de toneladas métricas (TM). Debido al envejecimiento de los yacimientos y a la disminución de la ley del mineral, si no se efectúan importantes inversiones, el nivel de producción caerá a 4 millones de TM al 2025. Dado que Chile tiene el 30% de las reservas mundiales, se ha planteado como objetivo que mantenga su participación actual de 30% de la producción cuprífera mundial. Esto implica llegar a producir alrededor de 8 millones de TM el año 2025. El logro de este objetivo involucra la resolución de enormes y variados desafíos tecnológicos. La identificación de estos desafíos es el propósito de esta Hoja de Ruta Tecnológica para la minería del cobre al año 2035.

RECUADRO 4: ¿POR QUÉ LA SOCIEDAD CHILENA SUBVALORA A LA MINERÍA?

PERCEPCIÓN DE LA SOCIEDAD CHILENA

La sociedad chilena tiene un complejo por ser un país minero. En el imaginario colectivo, ser un país minero implica ser subdesarrollado. Alcanzar a ser un país desarrollado no es cuestión de lograr un determinado nivel de ingreso per cápita. Gran parte de la población está convencida que Chile será desarrollado sólo cuando produzca autos, aviones, productos electrónicos, satélites, y surja aquí alguna empresa equivalente (en innovación y magnitud) a Google, Apple, o Microsoft.

Sin embargo, Chile es un país que tiene ventajas comparativas en cobre. La minería es el principal sector económico: (i) representa 30% del stock de capital total y representó 33% de los flujos de inversión extranjera en el período 1990-2014; (ii) los impuestos pagados por la minería son equivalentes al total de impuestos pagados por casi todo el resto de los sectores productivos; (iii) la productividad media del trabajo en la minería es equivalente a 4 veces la productividad del sector financiero y 6 veces la de la industria; (iv) el cobre representa la principal fuente de ahorros de los Fondos Soberanos, alrededor de US\$20.000 millones. No obstante todo esto, la sociedad chilena tiende a tener un juicio negativo respecto del cobre, ¿Por qué?

PROBLEMAS DE DIFUSIÓN DE LA INFORMACIÓN

Diversas entidades nacionales generan información cuprífera: Cochilco, Sonami, Consejo Minero, Ministerio de Minería, Cesco, Sernageomin, Departamentos de Ingeniería de Minas y Centros de Estudios Mineros de varias universidades, instituto de ingenieros mineros, entre otros. En resumen, hoy hay abundante información minera; pero, ¿Cuánta de esta información conoce la gente? ¿Quién tiene la responsabilidad de reducir el nivel de ignorancia (minera) de los líderes de opinión y de la ciudadanía en general? En breve, los chilenos no ven el elefante de cobre que está parado en la mesa del comedor.

LITERATURA CHILENA

Baldomero Lillo en sus cuentos de "SubTerra" proporciona visiones dramáticas y perturbadoras de la minería del carbón: *"El recuerdo de su vida, de esos cuarenta años de trabajo y sufrimiento se presentó de repente a su imaginación, y con fuerte congoja comprobó que de aquella labor inmensa solo le restaba un cuerpo exhausto que tal vez pronto arrojarían de la mina como un estorbo... Y que un destino similar le esperaba a sus hijos"*. El premio Nobel Pablo Neruda escribió ("*Oda al Cobre*"): *"la mina es solo el hombre// no sale de la tierra el mineral, sale del pecho humano// se averigua*

la veta, se perfora y estalla la dinamita, // la roca se derrama, se purifica: va naciendo el cobre. // Antes nadie sabrá diferenciarlo de la piedra materna. // Ahora es hombre”. Obviamente la minería cuprífera del siglo XXI utiliza una tecnología productiva muy diferente de la minería del carbón del siglo XIX.

EL PESO DE LA HISTORIA

Durante un extenso período del siglo XX hubo una relación muy conflictiva entre las empresas norteamericanas propietarias de la Gran Minería del Cobre (GMC) y los gobiernos chilenos. Los acuerdos establecidos experimentaron continuos cambios a través del tiempo. Los gobiernos chilenos presionaban por sucesivos incrementos de las tasas tributarias pagadas por la GMC. Los gobiernos de EE.UU. actuaban implícita o explícitamente como freno o contrapeso a la presión tributaria que ejercían los gobiernos chilenos. Otra materia conflictiva estaba relacionada con los niveles de inversión. Los gobiernos chilenos presionaban a las empresas norteamericanas para que Chile aumentara su nivel de participación en la producción mundial de cobre. Sin embargo, el entorno latinoamericano post-revolución cubana era claramente desfavorable a la inversión norteamericana. La cúspide de los conflictos ocurrió con los procesos de “chilenización” y nacionalización de la GMC.

En la década de 1960, predominaba la visión de que la inversión extranjera sólo generaba costos a los países latinoamericanos. Como se puede apreciar, hubo un giro en 180 grados a partir de 1990, cuando los países de la región empezaron a competir entre sí, por atraer los máximos flujos de inversión extranjera, la que hoy se considera vital para el crecimiento y la globalización.

LA MINERÍA CONTAMINA AIRE Y AGUA

Los procesos productivos mineros emiten diversos tipos de contaminantes, entre ellos, dióxido de azufre, anhídrido de carbono y arsénico. En esta línea, la industria ha hecho grandes avances, pero persiste en el imaginario colectivo la idea de que la minería es un sector altamente contaminante de recursos básicos como el aire y el agua. Además, como consecuencia directa o indirecta del proceso productivo, se ha generado un aumento sustancial de emisión de gases de efecto invernadero. Otro aspecto, especialmente sensible a nivel de comunidades aledañas a las mineras, es la utilización de los recursos hídricos disponibles. Esto deriva en un conflicto potencial entre el consumo de las personas y el de la minería. Para neutralizar esto, la minería ha comenzado a utilizar agua de mar.

Fuente: Meller, P. (2013). La viga maestra y el sueldo de Chile. UQBAR

RECUADRO 5 REFUTACIÓN DE LA “MALDICIÓN DE LOS RECURSOS NATURALES”

El marco conceptual de las ideas del siglo XX prevaleciente en América Latina y en Chile era contrario a los recursos naturales (RR.NN.) y a las materias primas. El razonamiento imperante en el siglo pasado planteaba que la industria era el sector clave para lograr ser un país avanzado. Luego, para que Chile sea un país moderno, necesitaría industrializarse y abandonar la dependencia de los RR.NN.

Hay dos hipótesis que sustentaban este planteamiento: (i) *la hipótesis de Prebisch* (Cepal) del “Deterioro de los Términos de Intercambio”, es decir, que el precio relativo de los RR.NN. disminuiría en relación al de los bienes industriales. Esto significaría que cada vez se requieran más toneladas de cobre para comprar productos industriales (autos, maquinarias, computadores). (ii) *La hipótesis de la “Maldición de los Recursos Naturales”* (Sachs & Wagner, 1995) plantea que los países que tienen relativamente más RR.NN. tienen un ritmo de crecimiento económico menor que el de los países que tienen pocos RR.NN.

Resulta contraintuitivo argumentar por qué un país con muchos RR.NN. tendería a ser más pobre en el largo plazo. Ello, puesto que el hecho que un país tenga

RR.NN. constituye un activo o riqueza. Una riqueza es una riqueza y no hay diferencia entre diversos tipos de activos o riqueza. Pero la hipótesis de la “Maldición de los Recursos Naturales” sugiere que un país subdesarrollado que tenga cobre o petróleo, tendría un menor crecimiento económico que un país subdesarrollado sin esos recursos. En breve, según la “Maldición” sería preferible no tener RR.NN., que tenerlos, si se quiere crecer más rápido. ¿Es esto efectivo?

Si así fuera, la solución a la “Maldición” sería simple. Chile podría dejar el cobre bajo tierra y además, no cortar los árboles que siembra, prescindir de los peces del mar, no sacar la fruta de los árboles, etc. ¿Tendría esto realmente un efecto positivo sobre la trayectoria de crecimiento económico? Por otra parte, si abandonáramos todas estas actividades, ¿Se generaría espontáneamente un *boom* de innovación tecnológica? La respuesta, en breve, es que sería irracional que Chile no aprovechara sus recursos y ventajas comparativas.

Actualmente, ha cambiado la temática de la “existencia de la Maldición de los Recursos Naturales” a la siguiente pregunta: ¿Por qué en algunos países parece haber una maldición y en otros

una bendición de los RR.NN.? Esta doble posibilidad está definida por el uso que se le da a los excedentes generados por los RR.NN. Aquellos países que destinan parte importante de estos excedentes a la generación de innovación tecnológica tienen un desarrollo muy superior, a aquellos que privilegian el consumo. En términos coloquiales, la diferencia radicaría en “comerse el cobre” o “sembrar el cobre”.

Por otra parte, la evidencia empírica sobre el “Deterioro de los Términos de Intercambio” es escasa y no es concluyente. Esta idea ha sido particularmente invalidada en estas últimas décadas, basta con observar que el precio de los computadores ha experimentado una caída real anual mayor al 10% durante 30 años consecutivos: una tonelada de cobre permite comprar hoy muchos más computadores que en 1980. A modo de ejemplo, en 1980 se requerían 2 toneladas de cobre para adquirir un computador; en el año 2000, una tonelada de cobre permite la adquisición de 2 computadores. En el año 2015, una tonelada de cobre se intercambia por 10 equipos.

Por otro lado, la minería es realmente un sector líder en el uso de tecnologías

modernas y TI (tecnologías de la información). El uso de tecnologías avanzadas en minería incluye comunicación satelital, robótica, sensores nucleares, modelística computacional de diversos procesos, el uso de una variada gama de *software* para hacer más eficiente el proceso productivo y administrativo, control remoto de diversas operaciones, etc. En breve, el modo de producción del sector minero (gran minería) es uno de los más sofisticados desde el punto de vista tecnológico, tanto a nivel nacional como internacional. Si todo el resto de los sectores productivos utilizara un nivel tecnológico de una intensidad que fuera un 50% del nivel tecnológico de la minería, Chile sería actualmente un país desarrollado.

En realidad, no es obvio por qué una gran producción de cobre inhibiría la posibilidad de que empresas tecnológicamente innovadoras vengan a instalarse al país. En otras palabras, sería irracional que Chile no aprovechara sus ventajas comparativas.

El cobre ha sido el motor de crecimiento de la economía chilena. Pero, para que siga siendo la viga maestra del desarrollo, el cobre tiene que transformarse en plataforma de innovación tecnológica. Este es el propósito de esta HRT.

Fuente: Meller, P. (2013). La viga maestra y el sueldo de Chile. UQBAR



Fotografía Codelco (Planta División El Teniente)

02

LÓGICA Y
METODOLOGÍA
DE LA HOJA
DE RUTA

El valor de la Hoja de Ruta no sólo radica en el resultado obtenido, si no también, en el proceso de deliberación y acuerdo de actores respecto de los desafíos comunes de la industria

HOJAS DE RUTA TECNOLÓGICAS: EXPERIENCIAS INTERNACIONALES Y MEJORES PRÁCTICAS

Las hojas de ruta tecnológicas no son algo nuevo, éstas nacieron como una herramienta para la planificación de asuntos tecnológicos al interior de Motorola en la década de 1970, con el objetivo de alinear el desarrollo de productos con el de sus necesarias tecnologías de apoyo y determinar los mejores caminos para abordar mercados futuros (Bernal *et al.*, 2009), (*Industry Canada*, 2007a), (Phaal & Probert, 2009), (Willyard & McClees, 1987).

Esta práctica, que luego se fue expandiendo a dimensiones más amplias de negocios, representa un importante apoyo para los responsables de innovación de las empresas, a quienes les permite definir y orientar el desarrollo tecnológico por adelantado.

En la medida que su uso se expandió, las hojas de ruta fueron adaptándose para cumplir distintos objetivos. La primera hoja de ruta a nivel de sector productivo fue la de la Industria Internacional de Semiconductores en 1992, a nivel global, muy influyente al definir la visión colectiva de la industria y establecer un referente para la innovación y el desarrollo tecnológico en el sector (Phaal & Probert, 2009); (Schaller, 2004).

Gobiernos de distintas partes del mundo aprendieron de estas experiencias y junto a otras organizaciones comenzaron a impulsar el establecimiento de hojas de ruta para el desarrollo de sus industrias, lo que a su vez, fue reflejando el entendimiento de la innovación como un fenómeno sistémico que ocurre en un ecosistema en el que los actores pueden enfrentar diversos problemas de acción colectiva. Un caso destacado en la elaboración de hojas de ruta exitosas es el de Canadá, cuyo gobierno federal ha reconocido explícitamente que

La redacción de este capítulo estuvo a cargo del equipo de Fundación Chile, compuesto por: Francisco Klima, Tomás González, Nicole Valdebenito, Hernán Araneda y Patricio Meller.

para que sus industrias “logren ser innovadoras y competitivas a nivel mundial, los actores de éstas deben colaborar para abordar sus desafíos tecnológicos comunes” (Industry Canada, 2007a).

Bajo esta idea, *Industry Canada* estableció una iniciativa oficial y específica en la materia, dentro de la cual, desde 1995, ha desarrollado más de una veintena de hojas de ruta sobre industrias tan diversas como las de transformación de aluminio, tecnología wireless, plásticos, impresión y comunicación gráfica, textiles, componentes aeroespaciales, integración de sistemas de gestión de cabinas de aeronaves y medios digitales.

Existen también experiencias en otros países. De acuerdo a Phaal & Probert (2009), un estudio del *Institute for Manufacturing (IfM)* de la Universidad de Cambridge identificó más de 900 ejemplos de hojas de ruta que habían sido elaboradas para una amplia variedad de sectores a lo largo del mundo, incluyendo energía, transporte, materiales, espacio aéreo, electrónicos, TICs, manufactura, construcción, salud, defensa y ciencias básicas.

Algunos ejemplos adicionales del uso de esta herramienta específicamente en el sector minero son los siguientes: *Taking South Africa Mining to 2030 through Resourceful Collaboration*, *Roadmap for European Mining Regions* y la serie de hojas de ruta tecnológicas de Estados Unidos *Mining Industry of the Future*, todas documentadas en las referencias de este documento.

Como vemos, a nivel de sector productivo, una hoja de ruta tecnológica puede cumplir diversos roles; entre estos:

- Permite y posibilita la interacción entre los sectores privado y público para detectar cuellos

de botella y oportunidades existentes en problemas de inversión presentes y futuros.

- La interacción de los sectores privado y público a través de la hoja de ruta tecnológica permite la generación de conocimiento que ayuda a reducir, aunque no eliminar, la incertidumbre futura. Esto, dado que la característica central de los eventos futuros es su incertidumbre.
- Puede desempeñar una labor importante para generar innovación e inducir un avance cooperativo en actividades de investigación y desarrollo. Para este efecto, la hoja de ruta tecnológica articula los elementos necesarios para focalizar y priorizar las necesidades tecnológicas futuras.

En esencia, la hipótesis implícita en una hoja de ruta tecnológica es que el futuro puede ser construido, lo que se contrapone a una actitud pasiva para la cual el futuro simplemente ocurre. Por esto, la etapa inicial consiste en concordar una visión de futuro y especificar los objetivos y dilemas del sector, en este caso la minería, para un período de entre 10 y 20 años.

Es así como ayuda a establecer un marco de referencia para coordinar las actividades de I+D entre las empresas del sector, las empresas proveedoras y también la academia científica. Esto permite una asignación más eficiente de los recursos de I+D.

Cabe señalar que, del análisis de las experiencias internacionales, también se evidencia que la exitosa implementación de todo lo que se propone en una hoja de ruta resulta algo difícil (Industry Canada, 2007a). Incluso las empresas que deciden trabajar a partir de este instrumento, enfrentan varias

complicaciones para hacerlo y, a esto se suma, una serie de problemas de acción colectiva cuando se trata de la hoja de ruta de todo un sector productivo.

Un punto crítico para el éxito de esta herramienta es su implementación. Los factores más importantes para facilitar el cumplimiento de lo planteado son: que las empresas tengan una necesidad de negocios clara, que exista el deseo de desarrollar procesos de negocios efectivos, que estén las personas correctas involucradas y que exista compromiso de parte de líderes de alto rango. Por su parte, los factores que obstaculizan el cumplimiento son: la sobrecarga de iniciativas, la distracción ante metas de corto plazo y la ausencia de suficiente información o conocimiento disponible (Phaal *et al.*, 2001).

A pesar de estas dificultades, los expertos coinciden en que, más allá de la implementación, el ejercicio de formulación de una hoja de ruta ya tiene un gran valor en sí mismo, al lograr reunir a los representantes de la industria y del sector público para que debatan y determinen conjuntamente los desafíos y oportunidades, forjando relaciones colaborativas basadas en el diálogo y el entendimiento (Bernal *et al.*, 2009), (Collins & Pincock, 2010), (García & Bray, 1997), (Industry Canada, 2007a), (Phaal *et al.*, 2001).

Del mismo modo, para aprovechar por completo los beneficios de constituir una hoja de ruta, resulta fundamental establecer una dinámica de trabajo permanente en torno a ello, para desarrollar una cultura de *roadmapping*.

Mantener la hoja de ruta con vida es un desafío importante, es la única manera de obtener el beneficio total de este ejercicio. Comunicar,

actualizar y profundizar el contenido de una hoja de ruta requiere cuidadosas consideraciones sobre las herramientas y los procesos necesarios. Por esto y por la existencia de problemas de acción colectiva, las experiencias internacionales muestran que es sumamente conveniente la existencia de un rol articulador y facilitador en la formulación, implementación y actualización de una hoja de ruta.

METODOLOGÍAS Y ETAPAS PARA LA CONSTRUCCIÓN DE LA HOJA DE RUTA DE LA MINERÍA CHILENA

El valor de la Hoja de Ruta Tecnológica para la minería chilena, no radica únicamente en el resultado obtenido, sino también en el proceso de deliberación y acuerdo de un grupo significativo de actores respecto de los desafíos comunes de la industria.

De esta forma, la Hoja de Ruta Tecnológica desempeña funciones a nivel interno y externo:

- A nivel interno del sector cuprífero genera un consenso respecto de la trayectoria futura de la minería, identificando los problemas y desafíos tecnológicos.
- A nivel externo proporciona la información para estimular la investigación colaborativa del mundo académico, de los institutos tecnológicos y empresas proveedoras y consultoras.

La construcción de la Hoja de Ruta Tecnológica (HRT) contenida en este documento fue realizada en cuatro etapas consecutivas: i) Construcción y validación de la visión; ii) Identificación de desafíos tecnológicos y priorización de núcleos; iii) Talleres para la elaboración de la Hoja de Ruta Tecnológica; iv) Validación de la Hoja de Ruta Tecnológica.

FIGURA/2
Etapas para la construcción
de la Hoja de Ruta



Fuente: elaboración propia

A continuación se detalla cada una de estas etapas.

CONSTRUCCIÓN Y VALIDACIÓN DE LA VISIÓN

La etapa inicial para producir una hoja de ruta consiste en concordar una visión de futuro y especificar los objetivos de la industria para un período de 10 a 20 años. Esta visión de futuro, compartida y generada por todos los actores relevantes asociados al sector (las empresas mineras, las empresas proveedoras de insumos, consultores, académicos, agentes y actores vinculados a la minería), permite identificar los desafíos existentes y las alternativas tecnológicas para lograr los objetivos.

Durante el año 2014 se conformó, al alero del Consejo Nacional de Innovación para el Desarrollo (CNID), la “Comisión Minería y Desarrollo de Chile”

que, a través de un proceso de trabajo participativo con actores públicos y privados, desarrolló la agenda “**Minería: Una Plataforma de Futuro para Chile**”, documento en el que se establece una visión al 2035 y se definen prioridades estratégicas para que la minería chilena consolide sus aspiraciones, reafirme su liderazgo a nivel mundial, genere un círculo virtuoso de innovación en su entorno y se convierta en un modelo de sustentabilidad e inclusividad.

Con fecha 21 de enero de 2015, el Consejo Directivo del Programa Nacional de Minería Alta Ley, acordó que la construcción de la Hoja de Ruta de la Minería Chilena se enmarcará en la visión establecida en dicha agenda, particularmente en los aspectos relacionados con el desarrollo de una minería innovadora.

IDENTIFICACIÓN DE DESAFÍOS TECNOLÓGICOS Y PRIORIZACIÓN DE NÚCLEOS DE TRABAJO

Como se señaló anteriormente, uno de los factores de éxito en la construcción y posterior implementación de una hoja de ruta radica en la existencia de voluntad por parte de los actores para desarrollar acciones en torno a los desafíos identificados.

Para la identificación de Desafíos Tecnológicos se sistematizaron los resultados obtenidos por experiencias previas. En específico, se utilizó como base el *Copper Technology Roadmap* realizado por Amira (*Australian Minerals Industry Association*) en 2004 y 2006.

Posteriormente, se realizaron 50 entrevistas a líderes y expertos de la industria minera nacional, a través de las cuales se validaron o descartaron desafíos que ya habían sido levantados y se identificaron otros nuevos.

La información obtenida durante el proceso fue analizada y priorizada en función de dos criterios:

- Impacto: La resolución de los desafíos identificados debía tener un impacto significativo para alcanzar la visión propuesta.
- Transversalidad: Los desafíos debían ser problemáticas comunes y transversales a la industria.

Posteriormente, **los Desafíos Tecnológicos priorizados fueron agrupados en núcleos traccionantes**. Se utilizó el término "traccionantes" para denotar todos aquellos ámbitos que, en el corazón del proceso minero, constituyen los desafíos tecnológicos más cruciales para la evolución de la industria, siendo éstos: Operaciones y Planificación Minera; Concentración de Minerales; Hidrometalurgia; Relaves; Fundición y Refinería.

Complementariamente se definieron núcleos habilitadores, los que agrupan a aquellas dimensiones que, sin ser exclusivas del proceso minero, condicionan la capacidad de la industria para llevar a cabo su plan de desarrollo. Éstos son: Capital Humano; Adopción de nuevas Tecnologías de la Información y Comunicaciones (Minería inteligente); Proveedores e Innovación.

NÚCLEOS TRACCIONANTES

Se utiliza para denotar todos aquellos ámbitos que, en el corazón del proceso minero, constituyen los desafíos tecnológicos más cruciales para la evolución de la industria, siendo éstos: Operaciones y Planificación Minera; Concentración de Minerales; Hidrometalurgia; Relaves; Fundición y Refinería.

NÚCLEOS HABILITADORES

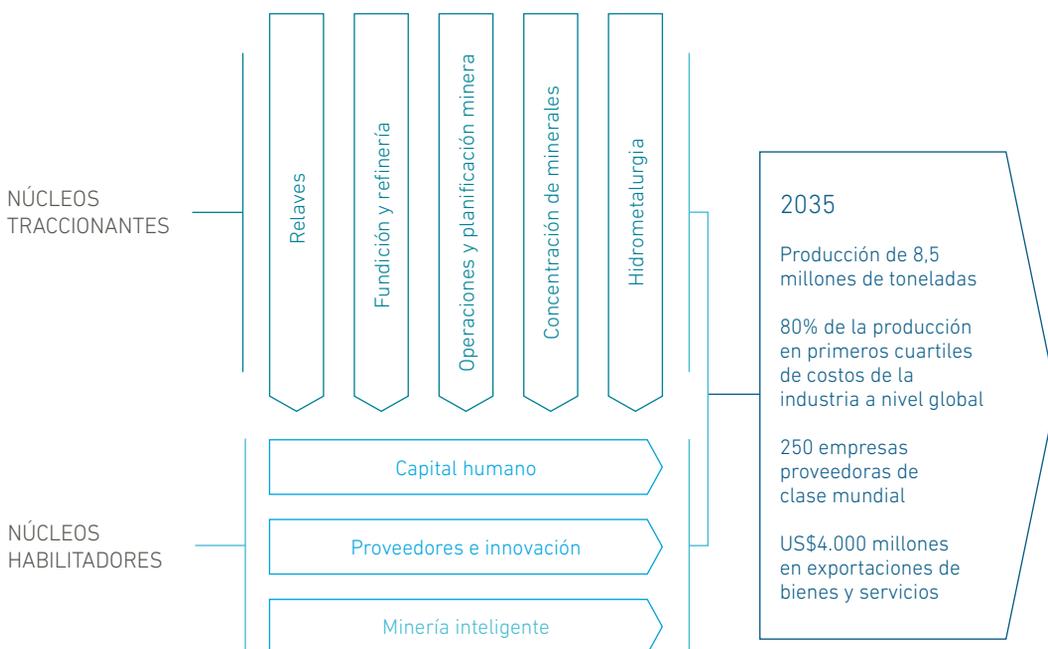
Se utiliza para denotar aquellas dimensiones que, sin ser exclusivas del proceso minero, condicionan la capacidad de la industria para llevar a cabo su plan de desarrollo. Éstos son: Capital Humano; Adopción de nuevas Tecnologías de la Información y Comunicaciones (Minería inteligente); Proveedores e Innovación.



Fotografía Max Donoso (Minera Hierro Atacama)



FIGURA/3
Núcleos Hoja de Ruta
y metas al 2035*



*Metas definidas en el marco de la agenda Minería: Una Plataforma de futuro para Chile

Fuente: elaboración propia

TALLERES DE ELABORACIÓN DE LA HOJA DE RUTA

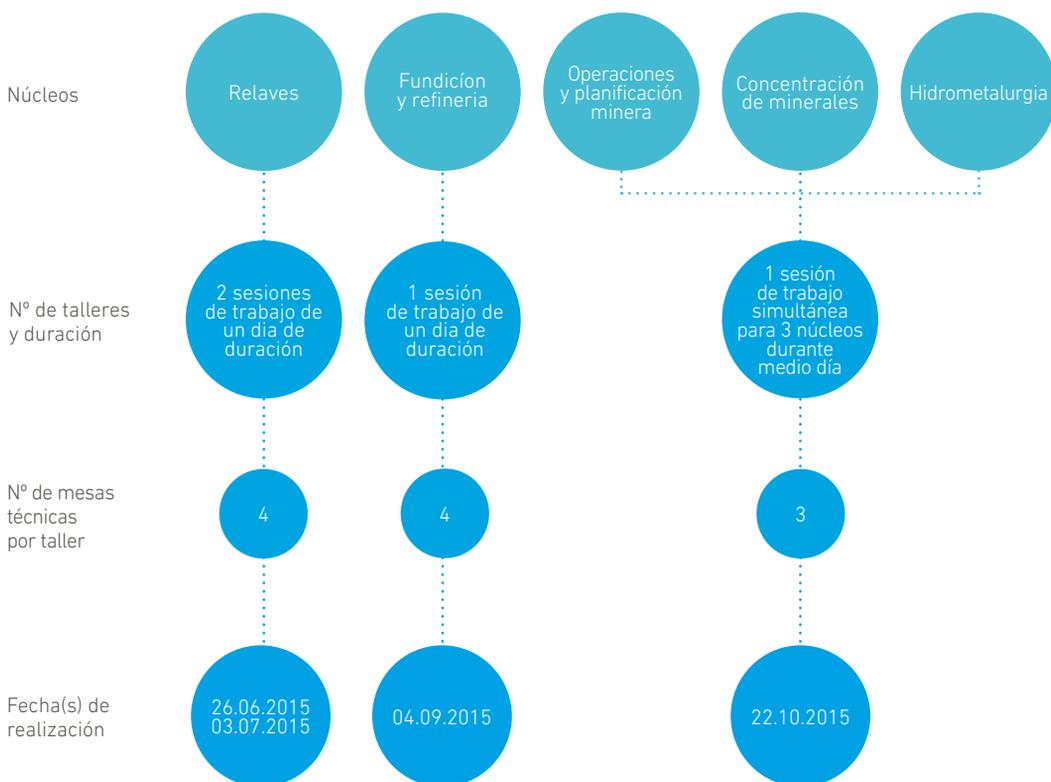
Una vez concluida la etapa anterior, se realizaron talleres técnicos para formular una hoja de ruta por cada núcleo priorizado. Los talleres siguieron la metodología para la formulación de un Plan Tecnológico (*T-Plan*) de la Universidad de Cambridge (Phaal *et al.*, 2001), (Phaal , Farrukh & Probert, 2009), la cual consta de cuatro secciones: **retos, soluciones, tecnologías y mapeo**. Dicha metodología fomenta la participación y colaboración entre actores para concordar soluciones y generar planes de acción que permitan hacer frente a desafíos comunes de un sector.

Los talleres contaron con el apoyo directo de un consultor internacional del IfM (*Institute for Manufacturing*) de la Universidad de Cambridge. Adicionalmente, se desarrollaron capacidades en un equipo de consultores de Fundación Chile que facilitó y sintetizó las jornadas, empleando metodologías complementarias para el levantamiento de información.

Para cada núcleo traccionante de la Hoja de Ruta Tecnológica se realizó un estudio de línea base tecnológica en el marco de los desafíos ya identificados en la etapa anterior. Con dicha información, los participantes de los talleres construyeron el plan tecnológico de cada núcleo que identifica desafíos, soluciones, líneas de I+D y recursos para su desarrollo.

La cantidad de sesiones y duración de los talleres dependió de la complejidad de cada núcleo. La siguiente figura sintetiza la estructura de trabajo para cada uno de los núcleos traccionantes.

FIGURA/4
Estructura de trabajo
núcleos traccionantes



Fuente: elaboración propia

A los talleres fueron convocados representantes de las compañías mineras, del sector público, de la academia, de centros tecnológicos, de proveedores especializados, consultores y expertos en minería en el ámbito correspondiente a cada núcleo.

FIGURA/5
 Síntesis del proceso de construcción de HRT



Fuente: elaboración propia

Cabe señalar que, aún cuando los núcleos habilitadores fueron priorizados y validados por el Directorio del Programa Nacional de Minería Alta Ley, no se realizaron talleres de trabajo en torno a ellos debido a la naturaleza y cantidad de información disponible al respecto.

Adicionalmente, en este documento se incluyen algunos apartados referidos a desafíos de la minería chilena, que si bien no formaron parte del proceso de construcción de la Hoja de Ruta Tecnológica, poseen una relevancia central en la sustentabilidad futura del negocio minero. El contenido expresado en dichos apartados se construyó a partir de información pública disponible y aportes específicos de expertos e instituciones.

VALIDACIÓN DE LA HOJA DE RUTA

Los resultados de cada una de las etapas seguidas para la construcción de esta Hoja de Ruta fueron validados por el **Directorio del Programa Nacional de Minería Alta Ley**.

Una vez concluido el proceso, se convocó a una sesión extraordinaria de Directorio, realizada en formato de taller. En dicha instancia los miembros del directorio validaron y priorizaron los desafíos y soluciones identificados.



Mesa Técnica Núcleo Relaves

EL CASO DE AMIRA COPPER TECHNOLOGY ROADMAP 2004 - 2006

En 2003 la Asociación Australiana de la Industria de Minerales, Amira², y nueve de las empresas más grandes de la industria de cobre del mundo, decidieron emprender una hoja de ruta tecnológica para abordar los principales desafíos que enfrentarían en la década siguiente. Entre las empresas participantes se encontraban Codelco, Antofagasta Minerals, Anglo American, BHP Billiton, CVRD, Rio Tinto y Teck Cominco Phelps Dodge (adquirida posteriormente por Freeport-McMoRan).

De este esfuerzo surgió la Hoja de Ruta Tecnológica del Cobre (Amira, 2004), la que en 2006 fue revisada y ajustada a los desafíos específicos de Chile y el resto de América Latina (Amira, 2006). Es relevante destacar que, a pesar de que este trabajo fue realizado justo al inicio del *boom* del precio de los *commodities*, en la hoja de ruta de Amira se señala explícitamente que la minería del cobre ya enfrentaba serios desafíos, lo que enfatiza la utilidad de esta herramienta para anticipar riesgos futuros.

A continuación, se presenta una revisión del trabajo de Amira (2004, 2006), pues resulta conveniente y eficaz examinar las conclusiones y sugerencias de esa hoja de ruta para constatar el valor agregado presentado en este libro.

Lo primero que cabe señalar, es la diferencia de enfoque que existe entre el trabajo de Amira, que es una hoja de ruta

estrictamente tecnológica orientada a cumplir los objetivos de las grandes empresas de la industria, y la Hoja de Ruta contenida en el presente documento, que además de lo anterior, presenta una estrategia de desarrollo país en torno a la minería.

Para apreciar lo mencionado, es ilustrativo revisar la misión del trabajo de Amira, que se comprometía a “desarrollar un marco alrededor del cual los productores globales [de cobre] pudieran colaborar para hacer frente a los desafíos tecnológicos comunes que enfrentaban para su competitividad futura y la sostenibilidad de la industria” Los objetivos que con éste se buscaba:

- Reducir los costos de producción.
- Alcanzar un balance aceptable entre los efectos económicos, ambientales y sociales.
- Gestionar los riesgos tecnológicos e inversión.
- Mejorar la seguridad, salud e higiene de la industria.
- Mejorar la eficiencia energética en un 10% mediante la implementación de tecnología mejorada.

Estos cinco objetivos se concretaron y especificaron en los siguientes tres focos:

- **Mejoramiento en la eficiencia de uso del capital fijo y de los activos.** Las prioridades de I+D vinculadas a este foco son: (i) optimización de la operación mina a cátodo; (ii) control de todo el proceso en tiempo real; (iii) compartir la información y conocimiento.

² *Australian Minerals Industry Association.*

· **Nuevas tecnologías para el procesamiento minero.** Las prioridades de I+D vinculadas a este foco son: (i) conminución (trituración) inteligente; (ii) sistema inteligente para la extracción del mineral; (iii) minería in situ; (iv) tecnologías para aplicar procesamiento “seco”.

· **Desarrollo sustentable.** Las prioridades de I+D vinculadas a este foco son: (i) uso eficiente del agua; (ii) modelo de sustentabilidad integrado; (iii) diseño para el cierre de un yacimiento.

Como resultado del ejercicio de focalización anterior se seleccionaron 13 proyectos considerados como prioridades para I+D:

1. Tronadura eficiente del mineral de cobre.
2. Automatización continúa del proceso minero.
3. Control selectivo de la extracción de material minero.
4. Análisis de los procesos mineros para determinar las oportunidades existentes de ahorro de tiempo.
5. Mejoramiento en la recuperación de producto y en la reducción de uso energético.
6. Remoción de material indeseable previo a procesos de conminución y lixiviación.
7. Mejoramiento de la recuperación de agua de los relaves.
8. Preacondicionamiento de la roca para facilitar su fracturación.
9. Mejoramiento del uso de sensores (en línea) en la flotación.

10. Monitoreo remoto de la lixiviación en pilas.
11. Aumento de la eficiencia energética en el movimiento de materiales.
12. Desarrollo de tecnologías para el proceso de secado (molienda).
13. Optimización integral del negocio minero.

El trabajo de Amira se concentró en las posibilidades de investigación y desarrollo precompetitivas, apostando a complementar los esfuerzos internos de cada compañía, así como también proveer a éstas un mecanismo mediante el cual ejercicios de I+D de mayor riesgo pudiesen ser perseguidos colaborativamente.

A través de un proceso que comenzó por la definición de los impulsores de negocio claves y las áreas de enfoque, siguiendo con la identificación de desafíos y barreras, se definieron las prioridades de investigación tecnológica para la extracción y procesamiento del cobre.

Es extremadamente relevante tener presente que vivimos en una época en que las tecnologías avanzan a una velocidad exponencial. Si bien la Hoja de Ruta de Amira (2004, 2006) constituyó un hito para la época en que fue realizada, en la década que ha transcurrido entre su última actualización y el presente, las posibilidades que abre la tecnología se han ampliado sustancialmente. Por lo anterior, es importante que la minería chilena revise frecuente y sistemáticamente cuáles son

las mejores formas de abordar los desafíos tecnológicos que enfrenta, siendo consciente además de incorporar los actuales requerimientos sociales y ambientales.

A pesar de lo anterior y de las diferencias en misión y objetivos buscados, las tendencias, barreras y las consecuentes necesidades de investigación identificadas en el informe de Amira son consistentes con lo identificado en esta Hoja de Ruta, existiendo traslajos en ciertos desafíos tecnológicos de la industria minera que aún persisten. Sin embargo, los tópicos cubiertos por Amira (2004, 2006) representan un subconjunto acotado y específico de la presente Hoja de Ruta.

Cabe señalar que en Amira (2004, 2006) se destacan también desafíos no tecnológicos para las compañías mineras relacionados con capital humano, capacidades e infraestructura para investigación y desarrollo, así como también con riesgo soberano; aspectos que hoy siguen estando vigentes y constituyen asuntos que podrían ser instrumentales para promover la colaboración entre industria, academia y agencias de gobierno.

COMPONENTES DE LA PRESENTE HOJA DE RUTA Y SUS DIFERENCIAS RESPECTO DEL TRABAJO DE AMIRA

Los nuevos componentes incluidos en la actual Hoja de Ruta son:

1. Enfatiza el importante rol que el cobre ha desempeñado en el desarrollo económico chileno y cómo éste se ha

acentuado en los últimos dos décadas. Además, destaca la preeminencia de Chile como productor cuprífero mundial en el siglo XXI (30% a 32% de la producción mundial), lo cual duplica la importancia relativa que tenía en el siglo XX (16%).

2. Plantea que la inserción de Chile en el mundo global requiere de la generación local de capacidad innovadora y de la generación de innovaciones tecnológicas. Una premisa explícita en la presente HRT es que el cobre puede y debe usarse como plataforma para potenciar la innovación. La explotación presente y futura de los yacimientos cupríferos involucra grandes desafíos tecnológicos y la resolución de éstos puede generar *expertise* e innovaciones exportables.

3. Enfatiza la importancia de potenciar el Programa de Proveedores de Clase Mundial, asociado a las Grandes Empresas Mineras. Este Programa es un mecanismo para generar y diseminar la capacidad innovadora a través de diversas regiones del país. Así, **cuando el cobre se acabe, quedará un importante legado: la capacidad de innovar.**

4. Identifica una serie de desafíos cruciales que no fueron percibidos en Amira (2004, 2006):

- Relaves y su impacto territorial, especialmente en la zona central de Chile.
- Uso de energías renovables no convencionales.

- Estrategias para mitigar la huella de carbono.
- Estrategias para tener fundiciones y refinerías competitivas en Chile.
- Evolución y competitividad de la actividad de exploración en Chile.

Por último, como también lo reconocen los expertos internacionales, cabe destacar el proceso de debate nacido de la elaboración de la presente Hoja de Ruta Tecnológica. Este proceso ha generado un gran capital social en el sector minero, que ha permitido un consenso respecto del futuro del cobre chileno. En la actualidad, hay una convergencia sobre los objetivos en torno a los cuales surgen los principales desafíos. Las empresas asociadas a la minería han descubierto que la cooperación dentro del sector permite resolver problemas transversales comunes que benefician a cada empresa y a la sociedad en general.



Fotografía: Mar Donoso (Spain) - iStockphoto.com

03

LA MINERÍA
DEL FUTURO,
VISIÓN AL 2035

La minería está
transitando a una nueva
etapa y sus principales
desafíos son incorporar
más conocimiento,
innovación y desarrollo
tecnológico

VISIÓN ESTRATÉGICA AL 2035 Y PRINCIPALES MÉTRICAS DE IMPACTO

La agenda “Minería: Una Plataforma de Futuro para Chile”, establece como visión que, al 2035, la minería chilena habrá logrado:

“Exportar 130 a 150 millones de toneladas de cobre y otros minerales, durante los 20 años que median entre 2015 y 2035, habiéndose materializado la enorme inversión que ello requiere. Ochenta por ciento de esta producción estará ubicada en los dos primeros cuartiles de costos de la industria a nivel global. Además se habrán creado 250 empresas proveedoras de clase mundial que exportarán tecnologías y servicios intensivos en conocimiento con negocios ese año por un total de US\$4.000 millones.

Establecer un liderazgo global en minería sostenible. Esto será posible gracias a una gestión ambiental con normas y referencias para el sector basadas en las mejores prácticas industriales, que permitan racionalizar las exigencias y los procesos de permisos, facilitando el control por parte del Estado.

De esta forma se habrá reducido la demanda por agua dulce y energía, así como las emisiones de GEI, respecto del año base proyectado (BAU 2010), y no se producirán pérdidas netas de biodiversidad, contribuyendo así a la conservación del patrimonio natural del país.

Crear relaciones de confianza y colaboración entre todas las partes involucradas en el quehacer minero. Lo anterior se hará posible mediante un diálogo permanente,

La redacción de esta sección estuvo a cargo del equipo de Fundación Chile, compuesto por: Francisco Klima, Tomás González, Nicole Valdebenito y Hernán Araneda.

fluido, transparente y en igualdad de condiciones y se cristalizará en acuerdos de beneficio compartido que, al implementarse, permitirán avanzar en el progreso del bien común. Asimismo estará arraigada la existencia y el cumplimiento de estándares de relacionamiento comunitario y laboral, que comprometen el respeto a los acuerdos por todas las partes en una relación de largo plazo orientada al mutuo beneficio”.

Tal como se señalara, el Programa Nacional de Minería Alta Ley promueve el atributo “minería innovadora”, a partir del cual se busca que la industria mejore su competitividad y productividad y, a la vez, genere condiciones para que emerja un ecosistema robusto de I+D+i con capacidades y conocimientos locales.

MÉTRICAS DE IMPACTO

Dada la visión y el alcance del Programa Nacional de Minería Alta Ley, se establecieron cuatro métricas de impacto al 2035:

- Alcanzar una producción acumulada de entre 130 y 150 millones de toneladas métricas de cobre y otros minerales.
- Situar el 80% de la producción de mineral del país en los dos primeros cuartiles de costos de la producción mundial.
- Desarrollar al menos 250 empresas proveedoras de clase mundial.
- Alcanzar US\$4.000 millones en exportaciones de bienes y servicios asociados a la minería.

Las métricas de impacto del Programa se establecen en dos niveles de trabajo que se complementan y retroalimentan mutuamente: el primero de ellos establece el fortalecimiento de la

productividad y competitividad de la industria, del cual derivan las dos primeras metas del Programa; mientras que el segundo nivel enfatiza en el desarrollo de capacidades locales, ámbito que se operacionaliza a través de las metas tres y cuatro. La implementación de la presente Hoja de Ruta debería contribuir al cumplimiento de estas metas.

La figura 6 expone, para cada una de las metas señaladas, la línea base calculada al año 2015.

FIGURA / 6
Línea base 2015 y metas al 2035

	LÍNEA BASE 2015	META 2035
	5,5 millones de toneladas métricas de cobre promedio producidas durante los últimos 10 años.	7,5 millones de toneladas métricas de producción anual promedio en los próximos 20 años.
	40% de producción en primeros cuartiles de costos de la industria a nivel global	80% de producción en primeros cuartiles de costos de la industria a nivel global.
	65 empresas proveedoras de clase mundial	250 empresas proveedoras de clase mundial
	US\$537 millones en exportaciones de bienes y servicios vinculados a minería	US\$4.000 millones en exportaciones de bienes y servicios vinculados a minería.

Fuente: elaboración propia

Como se puede apreciar, la distancia entre la situación actual y la deseada se relaciona con el aumento de la capacidad de producción, la reducción de los costos de la industria, el desarrollo de empresas proveedoras de clase mundial y el aumento en la exportación de bienes y servicios asociados a la minería. A continuación se aborda en profundidad cada una de estas brechas.

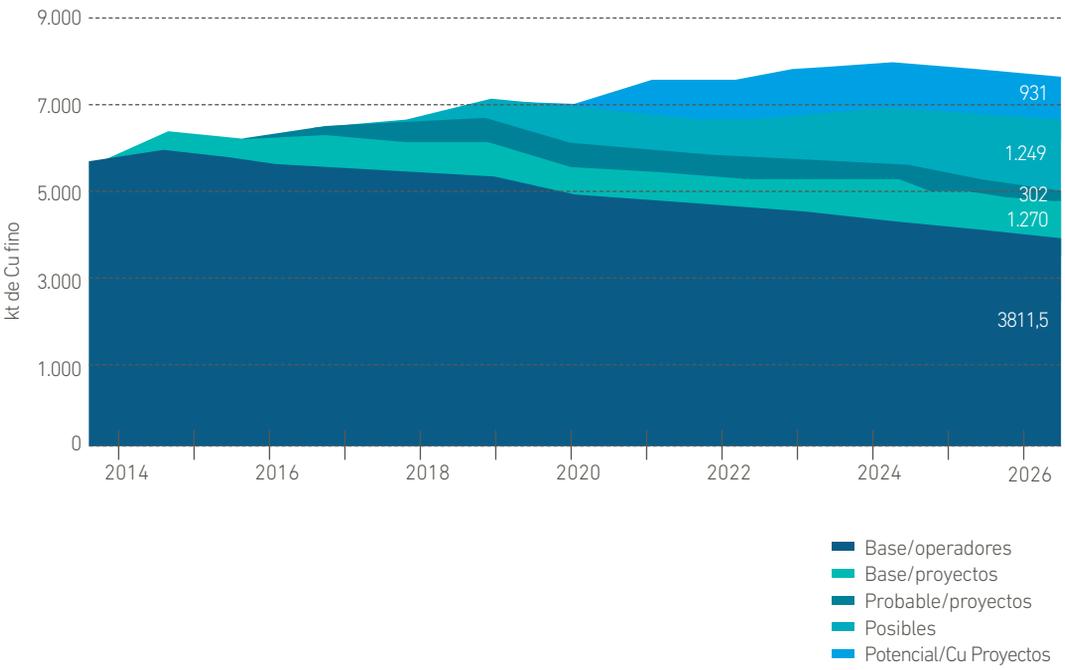
Brecha en la capacidad de producción

Una de las principales métricas de impacto asociadas al Programa Nacional de Minería Alta Ley dice relación con el aumento en la capacidad de producción de cobre y otros minerales al 2035. Cumplir con este objetivo le permitiría a Chile mantener su participación en el mercado mundial en alrededor de un tercio, lo que además es consistente con el porcentaje de las reservas mundiales de cobre que ostenta el país.

Aunque existen algunos ejercicios para estimar la capacidad de producción de la minería chilena al 2035 en un escenario hipotético de total materialización de proyectos (véase Lagos *et al.*, 2015), no existe suficiente certeza al respecto, por lo cual se trabajará con la información de Cochilco (2015).

El gráfico 9 muestra la capacidad estimada de producción de cobre mina en Chile al 2026. La estimación se realizó tomando en consideración el escenario base (operaciones mineras actuales y cartera de proyectos vigentes) y tres escenarios proyectados, los que presentan gradualmente mayor riesgo de materialización, de acuerdo a su condición y estado actual.

GRÁFICO/9
 Capacidad estimada de
 producción de cobre mina en
 Chile al año 2026 kt de Cu fino



Fuente: Cochilco (2015)

Para alcanzar la meta asociada al Programa Nacional de Minería, la industria minera nacional tendría que producir anualmente un promedio de 7,5 millones de toneladas métricas durante los próximos 20 años. La brecha respecto de este escenario es sustantiva si se considera que durante los últimos 10 años la minería chilena ha producido un promedio anual de 5,5 millones de toneladas métricas de cobre.

Más aún, de mantenerse las condiciones actuales, la producción de cobre alcanzaría su máximo durante el año 2017 con 6.304 kt de Cu Fino. Posteriormente, ésta comenzaría a disminuir paulatinamente hasta llegar en el 2026 a 5.081 kt de Cu Fino. Este escenario representa una condición de bajo potencial, donde la minería chilena pierde competitividad y liderazgo respecto de la producción mundial y se reducen las posibilidades del país para iniciar un proceso de diversificación productiva en torno al desarrollo de una industria de proveedores de bienes y servicios, pues la escala y complejidad de los desafíos que podrían estimular el desarrollo local de conocimiento y tecnologías sería baja.

Por otra parte, si Chile lograra superar las barreras que hoy impiden el desarrollo competitivo de la minería, la producción de cobre podría alcanzar 7.563 kt de Cu Fino al 2026.

Aun cuando la producción todavía estaría por debajo de la meta propuesta en el marco del Programa Nacional de Minería, se considera que éste sería un escenario de alto potencial que no solo aseguraría la competitividad de la minería chilena en el contexto de la producción mundial, sino que también propiciaría el surgimiento de un proceso de expansión productiva asociada al

desarrollo de nuevas capacidades tecnológicas, institucionales y de capital humano, entre otras. La brecha, en este sentido, se asocia a la distancia existente entre la producción proyectada para el primer y segundo escenario. Alcanzar la producción deseada requiere de la materialización de los proyectos mineros clasificados como “probables”, “posibles” y “potenciales”.

Brecha en los costos de la industria

La segunda meta dice relación con que el 80% de los costos de la industria se encuentre en los primeros dos cuartiles de la industria a nivel global, en el contexto de que hoy uno de los aspectos que más inquietan a las empresas mineras es la pérdida de competitividad.

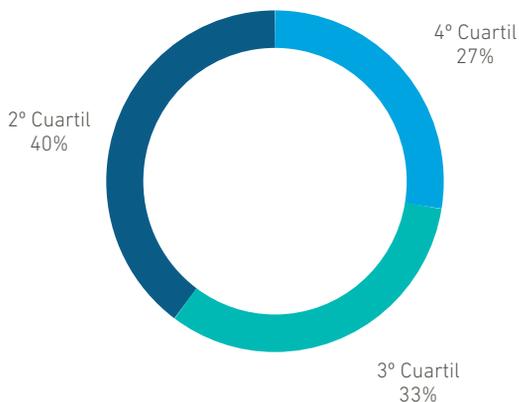
A modo de ejemplo, en la década 2003-2013 se produjo un aumento de los costos en torno a 250% y, en términos relativos, Chile pasó de poseer mejores costos que el promedio de los países, a ser un 6% menos competitivo.

Es cierto que para todos los países cada vez es más difícil diferenciarse en costos, y que la competitividad para atraer inversión está siendo definida por los factores no geológicos, en los que Chile se ubica dentro de los países mejor rankeados. Sin embargo, los costos de producción representan una desventaja que debe ser abordada. La brecha respecto de la meta establecida para el 2035 es considerable.

Tal como se observa a continuación en el gráfico 10, más de un 60% de la producción nacional se ubica en los dos últimos cuartiles de costos de la producción mundial, mientras que solo el 39% restante se ubica en el segundo cuartil y nada en el primero.

GRÁFICO/10

Estructura de costos de la industria minera en Chile, según cuartiles



Fuente: Informe Internacional de la Industria Minera de Scotiabank GBM, citado en Leaders and Mining (Krebs, 2014)

De acuerdo a información de Cochilco, en 2014 solo Codelco y otras seis faenas mineras produjeron el 80% del total de cobre de mina del país, (Cochilco, 2015a) lo que muestra que esta transformación en el nivel de costos de la producción nacional será principalmente el resultado de los avances que hagan las grandes empresas de la industria para posicionarse en este nivel de competitividad mundial.

Brecha en empresas proveedoras de clase mundial

La tercera métrica es desarrollar 250 empresas proveedoras de clase mundial, las que para efectos del presente documento se definen como aquéllas que pueden competir en términos de eficiencia y calidad en cualquier parte del mundo.

Como criterio para operacionalizar el estándar señalado, se ha considerado como empresa de clase mundial a todos aquellos proveedores que hayan exportado bienes y/o servicios por más de un millón de dólares consecutivamente durante los años 2012, 2013, 2014 (correspondientes a los últimos años con cifras disponibles antes de la realización de este informe).

Como se observa en la *tabla 1*, solo 65 empresas proveedoras de la minería cumplen con las condiciones antes señaladas, lo que equivale a 26% de la meta propuesta. Estas empresas representan el 20% de los proveedores que exportan y los montos exportados constituyen más de 90% del total exportado por el sector.

TABLA/1
Proveedores de clase mundial

Rango de tamaño según ventas	2012		2013		2014	
	Número de empresas	Monto (US\$MM FOB)	Número de empresas	Monto (US\$MM FOB)	Número de empresas	Monto (US\$MM FOB)
Grande	57	594 M	57	520 M	57	484 M
Pyme	8	10 M	8	10 M	8	11 M
Total general	65	604 M	65	530 M	65	495 M
Resultados globales sector	345	654 M	324	572 M	329	537 M
Participación en relación al total	19%	92%	20%	93%	20%	92%

Fuente: elaboración propia a partir de Fundación Chile (2015)

Brecha en exportación de bienes y servicios asociados a la minería

La métrica asociada a exportaciones de bienes y servicios ligados a la industria minera establece alcanzar, al 2035, US\$4.000 millones en exportaciones, lo que implicaría, al menos, igualar los montos exportados por la industria salmonera el año 2014.

Fundación Chile, en conjunto con ProChile y la empresa Achilles realizaron, en el marco del Programa Nacional de Minería Alta Ley, el

Primer Reporte de Exportaciones de Proveedores de la Minería Chilena. La *tabla 2* muestra el número de empresas proveedoras y los montos exportados durante el período 2010 - 2014, las cuales alcanzaron un máximo durante 2012 de US\$654 millones, y luego comenzaron a disminuir paulatinamente hasta llegar en 2014 a US\$537 millones. Esta cifra tendría que aumentar al menos 7,4 veces para alcanzar la meta propuesta (US\$4.000 millones).

TABLA/2
Exportación y número de
empresas proveedoras
2010 - 2014

	2010	2011	2012	2013	2014
Monto (US\$MM FOB)	503	649	654	572	537
N° Empresas	308	310	345	324	329

Fuente: elaboración propia a partir de Fundación Chile (2015)



Fotografía BHP Billiton (Escondida)

DIVERSIFICACIÓN PRODUCTIVA Y DESARROLLO TECNOLÓGICO EN TORNO LA MINERÍA

INTRODUCCIÓN

La minería abre una oportunidad única de diversificación productiva, desarrollo tecnológico e inserción plena en la sociedad. En particular, exportar productos y servicios intensivos en conocimiento es posible si se tiene como base y pivote a la minería, cuyos desafíos económicos, sociales y ambientales operan como fuerzas movilizadoras únicas tanto para construir las capacidades necesarias para hacer frente a estos desafíos, como para avanzar en el desarrollo de una canasta exportadora de servicios, tecnologías y equipos.

Tal vez, a primera vista algunos perciban esto como un contrasentido. Sin embargo, la verdad es que para disminuir la dependencia de la minería se requiere de más minería.

Por cierto, esto requiere de una mirada de largo plazo que vaya más allá de los ciclos de precio y en la que se usen estratégicamente los proyectos de inversión y los desafíos operacionales. Esto con el fin de anticiparse y construir las capacidades que permitirán ganarle a la siempre creciente complejidad del yacimiento minero y su entorno (ver figura 7), y de esta forma ir compensando la mayor complejidad con mayor productividad derivada de las nuevas capacidades. De lo contrario, se irá deteriorando gradualmente la competitividad de la industria, impactando el nivel de producción y su aporte al país.

La redacción de esta sección estuvo a cargo de Osvaldo Urzúa, BHP Billiton.

FIGURA/7 Círculo virtuoso, construyendo nuevas capacidades a partir de los desafíos

Transformando capital natural en capital social. Desarrollo de nuevas capacidades a partir de la mayor complejidad minera



Fuente: Osvaldo Urzúa (2016)

De esta forma, cada ciclo puede agregar algo nuevo, algo distinto a las capacidades existentes en el ciclo anterior, que no sólo le ayudan a la industria a mantener y mejorar su posición competitiva, también son una fuente fundamental para el desarrollo del país, ya que las nuevas capacidades no sólo impactan a la actividad minera, también a otras industrias y a la economía en general.

Los desafíos de hoy demandan actividades con alto contenido de conocimiento y con más capacidades tecnológicas y organizativas necesarias para cerrar las brechas de productividad y aumentar el desempeño socio-ambiental.

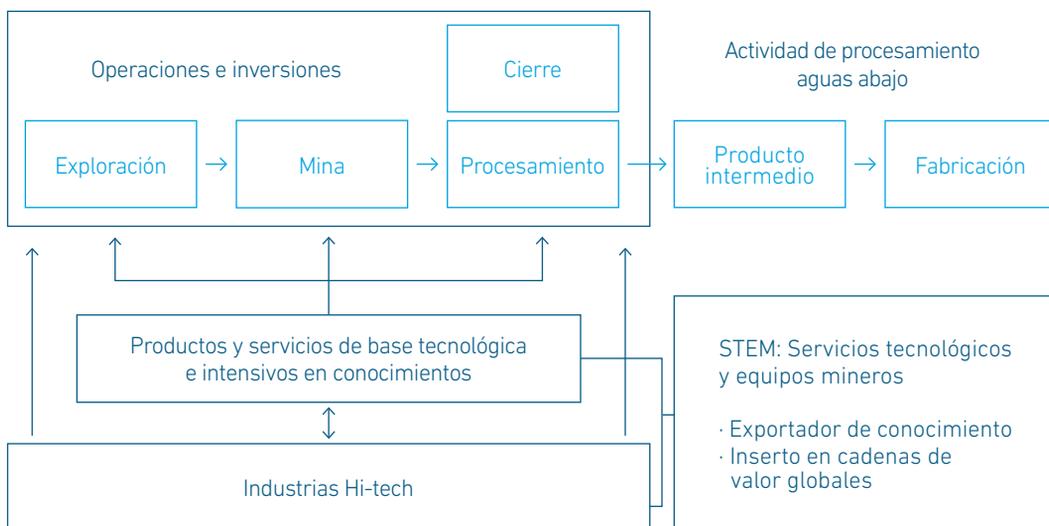
La escala de la industria junto con el importante nivel de *know-how* y capacidades productivas, tecnológicas y organizacionales creadas y perfeccionadas a lo largo de décadas de minería de gran tamaño – en un contexto de abundantes reservas mineras y una creciente demanda mundial por minerales, en particular cobre – establece condiciones para la construcción de las nuevas capacidades

necesarias para hacer frente a la creciente complejidad de los desafíos geológicos, productivos y socio-ambientales que enfrenta el sector.

Lo anterior, genera un potencial único de desarrollo productivo y tecnológico que puede impulsar la transformación de la base productiva nacional. En otras palabras, un importante potencial de mercado (demanda por cobre), acompañado de una abundante dotación de recursos mineros complejos de explotar (cuantiosas reservas de baja ley, bajo condiciones socio-ambientales más exigentes), junto con significativos niveles de conocimiento y experiencia, generan condiciones únicas para poder ir creando las soluciones necesarias para enfrentar los desafíos, y así capturar la oportunidad de mercado y desarrollar nuevas capacidades, productos y servicios asociados a un sector exportador de conocimiento que surge de la minería, pero que va más allá de ella, en cuanto al potencial de crear un sector exportador de conocimiento (ver figura 8). No existe ningún otro sector en Chile que presente un potencial equivalente.

FIGURA/8 Proveedores de servicios, tecnologías y equipos mineros (STEM)

Desarrollo de industrias tecnológicas
en torno a la minería. Encadenamiento
productivo y contenido local de alto valor.



Fuente: Osvaldo Urzúa (2016)

La experiencia nos enseña que es posible llevar adelante los esfuerzos necesarios para aprovechar la oportunidad que nos presenta la minería. Por ejemplo, en las décadas anteriores el país supo desarrollar las capacidades que le permitieron aprovechar el potencial que ofrecía la minería, lo que llevó a que Chile prácticamente cuadruplicara su producción de cobre entre los años 1985 y 2005, transformándose en el principal productor mundial. Lo anterior, no es un resultado baladí o un fenómeno meramente cuantitativo. Por el contrario, diseñar, construir y operar minas y procesos mineros de gran escala, de forma segura y competitiva es una hazaña mayor. Hoy el país cuenta con la experiencia, *know-how* y capacidad para desarrollar y operar proyectos mineros de gran escala, utilizando los mejores equipos y tecnologías existentes. Adicionalmente, la ingeniería y diseño chilenos gozan de prestigio internacional.

El requerimiento práctico de resolver los desafíos asociados a expandir la producción, cumpliendo con estándares ambientales y sociales mayores, operó como un factor articulador de un proceso social complejo de aprendizaje colectivo. Además del significativo aporte en términos de impuestos,

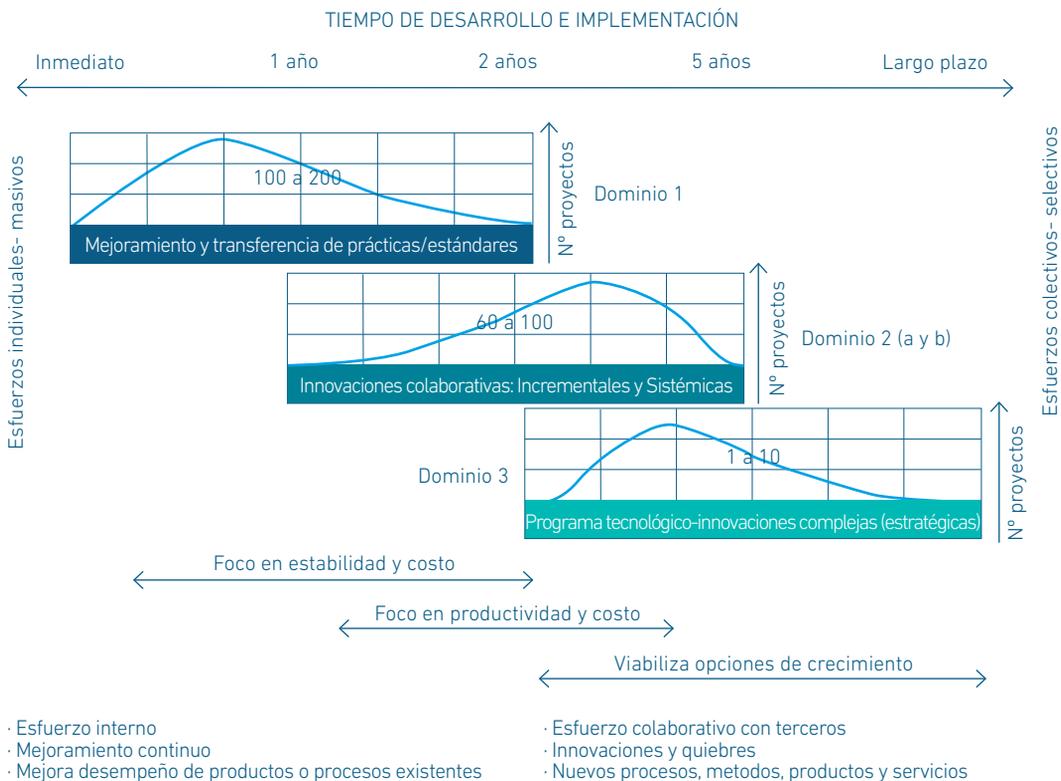
se amplió y sofisticó la capacidad productiva, creando nuevas capacidades que permitirán acometer nuevos y más complejos desafíos.

Si hoy queremos que la minería siga jugando el rol de plataforma de desarrollo que ha venido jugando por décadas, Chile debe, junto con ser el principal productor de cobre del mundo, transformarse en una potencia en términos de innovación y creación de valor compartido en torno al sector.

La minería demanda productos y servicios, modelos organizacionales y de gestión, y capacidades institucionales que puedan proveer desempeños superiores a partir de la adaptación, mejora e incluso creación de las tecnologías que necesita para cerrar la brecha de productividad que hoy amenaza a la industria. La sola transferencia de “**mejores prácticas**” es insuficiente y se requiere una visión integrada que comprenda desde esfuerzos de mejoramiento continuo hasta programas de desarrollo tecnológico complejos asociados a los grandes desafíos de la minería (ver Figura 9). Esta necesidad es la base para impulsar el desarrollo de una industria intensiva en conocimiento y con vocación exportadora.

FIGURA/9 Portafolio con una visión integral de esfuerzos

Un portafolio balanceado con una visión integrada desde las transferencias de mejores prácticas hasta innovaciones disruptivas.



Fuente: Osvaldo Urzúa (2016)

EL DESARROLLO EN TORNO A LA MINERÍA: UN PROCESO EVOLUTIVO

El desarrollo de una industria es un proceso de naturaleza evolutiva, con diversas etapas a lo largo del tiempo, las que presentan nuevos y mayores desafíos. Para hacer frente a estos desafíos, nuevas y mayores capacidades deben ser construidas sobre la base de las capacidades previamente existentes.

Sostener este proceso de desarrollo requiere que los actores del sector sean capaces de ir adaptándose y guiando esta dinámica evolutiva, lo que incluye tanto a los actores ya existentes como a los nuevos, junto con sus modos de interacción y sus estrategias de desarrollo, además de las condiciones o factores del entorno que se pueden influir a través de políticas públicas, dándole dirección e intencionalidad a la evolución. La capacidad de adaptarse a las nuevas exigencias determina la competitividad y sustentabilidad de la industria y el éxito en este proceso evolutivo.

En Chile, la minería ha seguido una trayectoria evolutiva como la antes descrita. Esta trayectoria no sólo ha impulsado el crecimiento de la industria, también ha sido un incentivo para el desarrollo del país.

Actualmente, la minería está transitando hacia una nueva etapa, siendo uno de sus principales desafíos - no el único, por cierto - incorporar más conocimiento, innovación y desarrollo

tecnológico como fuerzas motrices del aumento de la productividad y como fuente de generación de soluciones a los desafíos productivos, ambientales y sociales de la industria. En este contexto, surge la oportunidad única de desarrollo de un sector de proveedores de servicios, tecnologías y equipos mineros (STEM) capaz de aportar con parte de las soluciones de alto valor para la minería, y que a su vez son la base para el desarrollo de un sector de servicios y productos intensivos en conocimiento y exportables.

La Figura 10 muestra de manera simplificada el proceso evolutivo del desarrollo minero chileno, partiendo en la década de 1970, con una industria que explota ventajas comparativas provenientes de una abundante base de recursos minerales de alta calidad y que gradualmente va transformándose y creando nuevas capacidades para convertirse en una industria que sustenta su desarrollo no solo en su capital geológico, sino también en las ventajas competitivas entre las que se incluye una base de proveedores STEM, empresas internacionalmente competitivas y con la capacidad de diversificar la oferta exportadora.

La Figura 10 también muestra un posible escenario asociado a una evolución exitosa de la etapa actual, la cual está en sus inicios y aún lejos de ser considerado un proceso consolidado.

FIGURA/10 El proceso evolutivo de desarrollo de la minería - historia y proyección

El desarrollo minero como una meta dinámica. Etapas sucesivas en un proceso evolutivo y de largo aliento



Fuente: Osvaldo Urzúa, 2016

A continuación se presentan de manera resumida las etapas que se señalan en la Figura 10:

Etapa I (Su inicio fue en la década de 1970)

En la primera etapa la principal fuente de competitividad de la industria fue su abundante dotación de minerales de alta calidad. Esta ventaja competitiva natural permitió ir desarrollando una actividad productiva competitiva, con escala y que se transformó en la principal fuente de exportaciones del país.

En esta etapa, el acceso a soluciones y tecnologías más avanzadas fue básicamente a través de importaciones. Sin embargo, la base productiva en desarrollo junto con una mayor tercerización generó el punto de partida o primer impulso para el surgimiento de un sector de proveedores locales, lo que permitió generar nuevas relaciones productivas entre las compañías mineras y la economía local representada por este emergente sector de proveedores, aún de poca relevancia.

En esta etapa se comenzó a romper la estructura de enclave con la que operó la minería durante gran parte del Siglo XX.

Etapa II (Su inicio fue en los 1990s)

En la segunda etapa la principal fuente de competitividad se generará a partir de ganancias en eficiencia generada por una fuerte inversión para ampliar la base productiva, lo cual fue facilitado por un entorno habilitante de atracción de inversiones, cuyo impacto se vio reflejado en un aumento muy significativo de la inversión extranjera, lo que llevó a triplicar la producción de cobre en tan solo una década.

Aunque gran parte de la tecnología y diseños más avanzados todavía provienen del extranjero, localmente se proveen servicios cada vez más sofisticados. Los proveedores locales no sólo asimilan tecnología extranjera, también comienzan a desarrollar la capacidad para mejorar la tecnología y hacer desarrollos propios.

En esta etapa se incubaron las capacidades para el surgimiento del sector de STEM (servicios, tecnologías y equipos mineros), que en la próxima etapa debería desarrollarse con más fuerza para aprovechar su pleno potencial y dar origen a un nuevo sector exportador de tecnologías y conocimiento.

Probablemente hoy aún nos encontramos en esta etapa y existen algunos indicios que estamos enfrentando el proceso de transición hacia la Etapa III.

Sería prematuro declarar que el tránsito hacia la nueva etapa ya es un proceso consolidado, estamos enfrentando los desafíos y tensiones propios de todo cambio. ¿Seremos capaces de enfrentar con éxito las barreras de esta transición?

Etapa III (hoy se muestran las primeras señales)

En la tercera etapa, la capacidad de producir soluciones innovadoras se convierte en una fuente significativa de ventajas competitivas. El capital geológico, aún muy abundante pero de menor calidad, acompañado de capacidades tecnológicas, organizativas e institucionales superiores, permiten sostener un proceso permanente de aumento de productividad y de desempeño ambiental y social, lo que constituye la base de la competitividad de la industria.

En esta etapa el entorno empresarial que se ha ido perfeccionando puede enfrentar las demandas locales que son más sofisticadas. Existen industrias de apoyo con capacidades para enfrentar los retos de competitividad y sustentabilidad. Alto niveles de capacidades no se desarrollan en todos los ámbitos, más bien en un grupo particular de STEM donde el conocimiento, experiencia y sistemas habilitantes de apoyo (factores del entorno) permiten hacer frente a demandas sofisticadas de la minería.

En estos grupos o sectores de STEM existen instituciones e incentivos que apoyan los procesos de innovación para que las empresas proveedoras desarrollen ofertas competitivas basadas en capacidades únicas que les permiten desarrollar estrategias diferenciadoras y que a menudo son de alcance mundial. En esta etapa se consolida un sector de STEM basado en la innovación, que se caracteriza por sus productos distintivos y que es más resistente a los choques externos.

UNA HOJA DE RUTA (ROADMAP) PARA LA ETAPA III

Como se mencionó anteriormente, el contexto actual muestra un claroscuro respecto de la

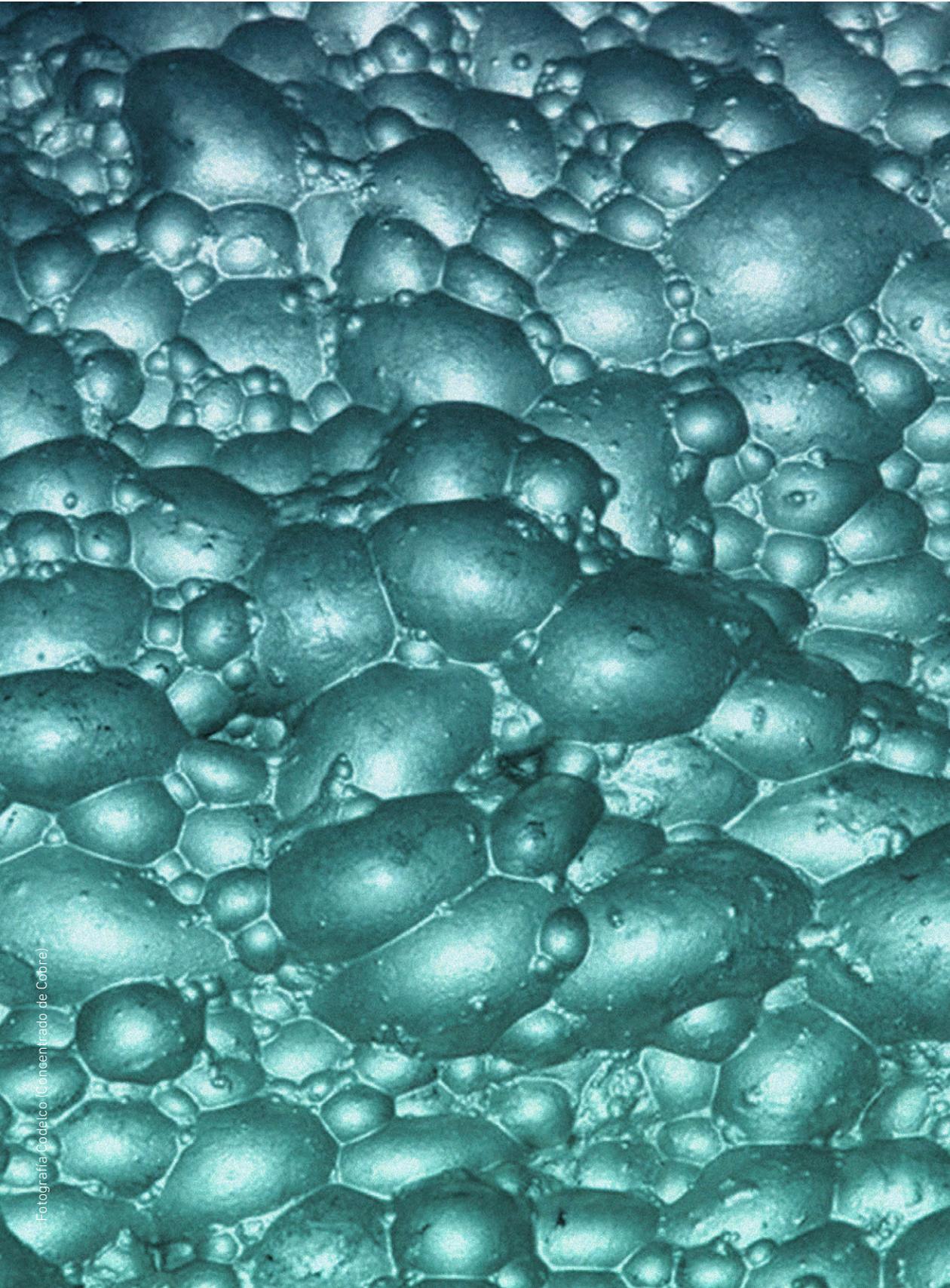
etapa en que se encuentra la industria. Se necesita una estrategia que ayude a generar las condiciones para hacer dicho tránsito.

La Hoja de Ruta Tecnológica busca establecer una agenda de trabajo para darle profundidad y sistematicidad a un proceso colectivo de aprendizaje o construcción de capacidades en todos los actores de la industria, todos deben aprender y se debe cuidar lo alcanzado.

La Hoja de Ruta debe ser vista como un proceso de largo plazo que está en permanente revisión y que se monitorea y actualiza periódicamente. Requiere de múltiples y significativos esfuerzos que sólo son posibles de abordar con un alto grado de coordinación y colaboración público-privada.

En la Etapa III reside la gran oportunidad de desarrollo de productos de alto valor en torno al cobre, que es muy superior a las oportunidades generadas por un mayor grado de procesamiento o manufactura de cobre.

El país enfrenta una ventana de oportunidad temporal que demanda actuar con sentido de urgencia.





Fotografía Codeico (Planta Solar Gabriela Mistral)

04

DESAFÍOS DE
LA MINERÍA
CHILENA

Si proyectamos el consumo de cobre al 2035, se requerirá una oferta anual de 65 millones de toneladas de cobre fino, lo que implica casi triplicar la capacidad de producción de cobre de mina y de reciclaje existente hoy

ESCENARIO ACTUAL Y DESAFÍOS DE CORTO PLAZO

Aún cuando el potencial de Chile en producción minera se ha mantenido intacto, las condiciones que posibilitan el desarrollo de esta industria han cambiado. Los costos han aumentado, la productividad ha disminuido y la sostenibilidad ambiental y social se ha vuelto un imperativo para su desarrollo. Todos ellos constituyen desafíos que la industria debe enfrentar en el corto plazo si se desea asegurar la producción actual y materializar los proyectos futuros.

COSTOS DE LA INDUSTRIA MINERA

Los costos de la industria minera representan un aspecto clave en periodos de precios bajos, cuando la principal preocupación de las compañías es la productividad. Durante el periodo 2005-2014 los costos de operación han aumentado un 10% en promedio por año. Esta situación, junto con la disminución del precio del cobre, se ha traducido en menores márgenes operacionales (Cochilco, 2015b).

Aún cuando durante los últimos años gran parte de las compañías mineras han iniciado planes de reducción de costos para revertir la situación descrita⁵, la problemática sigue estando presente y constituye un desafío que las compañías mineras deben enfrentar en el corto plazo.

La minería chilena enfrenta un problema estructural. Las minas son cada vez más antiguas y profundas, lo que deriva en menores leyes de explotación, minerales cada vez más duros y mayores distancias de acarreo del material.

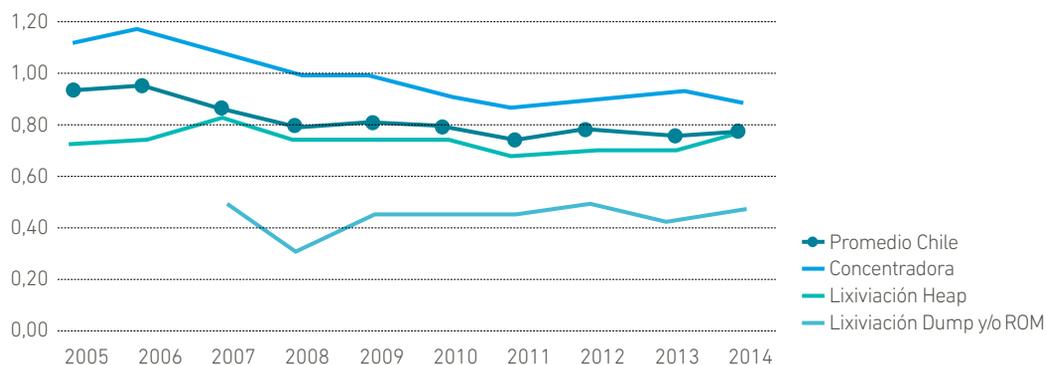
⁵ Estudios recientes muestran una disminución de los costos directos (C1) durante los últimos tres años, lo cual refleja un resultado de los planes de reducción de costos que han venido aplicando las compañías mineras. Si bien esta disminución de costos tiene una componente coyuntural, dada la disminución en el precio del petróleo y la apreciación del dólar, también posee un componente estructural, por ejemplo, gracias a la mayor disponibilidad de bienes y servicios.

La redacción de esta sección estuvo a cargo del equipo de Fundación Chile, compuesto por: Francisco Klima, Tomás González, Nicole Valdebenito, María Carolina Soto y Hernán Araneda.

En efecto, entre 2005 y 2014 la ley promedio de mineral cayó 23,8%. Como se observa en el siguiente gráfico, la etapa concentradora ha presentado una caída significativa en la ley promedio de mineral durante la última década, manteniéndose de todos modos como el proceso con mejores leyes. Por su parte, en lixiviación dump y/o ROM se observan las menores leyes, mientras que en lixiviación heap la ley se ha mantenido relativamente estable (0,1%).

GRÁFICO/11

Ley promedio de mineral de cobre en las operaciones mineras en Chile por tipo de proceso.

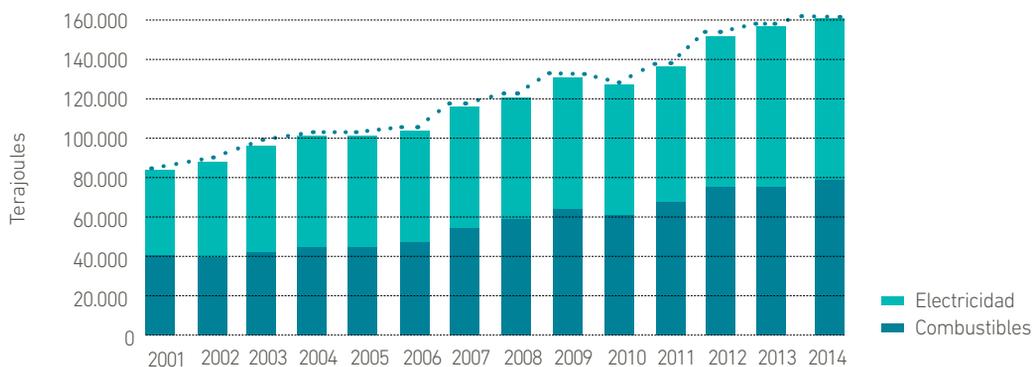


Fuente: elaboración propia en base a datos de Cochilco

¿Cómo impacta esto en los costos de la industria? La compañías mineras deben extraer y procesar mayores cantidad de material, los recursos que se extraen son cada vez más duros y la minas más profundas. Considerando que la minería es una industria intensiva en el uso de energía (más de un 20% de sus costos están explicados por este ítem), la situación descrita se traduce en un incremento de los costos de la industria a través del aumento del consumo unitario de electricidad y combustible.

El consumo de electricidad en la minería de cobre alcanzó los 83.261 TJ (terajoules) el año 2014, lo que equivale a un aumento de 76,1% respecto de 2001 y 2,7% respecto de 2013. Por su parte, el consumo de combustibles se situó en los 78.454 TJ en 2014, lo que constituye un incremento de 101,4% en relación a 2001 y 6,4% respecto de 2013.

GRÁFICO/12
Consumo nacional de energía en la minería del cobre 2001-2014 (Terajoules)



Fuente: elaboración propia en base a datos de Cochilco

El 76% del consumo de combustibles en la industria minera está explicado por el proceso mina rajo (59.974 TJ en 2014). En el caso de la electricidad, la etapa concentradora alcanza el mayor consumo con 43.685 TJ, seguido por el procesamiento de óxidos (LxSxEw) con 20.751 TJ. Ambos representan el 52% y 25% del consumo eléctrico minero respectivamente.

Al estudiar el consumo de energía unitario por tonelada de material procesado³, se observa un aumento de 54,4% en el periodo 2001-2014 (18,2 GJ/TMF en 2001 a 28,1 GJ/TMF en 2014). Este indicador también reportó un incremento de 4,9% entre 2013 y 2014. Si se analiza el combustible y la electricidad por separado, se observa que el combustible requerido para producir una tonelada de cobre fino aumentó en 66% entre 2001 y 2014, mientras que la electricidad lo hizo en 45%.

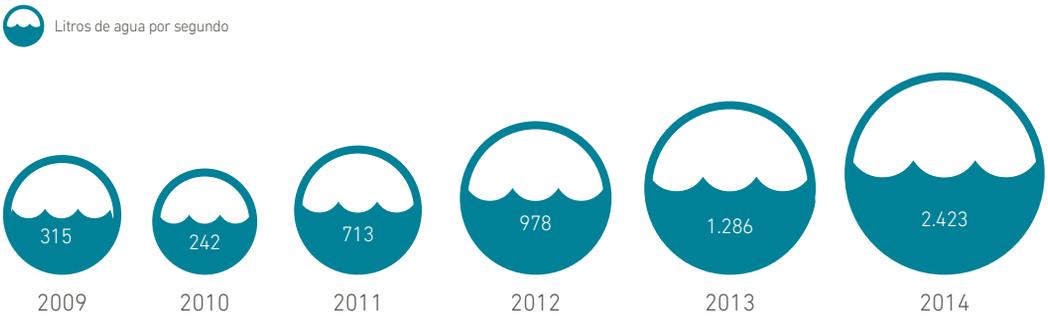
El creciente consumo de agua en minería incide en los costos asociados a energía: la necesidad de desalinizar agua de mar e impulsarla varios metros sobre el nivel del mar hasta las faenas presiona al alza la demanda por energía, en medio de un escenario en que los costos de ésta van también en aumento.

Éste es un factor relevante en los costos de la minería. Es un hecho que las principales operaciones mineras en Chile se encuentran en la zona norte del país, donde el panorama es en su mayoría desértico y, por tanto, escaso de agua; y donde, además, se ha producido un rápido crecimiento de la población urbana, lo que incrementa la demanda por el recurso.

Entre 2009 y 2014 el uso de agua de mar ha aumentado en 669%. Para este último año, el 63% corresponde a agua de mar desalada y el 37% a agua sin desalar (Cochilco, 2014).

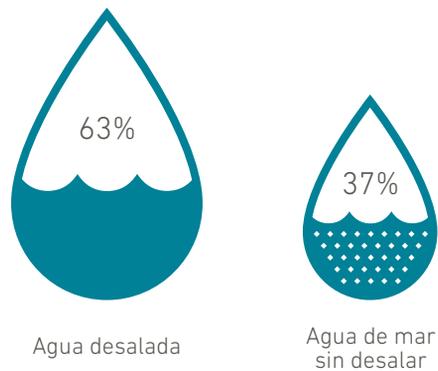
³ El consumo de energía total anual dividido por la producción anual de cobre es una aproximación al coeficiente unitario de consumo de energía. Este indicador permite analizar la tendencia del consumo de energía en la producción minera.

FIGURA/11
 Uso de agua de mar en minería
 del cobre 2009-2014



Fuente: Cochilco (2014)

FIGURA/12
 Uso de agua de mar en
 minería del cobre 2014 (%)



Fuente: Cochilco (2014)

PRODUCTIVIDAD DE LA INDUSTRIA MINERA

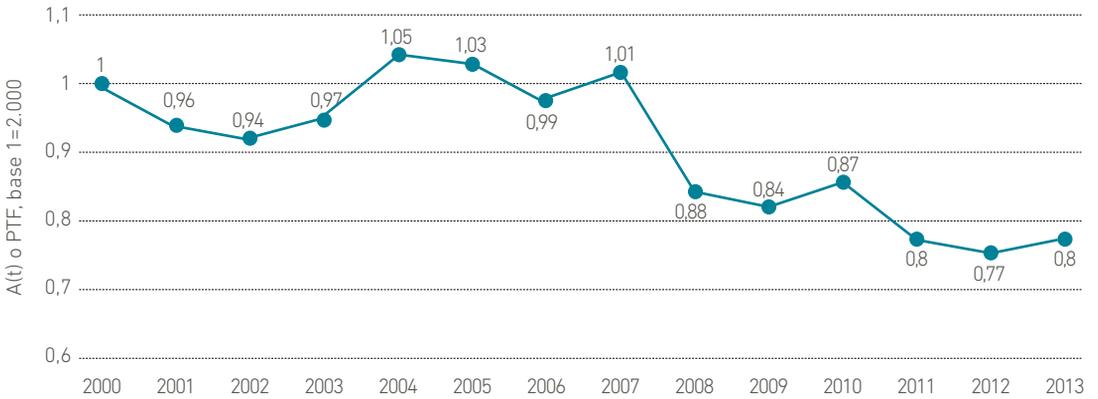
A mediados de la década del 2000, con un precio del cobre que batía records año tras año y un fisco que aumentaba su recaudación gracias a esto, la productividad no era un tema central. Hoy, sin embargo, en un escenario de aumento de costos de producción, la productividad se ha vuelto un tema central para la sustentabilidad de la industria en el corto, mediano y largo plazo.

A nivel país, la productividad del sector minero incide de un modo directo e indirecto en el desempeño económico del Chile. Como ya se ha señalado en capítulos anteriores, esta industria representa más del 10% del PIB, alrededor del 50% de las exportaciones y cerca del 20% de los ingresos fiscales, con lo cual una merma en los niveles de productividad incide directamente en la economía nacional. Por otro lado, la disminución de la productividad afecta al empleo directo e indirecto asociado a la minería y tiene un impacto relevante en un número significativo de empresas que proveen bienes y servicios.

El concepto de productividad corresponde a la relación entre la cantidad de insumos y recursos utilizados para la obtención de un producto determinado (Cochilco, 2014a). El siguiente gráfico expresa una disminución del 20% de la productividad del sector durante el periodo 2000-2013.

GRÁFICO/ 13

Evolución de la productividad, medida como PTF, en la minera del cobre

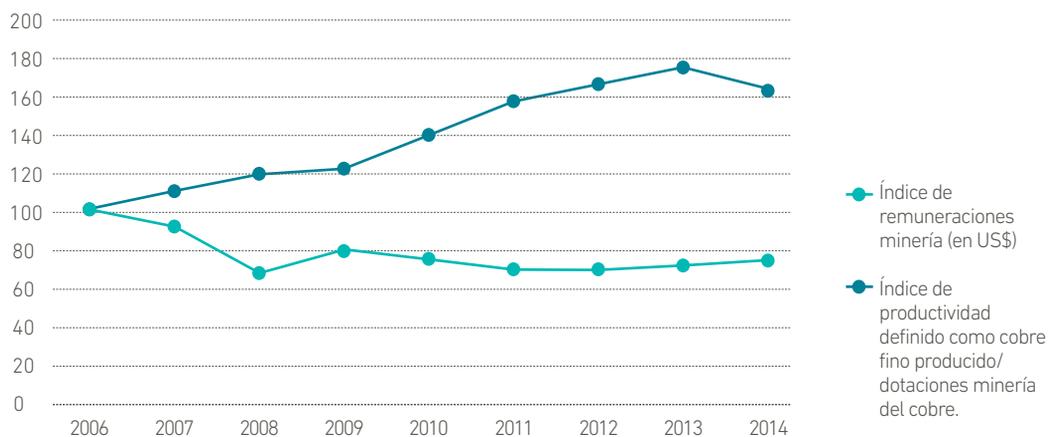


Fuente: Cochilco (2014a)

Ahora bien, es necesario considerar que en la caída de la productividad no solamente se explica por la disminución de las leyes de mineral y la calidad del recurso geológico, sino que también es atribuible a aspectos relacionados con gestión empresarial, uso tecnológico y diferenciación de los recursos humanos (Cochilco, 2014a).

Una medida más precisa al respecto es la productividad laboral. El siguiente gráfico expresa una disminución de este indicador entre 2006 y 2014 y, en paralelo, un aumento sostenido de las remuneraciones hasta el año 2013.

GRÁFICO/ 14
Productividad laboral en la minería del cobre y remuneraciones 2006-2014



Fuente: Consejo Minero (2015)

Aún cuando la tendencia a la baja de la productividad laboral ha comenzado a revertirse a partir del año 2014, éste sigue siendo un desafío pendiente que la industria debe abordar de cara al mediano y largo plazo.

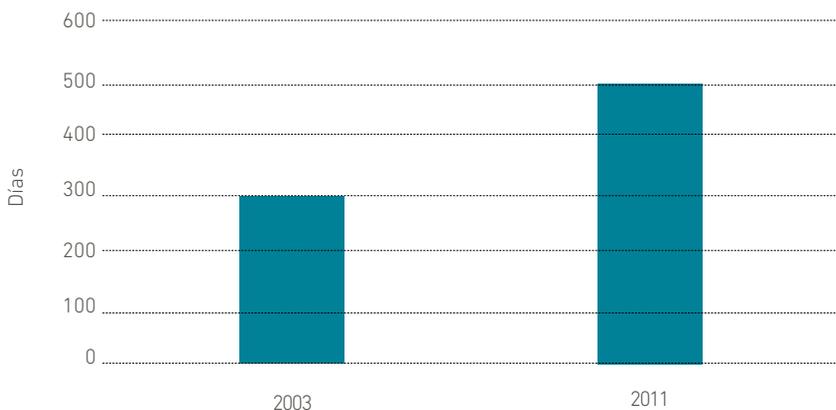
PROBLEMAS REGULATORIOS, SOSTENIBILIDAD Y LICENCIA SOCIAL

Los tópicos detallados a continuación representan problemáticas muy relevantes, pero al mismo tiempo complejas y de alta sensibilidad social. En esta subsección se proporciona una descripción

factual de estas temáticas. Un segundo volumen de esta Hoja de Ruta se abocará a su estudio con un mayor nivel de profundidad

Un desafío importante para materializar la visión común definida en el marco del Programa Nacional de Minería Alta Ley refiere a la demora en la tramitación de permisos asociados a los proyectos mineros. De acuerdo a Lagos, Peters y Jara (2015), la duración promedio de aprobación de los proyectos aumentó de 300 a cerca de 500 días entre 2003 y 2011.

GRÁFICO/15
Tiempo promedio (en días) para la obtención de una RCA



Fuente: Lagos (2014)

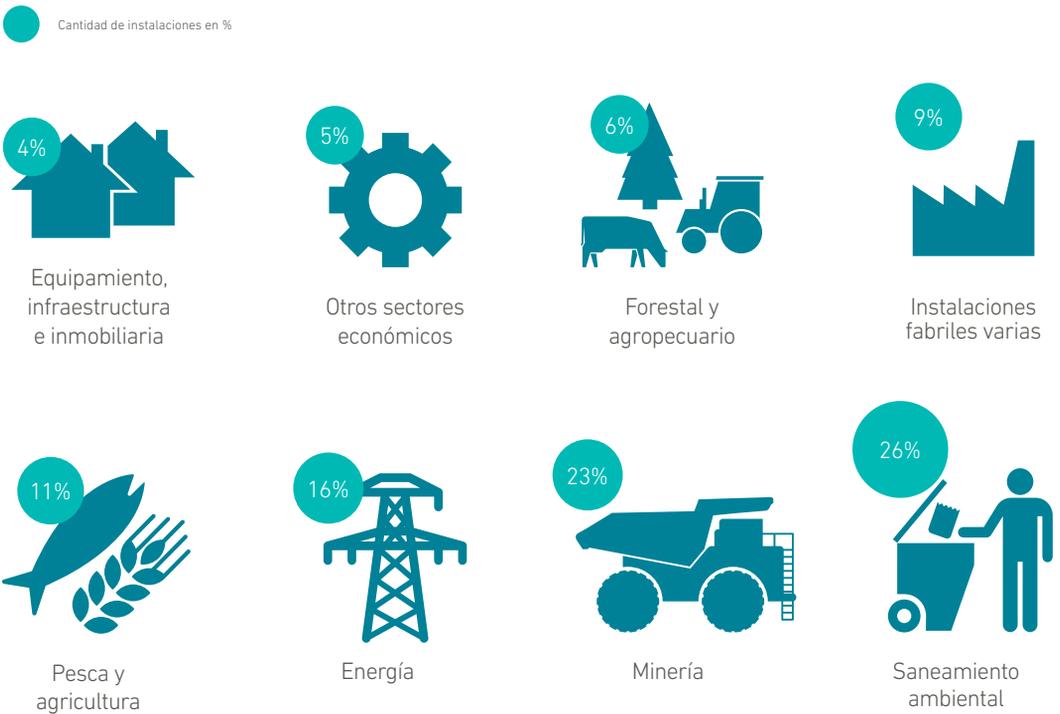
Sin embargo, Lagos, Peters y Jara (2015) plantean que el desafío no radica únicamente en reducir el tiempo de tramitación de las Resoluciones de Calificación Ambiental (RCA), sino también en disminuir la incertidumbre asociada a las RCA.

Una RCA es un documento administrativo con el que el Servicio de Evaluación Ambiental (SEA), una vez culminado el proceso de evaluación de la Declaración o Estudio de Impacto Ambiental (DIA o EIA según corresponda), establece si el proyecto ha sido aprobado, rechazado o aprobado con condiciones; es decir, establece el marco bajo el cual un proyecto puede comenzar a desarrollarse y permite acreditar el cumplimiento de la normativa y obtener las autorizaciones ambientales respectivas.

En este punto cabe mencionar que la Superintendencia de Medio Ambiente (SMA), entidad responsable de fiscalizar el cumplimiento de las RCA, fue creada recién en 2010 tras sugerencias de la OCDE, por su parte, los Tribunales Ambientales (bajo supervigilancia de la Corte Suprema), que tienen la atribución de resolver las reclamaciones que se interpongan en contra de resoluciones de la SMA, se crearon en 2012. Se trata de instituciones jóvenes que, por lo tanto, aún están avanzando en su curva de aprendizaje.

El 28 de diciembre de 2012, la SMA inició sus funciones de fiscalización y sanción ambiental. Durante 2012 y 2013 no se cursaron multas en el sector minero, pero sí se iniciaron procesos de fiscalización. De hecho, durante 2013 la minería concentró 23% de las fiscalizaciones y, el año siguiente, fue el sector con mayor cantidad de fiscalizaciones por RCA.

FIGURA/13
Fiscalizaciones realizadas
por la SMA en 2013



Fuente: Cuenta Pública SMA (2013)

FIGURA/14
Fiscalizaciones realizadas
por la SMA en 2014



Fuente: Cuenta Pública SMA (2014)

A 31 de octubre de 2015 la SMA había cursado 27 multas, de las cuales cinco fueron a empresas de la industria minera por un total de US\$20 millones, lo que corresponde a 63% del monto total de las sanciones aplicadas por la SMA en este periodo.

Si bien el Presidente de la Corte Suprema declaró, en noviembre de 2015, que “no existe ningún proyecto de inversión paralizado por orden de los tribunales” (Solórzano, 2015), Lagos, et al consideran que, de acuerdo a los fallos ambientales en los que la Corte Suprema ha tenido que intervenir en los últimos cinco años, se hace imposible identificar una tendencia en el criterio, lo cual impide asignar un riesgo regulatorio ambiental a los proyectos. Esto dificulta su evaluación financiera, el acceso a capital y su desarrollo en general, lo que en definitiva impacta la inversión.

Según señala Lagos (2014), sin que mediara cambio legislativo o normativo alguno, en 2004 el gobierno y la justicia cambiaron de facto las exigencias a los proyectos, al mismo tiempo que una ciudadanía más empoderada hizo sentir su peso con mayores estándares y consideraciones.

Estas visiones contrapuestas respecto del funcionamiento de la regulación y fiscalización ambiental en Chile dan cuenta de la necesidad de articular un mayor diálogo entre los distintos involucrados y construir una visión compartida respecto de cómo aprovechar la minería para facilitar el desarrollo de Chile con equidad social y cuidado por el medio ambiente, generando, a la vez, oportunidades empresariales atractivas para la inversión.

Es claro que esto no ha sido un fenómeno exclusivo de Chile. En las últimas décadas, todas las fases de la actividad minera y de la producción

de metales en el mundo entero se han visto sometidas a una ola constante y creciente de regulaciones ambientales que las han impactado profundamente, modificando el contexto donde éstas se venían desarrollando (Cochilco, 2006).

Otro tema relevante a destacar son las Emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI). En el actual entorno post-COP21⁴, en medio de la llamada “descarbonización” de la economía, la preocupación por proteger el medio ambiente y la salud se traducirán en obligaciones que requerirán cambios relevantes en el proceso productivo minero.

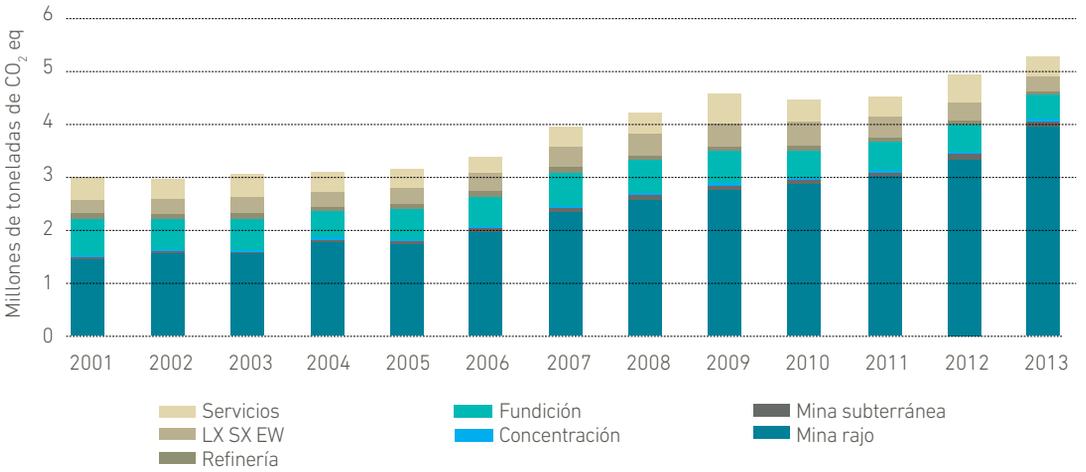
De acuerdo a Cochilco (2014b), en el sector de la minería del cobre, desde la I Región de Tarapacá hasta la VI Región de O’Higgins, las emisiones de GEI directos del año 2013 alcanzaron los 5,13 millones de toneladas CO₂eq; lo que representa un aumento de 0,33 millones de toneladas CO₂eq respecto del año anterior, cuando se llegó a 4,8 millones de toneladas CO₂eq.

A nivel de procesos, Cochilco (2014b) destaca que en 2013 un 76% de las emisiones de GEI de la industria corresponden a la extracción de minerales en el área mina rajo, el 8,8% provienen del proceso de fundición, el 6,3% de los servicios asociados y el 5,4% del proceso de lixiviación.

Al ser procesos más intensivos en el consumo de electricidad, la refinería, concentradora y mina subterránea solo concentran un 1% de las emisiones de GEI cada una.

⁴ XXI Conferencia sobre Cambio Climático organizada por la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). La Conferencia tuvo lugar en París entre el 20 de noviembre y 11 de diciembre de 2015.

GRÁFICO/16
Emisiones de GEI directos por proceso

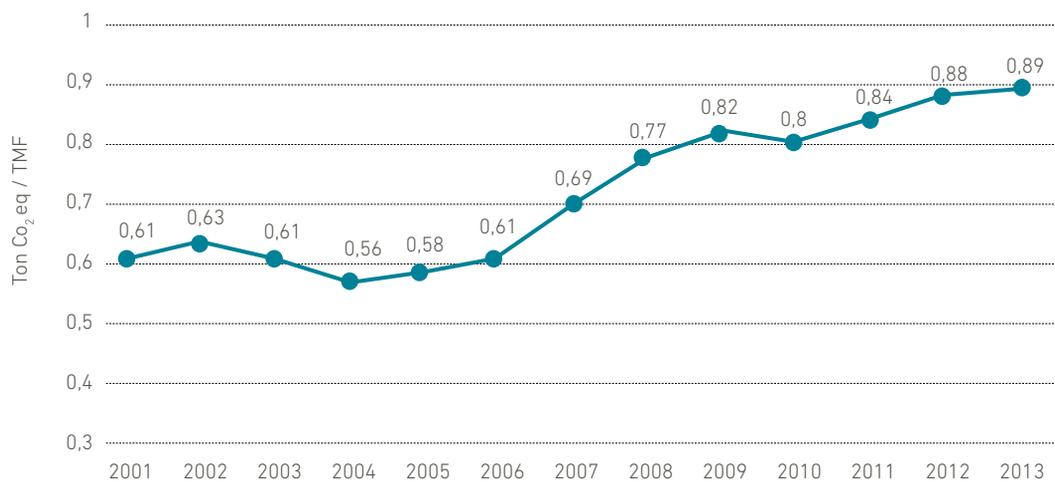


Fuente: Cochilco (2014)

En relación a los coeficientes unitarios de emisiones directas de GEI⁵, que permiten evaluar la intensidad de emisiones independientemente del mineral o producción, se observa que la tendencia ha ido en aumento principalmente por el factor de emisión del mix de combustibles utilizados, alcanzando los 0,89 toneladas de CO₂eq/tonelada en 2013.

⁵ Cantidad de emisiones directas de GEI por cada tonelada de cobre fino.

GRÁFICO/17
Coeficientes unitarios de emisiones de GEI por tonelada de cobre fino.



Fuente: Cochilco (2014)

Según lo ha consignado la Sociedad de Fomento Fabril – Sofofa (2015), el escenario antes descrito ha derivado en que la inversión detenida en minería haya aumentado de US\$12 millones en 2009 a US\$45.611 millones en 2014 y US\$59.867 en los primeros 9 meses de 2015.

De acuerdo a lo establecido en el reporte de la Sofofa (2015), existen problemas directos e indirectos que están frenando las inversiones:

- Entre los primeros se encuentran todas aquellas inversiones detenidas por decisión

interna (con inversiones que alcanzan 30,8% del total de los sectores estudiados), que surgen como consecuencia de la falta de financiamiento, la caída de los precios internacionales o el rediseño de los proyectos.

- Las inversiones que registran *dificultades externas*, es decir, ajenas a la voluntad de las empresas, tienen relación con la judicialización (26,5% de la inversión detenida del total de los sectores estudiados), la regulación ambiental (18,1%), el alto costo y escasez energética (15,1%) y la incertidumbre jurídica (9,5%).

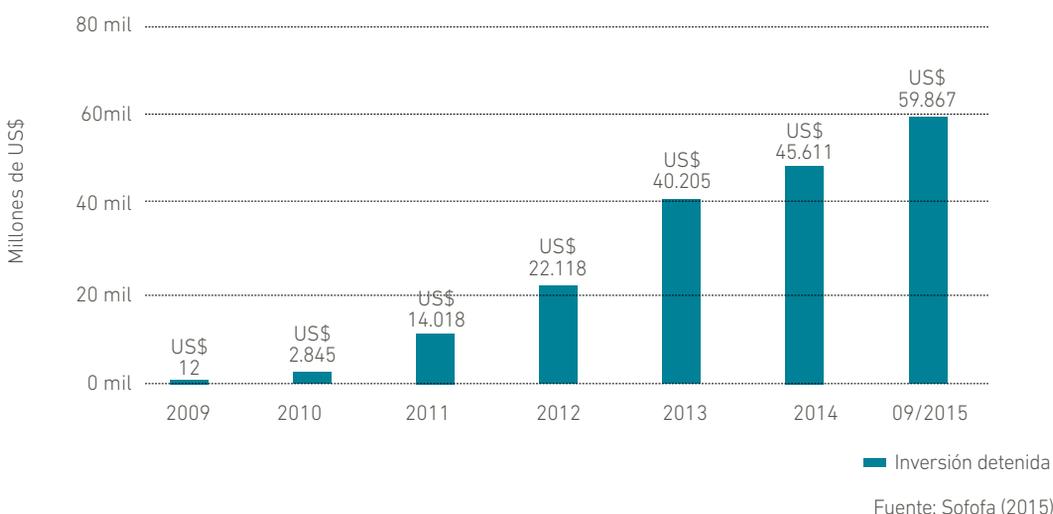
GRÁFICO/18 Proyectos de inversión en minería n°1



Fuente: Sofofa (2015)

GRÁFICO/19

Proyectos de inversión en minería n°2



El escenario descrito plantea un gran desafío para el país. La industria minera debe prevenir, compensar y/o mitigar los impactos ambientales, sociales y culturales a lo largo de todo el ciclo de los proyectos y, a su vez, garantizar que las comunidades afectadas puedan participar de los diversos beneficios que genera (CNID, 2014). Por su parte, el Estado debe fortalecer las capacidades de las instituciones de regulación y fiscalización que acompañan el progreso de la industria. Esta labor debe ser entendida como parte del proceso de desarrollo país.

EVOLUCIÓN DE LA ACTIVIDAD DE EXPLORACIÓN, LOS RECURSOS Y LAS RESERVAS DE COBRE EN CHILE

La presente contribución está basada en los trabajos realizados en la Comisión Chilena del Cobre entre los años 2014 y 2015.

Muchas veces se escuchan argumentos en contra de la actividad minera aduciendo que el cobre ya es algo del pasado y que el país debe enfocarse en tecnologías del futuro. Sin quitar el foco en el desarrollo de los temas de futuro, es importante dimensionar el rol que tiene la actividad minera, y en particular el cobre, para el desarrollo de las sociedades y de Chile, como mayor productor a nivel mundial.

A modo ilustrativo pensemos en la demanda de cobre. A través del consumo de bienes finales un país desarrollado requiere 7 kg de cobre *per cápita*, en las economías en desarrollo este valor alcanza los 2 kg per cápita, y en países subdesarrollados sólo 0,2 kg al año por habitante. Esto se traduce en un consumo global de 22 millones de toneladas de cobre por año, equivalente a 3 kg de cobre por habitante.

Si proyectamos el consumo de cobre en el mundo para el año 2035, de manera que toda la población del planeta tenga el consumo de un país desarrollado, se requeriría tener una oferta anual de 65 millones de toneladas de cobre fino, lo

La redacción de esta sección estuvo a cargo de la Dirección de Estudio y Políticas Públicas de la Comisión Chilena del Cobre, coordinado por Jorge Cantallopis.

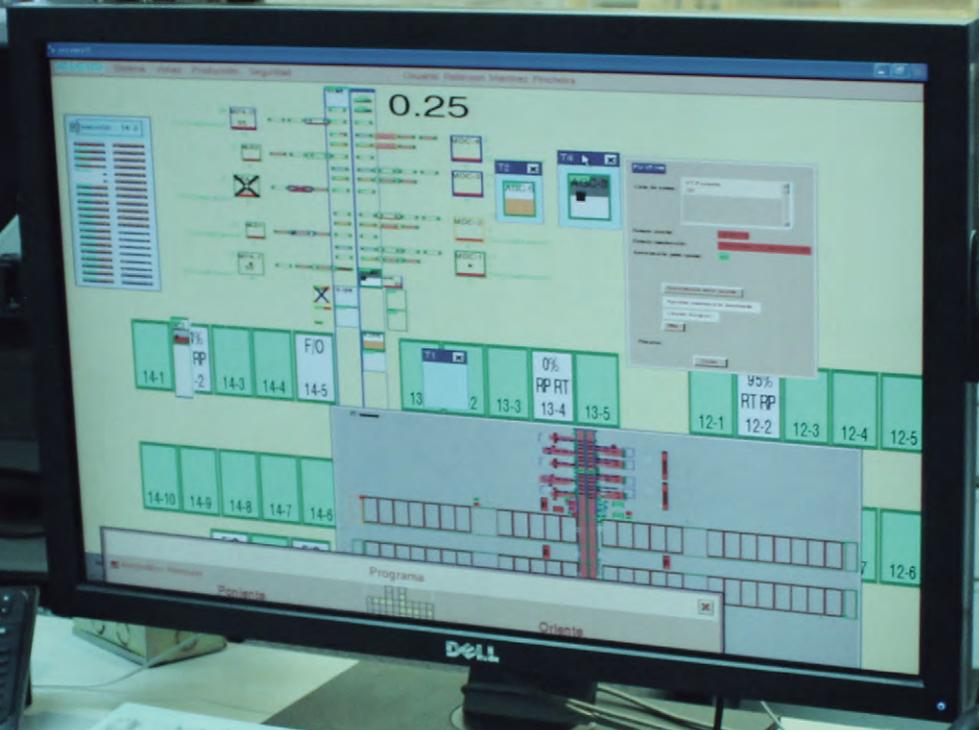
que implica casi triplicar la capacidad de producción de cobre de mina y de reciclaje existente en la actualidad.

Un cálculo más conservador se obtiene estimando un crecimiento de la demanda de cobre en torno a 2% anual por los próximos 20 años, en cuyo caso se requiere de un incremento de la oferta de más de 11 millones de toneladas anuales respecto de la producción actual.

En los últimos 20 años la oferta de cobre proveniente tanto desde yacimientos, como el que se obtiene a partir del reciclaje y chatarra, se ha incrementado como nunca en la historia y sólo ha crecido en 9 millones de toneladas. En base a esto, es posible anticipar un futuro al menos similar al de los últimos 20 años, pese a las actuales condiciones de mercado y a las voces de mal augurio que vienen rodeando a la industria del cobre hace varias décadas, y que se hacen sentir más fuertes en momentos como el actual.

El desarrollo sostenible de la minería del cobre implica sustentabilidad ambiental, social y económica, involucrando ésta última la capacidad de la industria para mantenerse en el tiempo, para lo cual la capacidad de la actividad y en general del país de explotar de manera eficiente los recursos naturales implica una buena gestión de estos. Es en este aspecto donde la actividad exploratoria juega un rol determinante





Fotografía Codeico (Refinería Chuquibambilla)

en la sustentabilidad de la industria minera, de manera de asegurar la continuidad operacional de los actuales yacimientos y la identificación de los depósitos que entrarán a abastecer la demanda futura de cobre.

Como se mencionó, en los próximos 20 años se requerirá bastante más cobre del que se produce actualmente, y la nueva oferta de cobre provendrá de tres distintas fuentes: nuevos yacimientos, expansiones de los existentes y reciclaje. Las ampliaciones probablemente serán uno de los focos de los productores de cobre, considerando la actual tendencia mundial a exigir un desempeño ambiental mucho más alto del que han tenido en la historia, especialmente en las nuevas operaciones, y el menor riesgo que implican las expansiones por sobre la búsqueda de nuevos yacimientos. No obstante, esta fuente no es suficiente para satisfacer la nueva demanda.

Por otra parte, el reciclaje tiene muchos defensores, especialmente desde la mirada de los movimientos ambientalistas y aquellos que rechazan la actividad minera, pero ya son variados los estudios que califican como complejo el reciclaje de los nuevos dispositivos. Por ejemplo, una *tablet* tiene mucho menos cobre que un computador tradicional y la posibilidad de reciclarlo es mucho más baja o al menos más cara y con

un impacto ambiental más alto, dada la complejidad y reducido tamaño de los nuevos dispositivos. Con las actuales tecnologías no se aprecia que sea muy factible abastecer la nueva demanda mayoritariamente desde el reciclaje.

La tercera y tal vez más importante fuente de cobre para el mundo son los nuevos yacimientos. Chile posee actualmente el 29% de las reservas de cobre conocidas, lo que le asigna una ventaja importante desde el punto de vista geológico. No obstante, se deben generar las condiciones para poder aprovechar estas ventajas.

La capacidad de generar estas condiciones está dada por la gestión de la dotación de recursos naturales, lo que implica políticas que propicien el uso de la propiedad minera de manera óptima y condiciones que fomenten la actividad exploratoria, entendiéndose éstas como información geológica básica y fomento a las etapas más riesgosas de la exploración.

Esta sección del libro se centra en estas dos condiciones que se deben cumplir para asegurar el protagonismo de Chile en la industria de la oferta cobre y en la sustentabilidad geológica de la actividad minera.

Primero se describe la evolución de los recursos y reservas de Chile y el

desarrollo de los nuevos yacimientos que se han generado en las últimas décadas. Luego se aborda la situación actual de la administración y uso de la propiedad minera en Chile y los principales desafíos que ésta implica, tanto desde el punto de vista de la administración del Estado, como de la generación de condiciones para el uso efectivo de la propiedad. Posteriormente se describe la situación de la industria de la exploración y, finalmente, se analiza el rol que debe cumplir el Estado y las políticas públicas en diferentes ámbitos.

Entre los aspectos abordados, se destaca la generación de información geológica que permita una apropiada asignación de los recursos públicos y privados en una actividad caracterizada por el riesgo, la existencia de políticas de fomento y financiamiento de la exploración y la disponibilidad de infraestructura básica para el desarrollo de la actividad minera, como es el abastecimiento de agua y energía, junto con la disponibilidad de infraestructura portuaria y, en algunos casos, incluso la disponibilidad de capacidad de tratamiento en plantas de beneficio.

EVOLUCIÓN DE LOS RECURSOS Y RESERVAS EN CHILE

La explotación eficiente de los recursos no renovables implica explotar a una tasa que maximice el valor en el tiempo de

la dotación de recursos. En el mercado global del cobre en el que no existe un productor que posea un carácter de dominante, se obtiene una tasa de extracción que está fundamentalmente determinada por la demanda y es ésta la que determina la oferta considerando criterios de maximización de la utilidad privada. Esto ha implicado que ante aumentos importantes de la demanda de cobre en las últimas dos décadas, la reacción de la oferta ha sido aumentar la tasa de extracción e incrementar el gasto en exploración, generando dinamismo en el descubrimiento de nuevos yacimientos y el reconocimiento de nuevos recursos en los ya existentes.

Una evidencia de este dinamismo se observa constatando que los recursos que declaraba el USGS (*U.S. Geological Survey*, por sus siglas en inglés) en 1995, considerando las tasas efectivas de extracción de cobre de mina, se hubiesen agotado en torno al año 2012. Sin embargo, las nuevas condiciones de mercado marcadas por el llamado **Súperciclo** de precios que se registró desde fines del 2003 al 2014, llevó a un *boom* de la exploración y a una reclasificación de los recursos, lo cual generó que las reservas reconocidas el año 2014, de acuerdo al USGS, más el cobre que se extrajo durante el periodo 1995 - 2014, equivalen a 3,4 veces las reservas identificadas el año 1995.

GRÁFICO/20

Total reservas de cobre en el mundo y vida útil estimada.



Fuente: Cochilco en base a USGS (1996-2015)

Otra forma de verlo es que en 1995 la extracción de cobre anual era del orden de 12 millones de toneladas⁶, lo que implicaba una oferta de cobre de mina de 10.2 millones de toneladas de cobre fino, con lo cual las reservas identificadas alcanzaban para 25.6 años. Por su parte, el 2014 se explotaron 21,7 millones de toneladas de cobre, pero considerando las reservas actuales, esta tasa de extracción hoy alcanza para 32,3 años. Ahora bien, si consideramos un incremento en la tasa de explotación del 3% anual, las reservas actualmente identificadas en el mundo alcanzarían para 20 años.

⁶ Para efectos de estimación de niveles de extracción se asume que los niveles de recuperación son constantes y representan el 85% del mineral.

Para el caso particular de Chile, las estadísticas del USGS muestran que en el año 2014 las reservas de Chile alcanzan a 209 millones de toneladas de cobre, lo que sumado a las casi 112 millones de toneladas que ya se han extraído en las últimas dos décadas, los nuevos yacimientos y el cambio en las clasificación económica de los recursos por razones de mercado, han generado un incremento en las reservas de cobre de 3,6 veces en relación a lo que existía en 1995.

GRÁFICO/21 Evolución reservas de cobre en Chile.



Fuente: Cochilco en base a USGS (1996-2015)

Las reservas totales que se han incorporado en Chile, incluidas las ya explotadas en los últimos 20 años, alcanzan cerca de 240 millones de toneladas. Si bien los grandes yacimientos como Chuquicamata, El Teniente, Pelambres, Andina, Los Bronces, Escondida o Collahuasi registran una antigüedad mayor a 20 años, en las últimas dos décadas, se han reportado descubrimientos de al menos 38 nuevos yacimientos, de acuerdo a datos de Cochilco y del SNL. Éste es un período bastante fructífero en términos de cantidad, pero al comparar el volumen de las nuevas reservas con lo ocurrido en los años previos resulta sólo regular, considerando los descubrimientos en la década de los ochenta de Escondida y Collahuasi.

En términos de vida útil, se estima que con los actuales recursos exista una vida promedio de 29 años para nuestros yacimientos. No obstante, en base a información pública de las principales faenas, es decir Andina, Radomiro Tomic, Collahuasi, Escondida, El Teniente, Sierra Gorda, Chuquicamata o el Distrito Centinela de Antofagasta Minerals, la vida útil promedio alcanza a 50 años. Esta situación además de dar cuenta del tamaño de estos yacimientos, visibiliza el comportamiento de la exploración: por razones económicas, es más preferible la exploración *brownfield* en torno a las instalaciones ya existentes que la *greenfield* en lugares sin explotación.

Para los próximos 20 años se espera que el dinamismo de la actividad exploradora continúe, pese a los ciclos que la afectan. Si hoy tenemos cobre para explotar en promedio por 29 años, probablemente los nuevos descubrimientos extenderán mucho más allá del 2045 nuestra minería. Para ello se requiere, además de nuestra natural dotación de recursos, de un conjunto de políticas que permitan maximizar el valor de dicha dotación. Estas políticas debieran enfocarse en la gestión de la propiedad minera y en el fomento a la actividad exploratoria, especialmente la *greenfield*.

Las secciones siguientes abordan estos dos temas, entregando un diagnóstico acerca de la gestión de la propiedad minera y su impacto en la actividad. Posteriormente se realiza un análisis de la actividad exploratoria.

GESTIÓN DE LA PROPIEDAD MINERA EN CHILE

La base del desarrollo de la actividad minera de un país radica en la estrategia de explotación de sus recursos, lo que se traduce en la manera en que se gestionan y entregan los derechos mineros para la exploración y explotación de las sustancias minerales. Esta variable constituye una primera garantía que determina las responsabilidades y limitaciones que tendrá un titular para realizar la minería. De este modo, los conceptos asociados a la propiedad minera corresponden a uno de los criterios de decisión más relevantes en la toma de decisiones al momento de realizar inversiones (Naciones Unidas, 2011).

En el caso de Chile, la propiedad minera se gestiona a través de concesiones, que pueden ser de exploración o explotación. La institucionalidad, regida por la Ley Orgánica Constitucional de Concesiones Mineras (1981) y el Código de Minería (1983), sostiene las bases del desarrollo de la actividad minera actual del país. Si bien el sistema ha sido considerado como exitoso por los actores de la industria, tampoco ha dejado de ser flanco de críticas relativas a posibles efectos

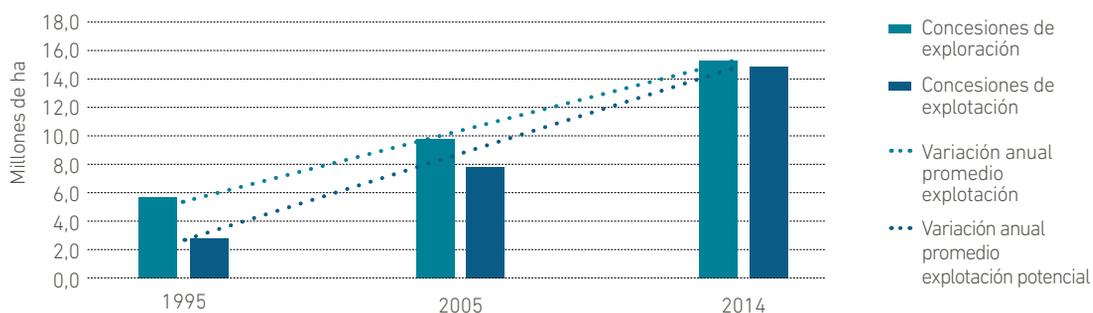
negativos o ineficiencias en virtud de su fin último en la promoción de la actividad minera.

El actual sistema de propiedad minera ha logrado conseguir un alto impacto, como se evidencia en el fuerte aumento de la producción de cobre de mina en Chile a partir de los años 90. Entre 1983 (año en que comienza a regir el Código de Minería y así la nueva institucionalidad de propiedad minera) y 2003, la producción chilena se multiplicó por 3,9 veces, pasando de 1,2 a 4,9 Millones de TMF de cobre de mina. Además de esta fuerte expansión de la producción, un aspecto clave a destacar es el aumento de la producción privada. Entre 1983 y 2003, la minería privada aumentó su producción 13,6 veces (de 0,2 a 3,3 millones de TMF de cobre de mina). En cambio, en el mismo período, Codelco aumentó su producción 1,5 veces (de 1 a 1,5 Millones de TMF de cobre de mina).

La evidencia anterior pareciera indicar que el aumento de la producción en Chile se debió a un aumento del precio, incentivando considerablemente la entrada de nuevos actores en la producción. Sin embargo, en el mismo período la tendencia del precio es a la baja y la producción total de mina aumentó 6,6 veces.

GRÁFICO/22

Evolución hectáreas concesionadas (Millones de ha)



Fuente: Sernegeomn (1995, 2005 y 2014)

El sistema de propiedad minera estableció un modo efectivo de constituir títulos para explorar y explotar las sustancias minerales. Esto se refleja en los niveles de inversión que ha habido en los últimos 30 años, los que finalmente se traducen en la expansión de la producción de cobre chileno.

Pese al significativo impacto que ha generado en Chile el actual sistema de concesiones de la propiedad minera, existen algunas características que no necesariamente han favorecido el uso eficiente de la propiedad, generando concentración, poco dinamismo y subutilización de la propiedad concesionada.

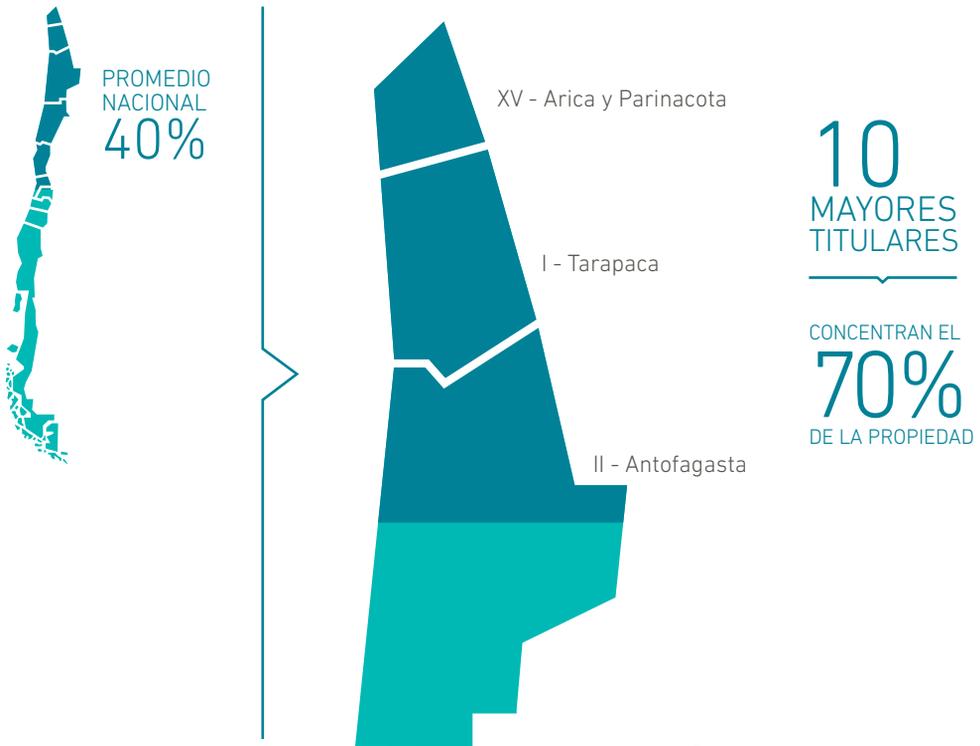
Concentración de la propiedad

De acuerdo a los análisis realizados por Cochilco con antecedentes del Sernegeomin, existe evidencia de una marcada concentración de la propiedad en las regiones de Arica y Parinacota (XV), Tarapacá (II) y Antofagasta (II), donde los 10 mayores titulares de propiedad concentran del orden del 70% del mercado, muy sobre la media del país, la que corresponde a un 40%. Por otro lado, la región de Atacama (III) logra mantenerse consistentemente bajo la media del país con una mayor distribución de las pertenencias mineras, lo que podría estar asociado al desarrollo de la pequeña y mediana minería en la región.

FIGURA/15

Concentración de la propiedad minera en las regiones XV, I y II

Marcada concentración de la propiedad en las regiones de Arica y Parinacota (XV), Tarapacá (I) y Antofagasta (II), donde los 10 mayores titulares de propiedad concentran del orden del 70% del mercado.



Fuente: elaboración propia en base a datos de Cochilco

Esta situación puede dar una impresión de inequidad en la distribución de las concesiones, la que podría estar en contra del propósito con que se entrega la misma, la concentración de la propiedad en la industria minera podría explicarse por factores intrínsecos, asociados a requerimientos de capital o niveles de conocimiento geológico, razón por la cual podría no tratarse necesariamente de una característica de ineficiencia de la industria a priori.

De la misma manera, se ha podido establecer que la concentración a nivel país se ha mantenido en un nivel similar desde el año 2000, mientras que entre las regiones mineras sólo Antofagasta (II) ha mostrado un aumento significativo en su nivel de concentración durante el periodo analizado. Por su parte, las regiones de Arica y Parinacota (XV) y Tarapacá (I) muestran una tendencia general a disminuir su concentración desde el año 2006. Esta tendencia también se observa, aunque de manera menos pronunciada, en la región de Atacama (III), la cual se mantiene incluso bajo los niveles promedio del país.

A nivel comunal, entre las regiones XV y III se destacan 10 comunas sobre los niveles considerados como altamente concentrados. Estas son: Camarones, Colchane, Camiña, Mejillones, Calama, Ollagüe, San Pedro de Atacama, Tocopilla, María Elena y Alto del Carmen.

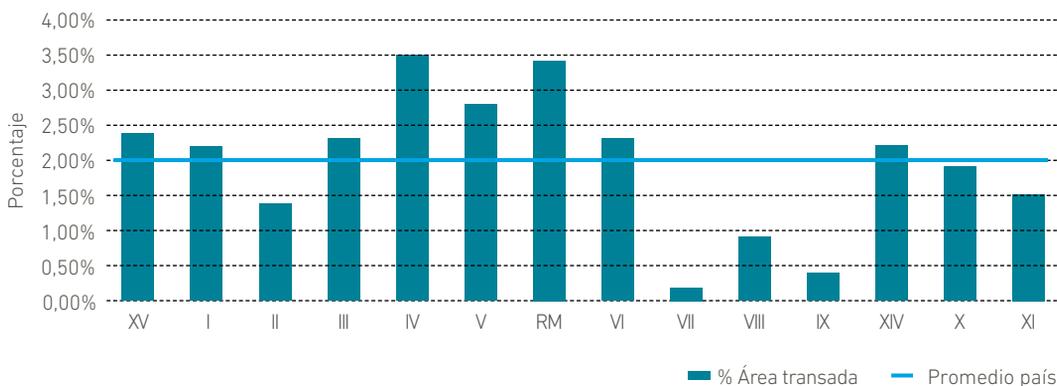
Si a los niveles de concentración de la propiedad se agrega al análisis el porcentaje de territorio de la comuna que está disponible, se observa que las comunas de María Elena y Tocopilla, además de altos niveles de concentración, tienen menor disponibilidad de superficie susceptible para nuevas pertenencias.

Cabe destacar el hecho de que la concentración en la propiedad minera no se asocia necesariamente a una ineficiencia del mercado, pues un titular de una operación minera podría requerir conocer de mejor manera la extensión total de un yacimiento, por lo cual necesitaría sobreestimar la superficie a solicitar en primera instancia para no dejar fuera recursos. Desde otro punto de vista, una operación podría tener propiedad fuera de la ubicación actual de la faena debido a que existen reservas consideradas en la planificación minera cuya explotación se llevaría a cabo en el mediano y largo plazo, lo que correspondería a un comportamiento eficiente desde el punto de vista de la industria.

La concentración podría no ser un problema si existe rotación y uso efectivo de la actividad. Para el caso de la rotación de la propiedad, las medidas de volatilidad o inestabilidad de un mercado representan una manera de dar cuenta del nivel de actividad y las transacciones que se dan internamente en el mercado, lo que se asocia generalmente a las barreras de entrada y salida que éste posee.

GRÁFICO/23

Porcentaje de área transada promedio por región en el periodo 2006-2013



Fuente: Cochilco en base a Sernageomin

En este sentido, en promedio cada año los titulares deciden mantener un 95% del área de explotación del año anterior e intercambiar un 2%. El 3% restante del área se elimina del registro para el año siguiente y, además, el área nueva incorporada representa un 10% del área total de explotación inmediatamente anterior.

Se aprecia que las regiones mantienen un comportamiento relativamente similar, por lo cual no podría afirmarse que ocurre un mayor nivel de movimiento en las propiedades en las regiones con mayor interés minero. Sólo en las regiones VII, VIII,

IX y XII se observa una disminución significativa. A nivel de los 10 mayores titulares de pertenencias mineras del país, se evidencia que éstos sólo aportaron con un 17% de las concesiones de explotación que cambiaron de titular.

Finalmente, si se analiza el periodo 2000-2013 se evidencia que en 14 años se ha mantenido cerca de un 65% del área de explotación (17% con un titular distinto y 48% con el mismo dueño), lo que da cuenta de la relativa estabilidad del mercado de las concesiones de explotación y la tendencia en el largo plazo de los titulares por mantenerlas.

Utilización de la propiedad

Las condiciones dadas sobre la concentración en polos de interés geológico y la estabilidad en la propiedad de la pertenencia minera no son condicionantes para determinar que el mercado se comporte de manera ineficiente. Ambos factores se pueden entender como decisiones racionales frente a titulares que se encuentren desarrollando actividades mineras en la zona concesionada.

Tal como se indica en la Constitución Política de la República, **la concesión minera obliga al dueño a desarrollar la actividad necesaria para satisfacer el interés público que justifica su otorgamiento**⁷. Asimismo, distintos autores han destacado que el sistema de concesiones mineras actualmente no promueve el desarrollo y la utilización con fines mineros de la concesión (Moscoso & Contreras, 2005; Cochilco, 2006; Cochilco, 2008; Jara, 2007; León, 2012), lo que crea una merma en el potencial minero del país, ya sea por fines especulativos o con fines de defensa del suelo⁸. A su vez, otros trabajos (Cochilco, 2011) también indican un exceso de concesiones de explotación, cuya duración indefinida amparada en el pago de una patente anual, obstaculiza el desarrollo y la inversión en exploración.

Cabe destacar que una cota inferior para la utilización de la propiedad con fines de explotación para la minería del cobre, estimada a través de modelos de regresiones (León, 2012), llegaría al 7% del total de área concesionada⁹.

Según el análisis realizado en Cochilco, la estimación de utilización de las pertenencias mineras alcanza un 23% del total del área de explotación, considerando las concesiones que posee un titular en la zona donde se declara una faena minera. Los resultados del análisis se resumen de la siguiente manera:

⁷ Constitución Política del Estado de Chile, 1980.

⁸ La defensa se refiere a que existan propietarios que crean concesiones mineras con el fin de defender la actividad que se realiza en superficie de agentes maliciosos que busquen imponer el derecho del subsuelo sobre el suelo con el solo fin de una compensación económica y no para realizar minería.

⁹ Se destaca que este valor no considera el uso de la pertenencia con fines de exploración ni las diferencias en requerimientos de extensión de área de la minería no metálica.

FIGURA/16
 Estimación de
 pertenencias mineras



Fuente: Cochilco en base a información de Sernageomin y León (2012)

Cabe destacar que existen por lo menos cuatro situaciones generales que explican un menor uso de la pertenencia con fines mineros. En primer lugar se encuentran aquellas propiedades que, si bien no están actualmente en uso, en el pasado fueron reconocidas y cuentan con información geológica. En segundo lugar, podría ser que la propiedad no tenga ni haya tenido ningún tipo de actividad, debido a que el titular aún no define la manera de reconocer su propiedad o las condiciones externas aún no

se lo permiten. En tercer lugar, se presenta el hecho de titulares que, sin el interés de realizar actividad minera, utilizan sus propiedades con fines especulativos. Por último, se tienen los casos de titulares que usan la concesión minera para resguardar las actividades que se realizan en superficie, debido a la fortaleza del derecho de propiedad que ésta confiere por sobre el predio superficial. Para los dos últimos casos, la literatura cuenta con datos particulares que demuestran su existencia (León, 2012).

ACTIVIDAD EXPLORATORIA

Un elemento fundamental de la sustentabilidad económica de la actividad minera radica en la capacidad de la industria y del estado de reponer los recursos que se extraen. Si bien los recursos mineros son recursos no renovables, sólo en una ínfima parte aflora de manera espontánea, debiendo realizarse costosas y complejas labores para precisar su ubicación y calidad. En este sentido, la exploración es fundamental para asegurar la sustentabilidad del negocio minero.

Anualmente Cochilco realiza una serie de trabajos que analizan y evalúan el desempeño de la actividad exploratoria, especialmente en lo referido a minerales no ferrosos¹⁰. 2015 es el tercer año consecutivo que registra caída en el presupuesto mundial de exploración de minerales no ferrosos, con una disminución de 18,3% respecto de 2014 y de un 57,3% respecto de 2012, año con un presupuesto declarado como histórico por la industria. Esta

situación reafirma el carácter cíclico de la inversión exploratoria y está en concordancia con la tendencia negativa de los precios de metales, representado por el índice del FMI.

El monto total registrado para el presente año llega a US\$8.771,3 millones, casi US\$12.000 millones menos que lo alcanzado en 2012, año peak del gasto en exploración en el mundo.

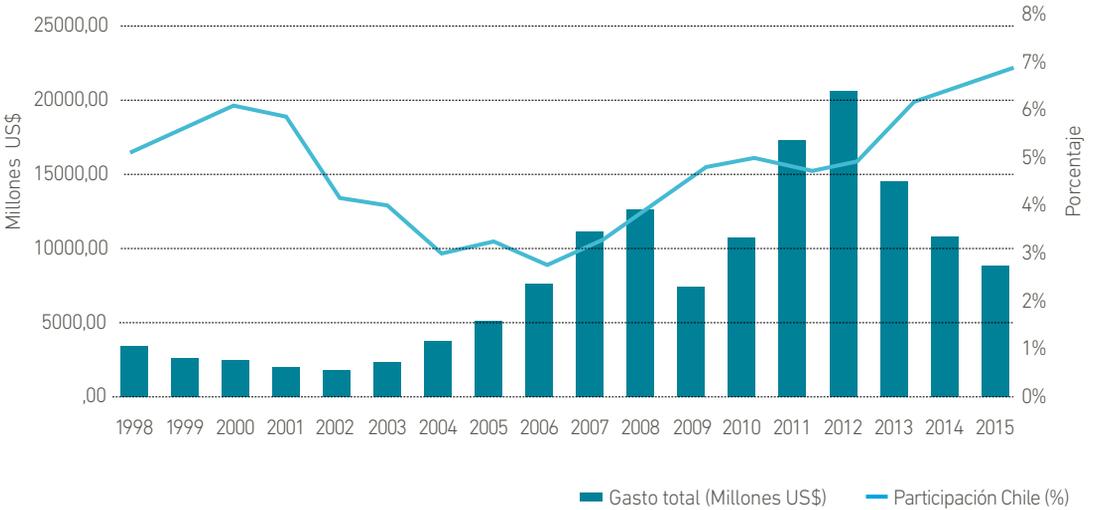
Durante el año 2015 continuó destacándose el aumento porcentual de la exploración tipo mine site o "mina", que viene en ascenso desde 2011 y continúa superando a la exploración básica desde 2014. Lo anterior demuestra la menor disposición de los exploradores hacia el riesgo, que es más alto en las etapas tempranas de un proyecto minero y en prospectos tipo *greenfield*.

En tanto, la exploración avanzada que se había mantenido desde 2005 en niveles superiores al 40%, ha caído levemente a cerca de un 37% durante 2015.

¹⁰ Metales base, oro, uranio, diamantes, grupo del platino, molibdeno, plata y otros.

GRÁFICO/24

Evolución gasto en exploración mundial y participación de Chile



Fuente: Cochilco en base a SNL Metals & Mining (2015)

Respecto de la distribución según el tipo de compañía minera, las denominadas *major* o de gran minería siguen siendo los actores más relevantes con el 48,8% del presupuesto mundial, tal como ha sido el caso desde el año 2012. Su presupuesto total en 2015 bajó en un 18% respecto del período anterior.

Por su parte, las empresas junior bajaron por segundo año consecutivo su participación desde 32,3% en 2014 a un 29,3% en 2015, con una reducción de su presupuesto total de 25,8%, lo que demuestra lo sensible de este estrato a los momentos de baja en los precios de los minerales.

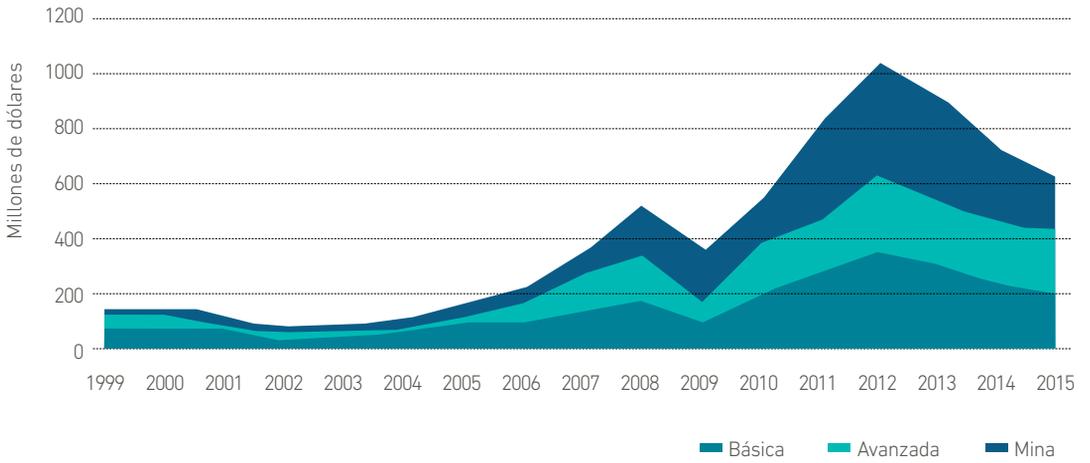
A nivel de destino, el continente americano concentra la mitad del presupuesto comprometido para 2015, donde Norteamérica, incluyendo México, concentra más de la mitad del presupuesto de América. A nivel de países, Canadá sigue en el primer lugar con un 13,5%, seguido por Australia y Estados Unidos con un 12,2% y 8,2%, respectivamente. En los lugares cuarto y quinto figuran Chile y China con un 7,0% y 6,2%, respectivamente.

La situación de Chile no es muy distinta a la del resto de los países mineros. El presupuesto en exploración minera bajó durante el año 2015 a US\$615 millones; es decir, un poco más de US\$90 millones menos que el año anterior. Sin embargo, el país volvió a posicionarse entre las naciones más importantes, incluso subiendo al cuarto lugar a nivel mundial, y su participación porcentual subió a 7% en 2015 desde un 6,6% registrado en el año previo. Con este resultado mantiene estable su ascenso en los niveles de participación que ha tenido a comienzos del presente siglo.

En 2015, la participación de las etapas de exploración básica, avanzada y de mina (SNL Metals & Mining, 2015) se presenta muy similar, llegando éste último año a valores cercanos a los US\$200 millones. Cabe resaltar que las tres etapas registraron caídas en sus presupuestos, siendo la más afectada la tipo *mine site* o "mina", con -20,5% de presupuesto respecto del año anterior. En el caso de la exploración básica y avanzada, éstas registraron caídas de -12,5% y -5,2%, respectivamente.

GRÁFICO/25

Gastos en exploración en Chile por etapa



Fuente: Cochilco en base a SNL Metals & Mining (2015)

Si analizamos los presupuestos según foco exploratorio, en Chile la búsqueda de metales base sigue siendo lo más importante, destinando en 2015 un 70,2% del presupuesto. Dentro de este grupo predomina el cobre que recibe casi la totalidad de esta inversión, mientras que una parte inferior se dirige a prospectos de zinc. El segundo metal es el oro con un 26,4% y el porcentaje restante es atribuible a un grupo mixto de otros recursos tales como la plata, molibdeno, rutilo o litio.

Dentro de las 10 empresas con mayores presupuestos en exploración en 2015, lideran la chilena AMSA con un 15%, la estatal Codelco con un 10% y la australiana BHP Billiton con un 9% del total en Chile. Este año destaca la inclusión de la canadiense Lundin Mining dentro de las 10 principales, la salida de la estadounidense Freeport McMoRan y la única empresa *junior* dentro de las diez principales, la australiana Hot Chili.

En Chile, las empresas *major* o de gran minería son los actores más relevantes en el ámbito de la exploración con el 77,9% del presupuesto, por sobre el promedio mundial (48,8%). Su presupuesto total en 2015 bajó en un 11,4% respecto del período anterior. Por su parte, las empresas *junior* mantienen la participación que han tenido durante los últimos tres años, con un 13,2% en 2015, y reduciendo su presupuesto en un 9,6%.

Como se evidencia con estas cifras, la actividad exploratoria en etapas tempranas y particularmente la de las empresas *junior* es una de las más afectadas en los momentos de baja de los ciclos de precios de los minerales y es, por lo tanto, el segmento en el cual debiera enfocarse la política pública.

CONDICIONES PARA POTENCIAR LA EXPLORACIÓN MINERA EN CHILE

Como se ha podido mostrar en este documento, si bien la minería del cobre se clasifica como una actividad económica dedicada a la extracción de recursos no renovables, presenta características tan dinámicas y complejas que puede resultar poco realista analizarla sólo desde esa perspectiva.

En primer lugar, existe una alta probabilidad que en el futuro las necesidades de cobre en el mundo serán mayores de las actuales, lo que representa una gran oportunidad para el país, considerando que poseemos una dotación importante de este mineral y un gran conocimiento sobre su explotación. Por otra parte, la actividad exploratoria pasada parece asegurar la actividad minera en el país, al menos para los principales yacimientos, por los próximos 50 años. No obstante, es necesario generar una serie de condiciones para aprovechar de mejor manera nuestros recursos, optimizando la utilización de la propiedad minera y generando las condiciones para su exploración y posterior explotación.

En el ámbito de la propiedad minera, existe evidencia que la certeza jurídica de nuestro sistema de concesiones ha jugado un rol clave en el desarrollo de la actividad minera. Sin embargo, hay un grado de concentración bastante importante especialmente en algunas comunas que puede afectar la apropiada asignación de los recursos que ahí se encuentren. Por otro lado, existe una baja rotación de la propiedad lo que no es una buena señal sobre su uso eficiente, especialmente considerando que de acuerdo a las estimaciones realizadas en Cochilco, a lo más el 23% de las concesiones de explotación muestran algún

grado de explotación. Con estos antecedentes resulta pertinente discutir mecanismos que agilicen la constitución de propiedad minera y que permitan su uso para los fines para los cuales es asignada. En este sentido, considerando las ventajas del sistema de concesiones chileno y lo complejo que resulta su modificación, sería de gran utilidad trabajar en los consensos que permitan que la propiedad actualmente asignada sea efectivamente aprovechada para lo que fue entregada y, con ello, genere valor para el país.

En el ámbito del fomento a la actividad exploratoria se identifican tres grandes líneas de acción.

Generación de información geológica básica:

La existencia de información geológica precompetitiva pública confiable y oportuna es un factor determinante en la competitividad de los distritos mineros en la actualidad. Chile ha dado pasos importantes en esta dirección, como es la existencia de la figura de Persona Competente y la aprobación del reglamento asociado al artículo 21 del Código de Minería, aun cuando su implementación en un sistema eficiente es aún una tarea en desarrollo. La ejecución de un plan nacional de geología por parte de Sernageomin también es un avance. No obstante, aun se requieren políticas y asignación de recursos para contar con un sistema de información geológica y de propiedad apropiado para la importancia que tiene y debe tener Chile en la industria de la exploración.

Desarrollo de instrumentos de fomento a la exploración: Mucho se ha discutido en Chile sobre las ventajas de un incentivo tributario a la actividad exploratoria que permita deducir

los gastos de esta etapa del negocio minero, como existe en economías más desarrolladas en este ámbito como son Canadá y Australia, donde la actividad de las empresas de exploración representa un motor de desarrollo para su industria financiera. Sin embargo, ésta no es la única manera de fomentar la exploración, ya que existe la posibilidad de asignar fondos mediante concursos como es el caso del fondo Fénix, de Corfo, o bien mediante la asignación directa como ocurre en Australia o Canadá en períodos como el actual, donde el financiamiento de capital de riesgo se hace más escaso y la actividad exploratoria se deprime con el consiguiente aumento del desempleo y el impacto en la sustentabilidad de largo plazo de la actividad extractiva. En este sentido, el instrumento de reconocimiento de reservas que tiene Enami es un antecedente de la existencia de este tipo de políticas, pero que necesita una evaluación y probablemente modernización previa a su potenciamiento.

Generación de infraestructura básica: Pocas veces se asocia la existencia de infraestructura básica para la explotación como un incentivo

a la exploración. La existencia de propiedad minera disponible, financiamiento e información geológica de calidad no asegura que se realice la exploración, pues la inexistencia de infraestructura caminera, distribución eléctrica, agua, plantas de tratamiento e instalaciones portuarias, restringe las zonas de exploración a lugares donde sí existen estas condiciones o la condiciona a la búsqueda de proyectos de un tamaño que permitan financiar esta infraestructura.

Como se puede apreciar, aún existe bastante espacio para mejorar el desempeño de la actividad exploratoria en Chile y de esa manera maximizar el valor del uso de nuestros recursos minerales, generando adicionalmente todos los encadenamientos que se pueden derivar desde esta etapa del negocio minero.

Este es uno de los espacios de mejora que se suma a los ya identificados por el Programa Nacional de Minería Alta Ley y Fundación Chile, donde Cochilco ha aportado generando información y análisis de valor para la industria.

ENERGÍA

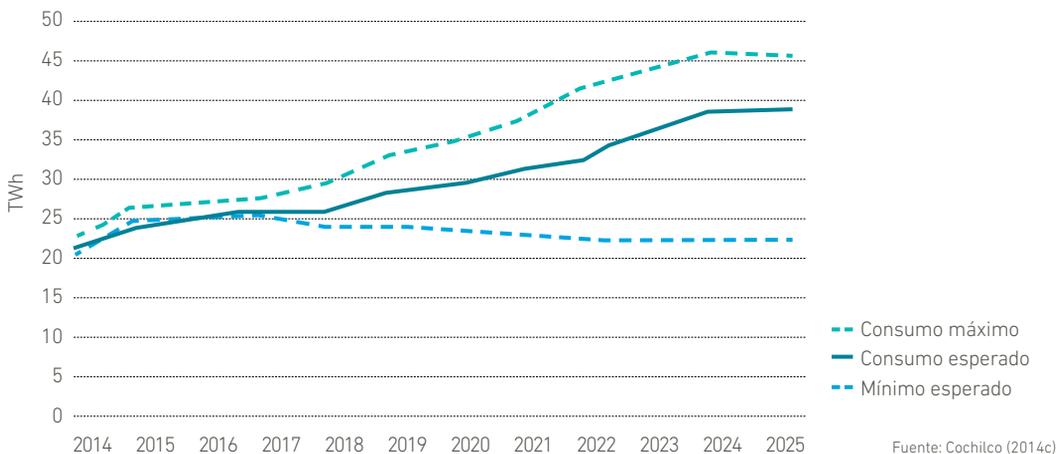
Hoy el sector minero exporta alrededor de 6 millones de toneladas de cobre al año, utilizando 21,9 TWh (terawatts-hora), en un escenario marcado por el aumento de costos y la disminución de su productividad.

Se espera que para el año 2025 la minería del cobre llegue a requerir 39,5 TWh, siendo las faenas mineras ubicadas en el área del Sistema Interconectado del Norte Grande (SING) las principales demandantes, con 23,3 TWh, mientras que las del Sistema Interconectado Central (SIC) consumirían 16,1 TWh (Cochilco, 2014c).

La redacción de esta sección estuvo a cargo del equipo de Fundación Chile, compuesto por: Francisco Klima, Tomás González, Nicole Valdebenito y Hernán Araneda.

GRÁFICO/26

Consumo eléctrico nacional de la minería del cobre 2014-2015, según los costos máximo, esperado y mínimo 2014-2015 (Terawatts-hora)





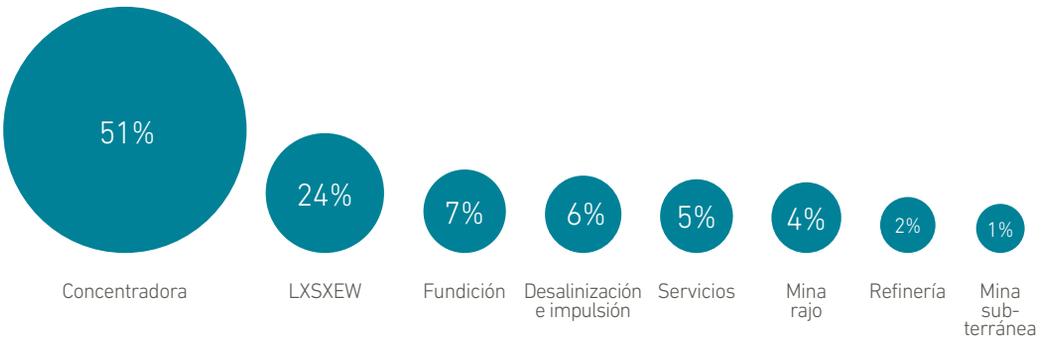
Fotografia Codeco (Gabriela Mistral)

El aumento en el consumo esperado de electricidad será impulsado principalmente por el proceso de concentración. Esto se debe a que gran parte de los proyectos de expansión y los nuevos proyectos, de acuerdo a la mineralogía de los yacimientos, utilizan esta tecnología en la recuperación de mineral. Se proyecta que este proceso aumente su participación en el consumo de 11,2 TWh en 2014 a 24,4 TWh en 2025, es decir, 119% de incremento. Además, dado que las operaciones de concentración son intensivas en agua, el consumo eléctrico asociado a desalinización e impulsión en el período aumentará en 5,4 veces, pasando de 1,2 TWh a 6,25 TWh en el periodo 2014-2025 (Cochilco, 2014c).

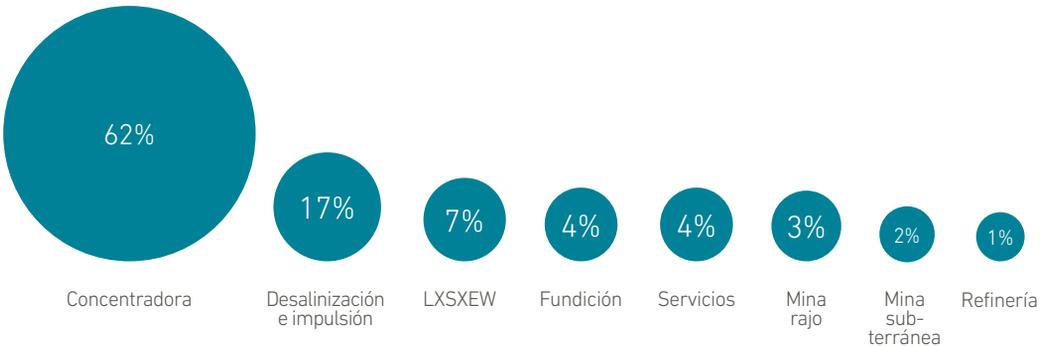
GRÁFICO/27

Consumo eléctrico esperado de la minería del cobre por procesos a nivel nacional.

Participación procesos de consumo de energía en minería 2014 (total=21,9 TWh)



Participación procesos de consumo de energía en minería 2025 (total=39,5 TWh)



Fuente: Cochilco (2014c)

Al analizar los proyectos según su condición de ejecución, se determina que los que se denominan como “posibles” podrían empezar a demandar electricidad el año 2017, alcanzando al 2025 un consumo de 7,67 TWh, lo que explicaría 19,4% del consumo esperado a esa fecha. Por otro lado, la demanda de los proyectos potenciales emergería en 2020, para alcanzar el año 2025 un consumo esperado de 8,56 TWh, correspondiente a 21,7% del total (Cochilco, 2014c).

Cochilco (2014c) establece que el consumo máximo de energía de la minería a nivel nacional podría llegar a 46,3 TWh, en el escenario optimista de que todas las operaciones continuaran según lo planificado, y que todos los proyectos se pusiesen en marcha en la fecha y con la capacidad productiva estimadas por sus titulares.

En una lógica complementaria a la anterior, Lagos, Peters y Jara (2015) realizan un ejercicio de proyección que supone el desarrollo completo de la producción de cobre mina en Chile al 2035, como resultado de un desarrollo acelerado de todas las reservas de cobre chileno. En este trabajo los autores determinan que el consumo de energía crecerá hasta un máximo en 2025 de 2,1 veces la cifra de 2013¹¹, debido al aumento de la capacidad de plantas concentradoras, minas y servicios, y debido a la reducción de la participación de los procesos de lixiviación en la cadena productiva. Posteriormente, en 2035, la energía requerida por la minería se reduciría a 1,9 veces la energía usada en 2013.

De acuerdo a la información provista por la Asociación Gremial de las Generadoras de Chile¹², al 31 de diciembre de 2014, la capacidad instalada de generación eléctrica del SIC y del SING es de 19.966 MW, lo que corresponde a más de 99% de la capacidad instalada en todo el país (sistemas medianos como Aysén y Magallanes, y otros sistemas aislados, representan menos de 1% de la capacidad de generación total instalada), (Generadoras de Chile, 2014).

El SIC posee una potencia instalada de generación de 15.180 MW, de los cuales 52,5% corresponde a centrales termoeléctricas, 41,9% a centrales hidroeléctricas, 4,3% a centrales eólicas y 1,3% a centrales solares. Por su parte, el SING posee una potencia instalada de generación de 4.785 MW, de los cuales 95,6% corresponde a centrales termoeléctricas, 0,2% a centrales hidroeléctricas, 1,9% a centrales eólicas, y 1,9% a centrales solares.

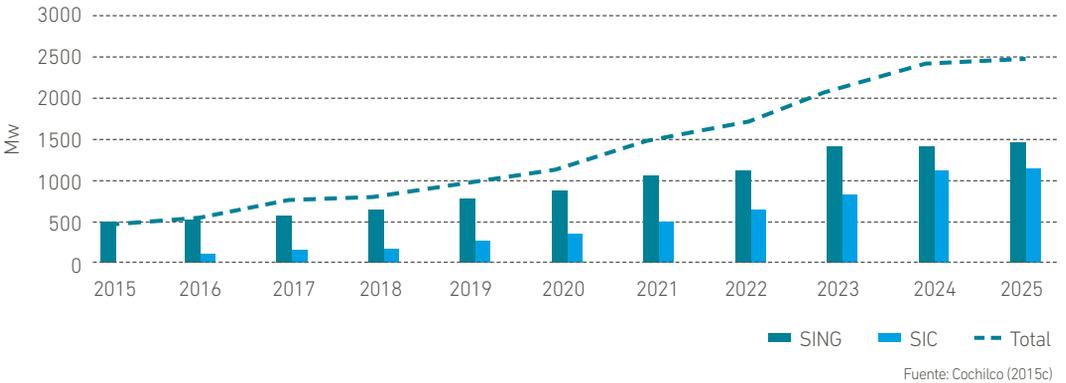
Cochilco (2015c) estima, de acuerdo al consumo esperado de electricidad, que para satisfacer la demanda esperada de la minería del cobre, se requeriría agregar una capacidad de generación eléctrica de 2.500 MW en el período 2015 – 2025, de los cuales 1.100 MW corresponderían al SIC y 1.400 MW al SING. En el gráfico que se presenta a continuación se muestra la proyección de demanda acumulada de potencia de generación para el SING, SIC y el total nacional.

¹¹ Lo que correspondería a 46,0 TWh; cifra congruente con lo estimado por COCHILCO para 2025 (46,3 TWh).

¹² Revisado el 25 de noviembre de 2015 en: <http://generadoras.cl/generacion-electrica/sector-generacion-electrica/>

GRÁFICO/28

Proyección de la demanda acumulada de potencia eléctrica, medida en MW, requerida por la minería del cobre a partir del 2015 en el SING, SIC y total nacional



Respecto del costo, Lagos *et al.* (2015) señalan que, para lograr alcanzar el escenario total de ejecución de proyectos, entre otras cosas, el precio de la energía debería mantenerse inferior a 100 US\$/MWh, lo que dependerá directamente del aumento de la oferta de energía lo que, además, está asociado con el objetivo de competitividad establecido, entendiéndose que el costo de la energía hoy representa entre 25% y 30% del total del costo de la operación y podría llegar a ubicarse incluso sobre 50%.

Sin embargo, en el Índice de Rendimiento de la Arquitectura Energética¹³ de 2015, elaborado por el *World Economic Forum*, Chile posee un precio de la electricidad para la industria de US\$120 por MWh. Además, se observa que la posición de Chile es poco competitiva, tanto en lo que respecta al precio de la electricidad para la industria, como al índice general de rendimiento de la arquitectura energética.

¹³ EAPI por su sigla en inglés.

TABLA/3
 Índice de Rendimiento de la
 Arquitectura Energética (EAPI) 2015

País	Precio de electricidad para industria (USD/KWh)	EAPI			Dimensiones EAPI		
		Puntuación	Ranking Mundial	Ranking Am.Lat.	Desarrollo y crecimiento económico	Sostenibilidad medioambiental	Seguridad y acceso energético
Australia	0,06	0,66	38	n.a.	0,67	0,45	0,87
Noruega	0,07	0,79	2	n.a.	0,68	0,74	0,96
EE.UU.	0,07	0,66	37	n.a.	0,59	0,51	0,89
Perú	0,08	0,68	31	6	0,79	0,55	0,71
Canadá	0,09	0,69	25	n.a.	0,59	0,61	0,89
Colombia	0,10	0,74	9	1	0,75	0,61	0,84
Chile	0,12	0,67	34	7	0,65	0,55	0,82
Suiza	0,13	0,80	1	n.a.	0,71	0,79	0,89
Brasil	0,16	0,70	20	5	0,56	0,71	0,82
China	n.d	0,53	89	n.a.	0,46	0,40	0,71

Fuente: WEF (2014a y 2014b)

Aún cuando el impacto de la energía en la estructura de costos de las compañías mineras es un problema actual, el escenario antes descrito configura un desafío de largo plazo que el país debe abordar. Por un lado, el Estado debe avanzar en materializar una política energética acorde con las necesidades actuales y futuras del país (la Agenda Energética 2050

representa un avance en esta dirección). Por otro lado, las compañías mineras deben seguir impulsando el desarrollo de tecnologías para mejorar la eficiencia energética de sus procesos productivos y propiciar el uso de energías renovables no convencionales. La sustentabilidad de la minería en el largo plazo le imprime un sentido de urgencia a este desafío.

AGUA

El agua en la industria minera del cobre es considerada como un insumo estratégico, dadas las crecientes restricciones que tiene su uso en un ambiente de menor disponibilidad y, por lo tanto, mayor costo de obtención.

De acuerdo a Cochilco (2015c), el consumo de agua total aumentará 41,4% entre 2014 y 2026, llegando a 21,5 m³/seg.

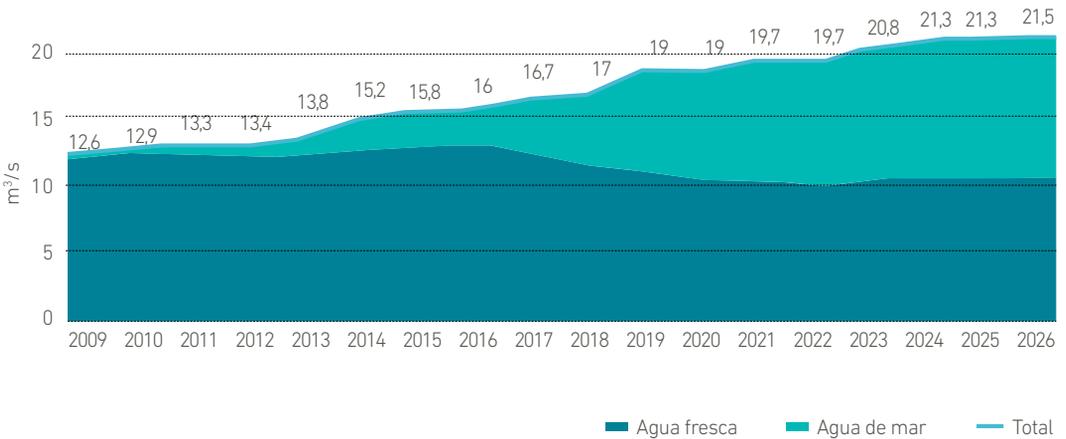
Para 2026 se espera que el consumo de agua fresca siga una tendencia decreciente de 1,9% anual desde lo estimado al 2015, alcanzando 10,8 m³/s. Con ello, casi igualaría al uso de agua de mar, estimada en 10,7 m³/s al 2026, el que seguiría una tendencia creciente a una tasa de 14,1% anual.

Una de las principales causas en la disminución del consumo de agua fresca proviene de la puesta en marcha de la ampliación de la planta desalinizadora Coloso, cuyo inicio de operaciones se estima para el año 2017 con una capacidad de 2.500 l/s. Adicionalmente, son cada vez más las compañías mineras que se suman a la construcción y expansión de sus propias desalinizadoras para enfrentar las limitaciones de agua fresca.

La redacción de esta sección estuvo a cargo del equipo de Fundación Chile, compuesto por: Francisco Klima, Tomás González, Nicole Valdebenito, Hernán Araneda y Ulrike Broschek.

GRÁFICO/29

Evolución del consumo esperado de agua fresca y de mar en la minería de cobre 2009-2026 (m³/s)



Fuente: Cochilco (2015d)

En términos de procesos, el consumo de agua fresca en plantas concentradoras seguiría siendo el mayor, dado la falta de nuevos proyectos del área hidrometalúrgica del cobre y el agotamiento de minerales lixiviables. De 71% del consumo de agua fresca esperado al 2015, las concentradoras llegarían a representar 82% al 2026, mientras que el proceso de electroobtención de cátodos caería desde 12% a 4% en el mismo período.

En lo referente al consumo esperado de agua de mar, también se espera que el mayor crecimiento provenga de proyectos de concentración de sulfuros (pasando del 87% en 2015 hasta 91% al 2026) y una baja en la proporción de uso para operaciones de hidrometalurgia (desde 7% el 2015 hasta 4% en 2026). Ahora bien, el crecimiento en el uso de agua de mar estará caracterizado por una mayor variabilidad, pues del total esperado al 2026, 40% se encontraría asociado a proyectos clasificados como posibles y potenciales. Las proyecciones realizadas por Cochilco (2015c) respecto del consumo regional de agua de mar

por parte de la industria establecen que éste será liderado por la Región de Antofagasta, seguido en menor medida por la Región de Atacama. Respecto del agua fresca, el análisis anticipa una disminución de la participación de la región de Antofagasta y un leve crecimiento de Atacama, manteniéndose relativamente constante el consumo en las otras regiones. La mayor cantidad de proyectos que utilizarían agua de mar en sus procesos en la región de Antofagasta y la necesidad de contar con más agua para el procesamiento de mineral primario de cobre, explican el cambio de tendencia esperado, haciendo que la participación de la Región de Antofagasta se reduzca desde 43% estimado al 2015, hasta 21% al 2026, siendo superada por la región de Atacama con 23% del consumo esperado de agua fresca para tal año.

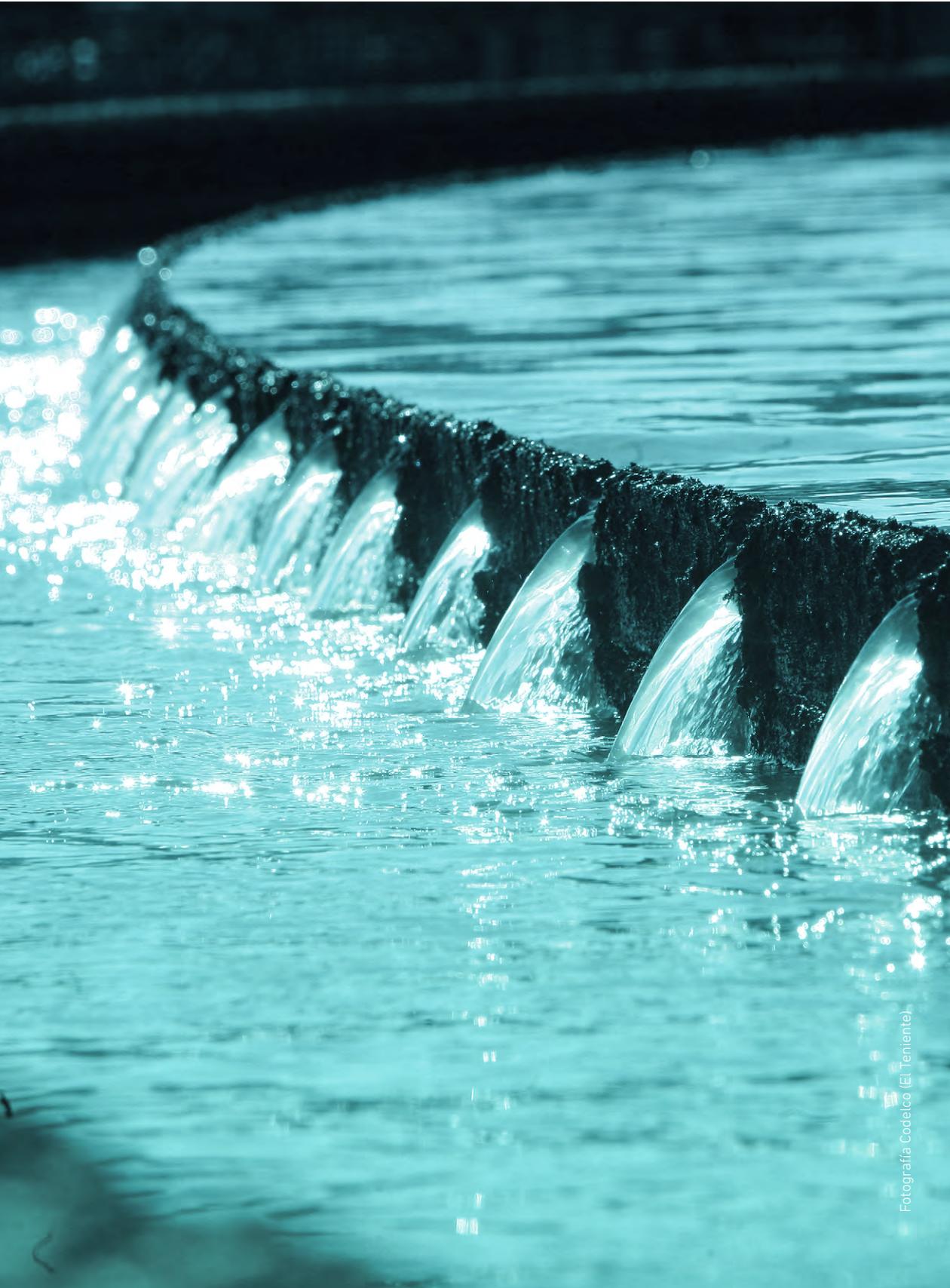
De acuerdo a esta proyección, la cantidad de operaciones de la minería del cobre que al 2026 utilizarán agua de mar en sus procesos ascendería a 17, tal como se detalla en la siguiente tabla.

TABLA/4

Capacidad instalada de uso de agua de mar en minería del cobre.

OPERACIÓN	AÑO ESPERADO DE PUESTA EN MARCHA	CAPACIDAD DESALINIZACIÓN (l/s)	CAPACIDAD IMPULSIÓN DIRECTA (l/s)
Michilla	Operando	75	23
Mantoverde	Operando	120	-
Escondida (Coloso)	Operando	525-2.500	-
Mantos de la luna	Operando	-	78
Centinela (Esperanza)	Operando	50	780-1.500
Antucoya	Operando	20	280
Las Cenizas (Taltal)	Operando	9,3	12
Sierra Gorda	Operando	63	1.315
Pampa Camarones	Operando	-	12,5
Candelaria	Operando	300	-
Encuentro	2018	20	115
Diego Almagro	2018	-	315
Santo Domingo	2018	2,5-290	389
Radomiro Tomic	2018	1.630	-
Dominga	2019	450	-
Spence	2019	800-1.600	-
Quebrada Blanca	2020	1.300	-

Fuente: Cochilco (2015d)



En relación al impacto que tendría la utilización de agua de mar desalinizada en las operaciones mineras que tienen un consumo superior a 200 l/s, la estimación conceptual realizada muestra que, para un escenario en que el costo de la energía fuese de 100 US\$/MWH, las faenas estudiadas podrían aumentar sus costos en promedio de 16 cUS\$/lb, siendo 10 cUS\$/lb por efecto de costo de operación y 6 cUS\$/lb por la inversión analizada. Este indicador varía según

las necesidades de impulsión (determinadas, a su vez, por la distancia de la costa y ubicación de la planta) en un rango de 7 y 27 cUS\$/lb.

Para realizar esta estimación, se consideraron las obras de infraestructura, la planta desalinizadora, el sistema de bombeo y las cañerías para alcanzar la cota geográfica en que se ubica la planta de procesamiento. Las características aproximadas de las operaciones se indican a continuación:

TABLA/5
Caracterización de operaciones
en base a agua fresca n°1

VARIABLE	UNIDAD	RANGO	PROMEDIO
Cota planta	m.s.n.m	750- 4.400	2.400
Consumo de agua	l/s	200-1.500	880
Distancia a la costa	Km	60-250	170

Fuente: Cochilco (2015d)

En la estimación de orden de magnitud, Cochilco (2015c) considera los siguientes supuestos:

TABLA/6
Caracterización de operaciones
en base a agua fresca n°2

VARIABLE	UNIDAD	VALOR
CAPEX planta desaladora	US\$/((m ³ /día)	1.739-1.940
CAPEX piping	US\$/m	736
CAPEX bombeo	Mil. US\$/un	3,75
Precio energía	US\$/M Wh	50-100
Consumo Energético (desalinización)	KWh/m ³	3,4
Consumo energético (impulsión)	KWh/m ³	43.221

Fuente: Cochilco (2015d)

A partir de las consideraciones anteriores, se calcularon valores de inversión que estarían entre los US\$122 y US\$615 millones, cifra determinada principalmente por la ubicación de las instalaciones. Los costos de operación del sistema completo (desalinización e impulsión), varían entre 1,8 y 3,6 US\$/m³ de agua tratada (considerando un costo energético de 100 US\$/MWh), lo cual se relaciona directamente con la altura y distancia a la que se debe impulsar el agua desalada.

RECUADRO 6: LOS INTERCAMBIOS DE AGUA POR AGUA (SWAPS)

La definición original de “*swap*”, intercambio o permuta, se encuentra en el campo financiero y se refiere a un contrato entre dos partes para intercambiar flujos de caja en el futuro de acuerdo a una fórmula preestablecida. Se trata de contratos “a la medida” que satisfacen las necesidades específicas de quienes lo firman y que buscan que ambos contratantes ganen con el acuerdo.

Su aplicación en la gestión del agua se refiere al intercambio de dicho recurso y no a la compra de agua por parte de uno de los involucrados. Por ejemplo, supongamos que una empresa que opera a gran altura requiere de agua, y que existe una cuenca cuya agua, proveniente desde una altura similar, es utilizada en el nivel del mar por un grupo de usuarios. En ese caso, la empresa podría optar por desalar agua de mar para entregarla a los usuarios aguas abajo, a cambio de poder acceder al agua proveniente desde la parte alta de la cuenca. Con ello, la empresa podría eficientar sus procesos y reducir los costos asociados a la instalación y operación de un sistema para bombear agua hasta grandes alturas, y los usuarios de la parte baja accederían a una mejor disponibilidad del recurso.

Para que existan acuerdos que beneficien ambas partes, el que cede el agua debe recibir beneficios claros, tales como:

- Recibir un volumen mayor de agua que la que dispone actualmente.
- Disponer de una calidad de agua igual o mejor que la entregada.
- Disminuir el costo por m³ de agua al compartir gastos.
- Aumentar la seguridad de abastecimiento en la parte baja, acordando recibir agua de las partes altas en caso de que se presenten problemas en la planta desaladora o sistema de trasvase.
- Dejar de explotar acuíferos sobre explotados o recargarlos en las partes bajas.

La empresa ubicada en la parte alta sólo acordará un SWAP si el costo de suplir agua a la parte baja es menor que el costo de bombear el agua a la parte alta sin afectar el ambiente y gestionando el recurso coordinadamente con los sectores ubicados aguas abajo. Todo el excedente de agua por sobre la demanda de la parte alta debe seguir fluyendo hacia la parte baja de la cuenca, para proteger el caudal ambiental y permitir la recarga de acuíferos. En este sentido, el estudio

de impacto ambiental es obligatorio en este tipo de acuerdos de permuta, así como el establecer compromisos para aumentar la seguridad hídrica.

La posibilidad de realizar intercambios de puntos y fuentes de extracción de agua entre usuarios para compensar la carencia de este elemento se viene debatiendo en Chile desde hace muchos años. En la zona norte del país se ha pensado en intercambios entre empresas que abastecen a las ciudades ubicadas en la costa del Pacífico con empresas mineras localizadas en la alta cordillera por encima de los 4,000 msnm. Las fuentes de agua, en ese caso, serían de desalación o de trasvases.

Fundación Chile inició en 2009 una serie de análisis en esta línea. Por ejemplo, el proyecto Aquatacama fue una iniciativa que recibió el apoyo del gobierno de Francia y estudió la posibilidad de traer agua desde Bío Bío y captaciones en la ruta en Rapel, mediante tuberías bajo el mar. Con el agua a nivel del mar se podrían realizar permutas entre usuarios de acuíferos ubicados en las partes bajas y usuarios en las partes altas. Lamentablemente las permutas no prosperaron.

Para materializar este tipo de proyectos es fundamental que la población esté informada y perciba las ventajas asociadas. El mayor obstáculo es la inseguridad a la que se enfrentan con una nueva fuente, por lo que la población debe tener claridad sobre las opciones para lidiar con ello e inclusive saber que la disponibilidad del recurso aumenta al disponer de ambas fuentes, la original y la nueva, en caso de emergencia.

La recarga de acuíferos con agua tratada desalada o de trasvases es otro factor importante. Sin el aval social se genera oposición por parte de la población debido al temor legítimo de perder sus fuentes de agua y depender de la desalación. Por otro lado, cuando no perciben ventajas económicas el acuerdo se dificulta, aún cuando la disponibilidad del recurso en la parte baja sea mayor.

Por último, resulta fundamental prevenir los riesgos asociados al cierre de las operaciones de la empresa ubicada en la parte alta, sobre todo en aquellos aspectos relacionados con el costo del agua y su impacto en la población.

Elaborado por
la Gerencia de
Sustentabilidad de
Fundación Chile

MINERÍA Y CAMBIO CLIMÁTICO: TRANSICIÓN HACIA UNA ECONOMÍA CIRCULAR

El 2015 será considerado un año histórico para la humanidad, debido al acuerdo universal alcanzado en la Cumbre del Clima COP21 en París, donde 195 países han acordado mitigar el cambio climático de manera que el planeta no aumente su temperatura en más de 2°C al 2100, sustituyendo así al Protocolo de Kioto a partir del 2020. Este acuerdo, que finalmente incorpora a China –actualmente el país más contaminante del mundo- entrará en vigor cuando los países que lo ratifiquen sumen, como mínimo, 55% de las emisiones globales, con una fecha límite hasta el 21 de abril de 2017.

Si bien nuestro país no se encuentra dentro de la lista de los principales países emisores de GEI –representando solo 0,3% de las emisiones totales a nivel mundial- Chile ha experimentado un aumento significativo en sus emisiones, con un incremento de un 74,1% solo entre 2008 y 2009. Además, de acuerdo al *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* y al Banco Mundial, América Latina es una de las zonas más vulnerables a los efectos del cambio climático, fenómeno cuyo costo podría significar alcanzar –según la Cepal- entre 1,5% y 5% del PIB anual de la región en caso de que la temperatura aumentara 2,5°C sobre el promedio histórico.

La minería en Chile es intensiva en el uso de agua y energía. Una característica fundamental de estos recursos es su interconexión mutua, lo que se conoce como el Nexo Agua-Energía, debido al principio de que la generación de energía requiere de agua y la energía permite el transporte y tratamiento de agua. Naturalmente, el cambio climático tiene un efecto directo y negativo sobre este equilibrio, por lo que la

La redacción de esta sección estuvo a cargo de Petar Ostojic, Neptuno Pumps.

industria minera debe adoptar un rol protagónico en la lucha contra el calentamiento global, como lo ha hecho en su compromiso por el desarrollo sustentable de sus procesos productivos y la contribución al desarrollo social y económico de sus comunidades.

Durante los últimos 15 años, la minería en Chile ha aumentando sus emisiones de gases invernadero a una tasa anual de aproximadamente 5,3%, debido a leyes más bajas, mayores distancias de transporte y un aumento en la producción, que derivan en un mayor consumo eléctrico –energía obtenida principalmente del SING que utiliza en mayor parte carbón- y de combustibles (Cochilco, 2012).

Según un estudio del Comité de Cambio Climático de la Cámara Chileno Británica de Comercio (Britcham), en 2014, solo 0,01% de las empresas en Chile medían su huella de carbono, entre ellas las principales compañías mineras del país. Actualmente, Compañía Minera Doña Inés de Collahuasi es la única empresa minera que verifica su huella de carbono en sus tres alcances –emisiones directas, emisiones indirectas de energía y otras emisiones indirectas-, bajo estándares internacionales como la norma UNE ISO 14.064-1:2006, el referencial GHG Protocol y la norma inglesa PAS 2050. Esto nos permite tener un valor real y representativo de las emisiones de una faena minera. De un total de 2.068.991 toneladas de CO₂ emitidas el año 2014,

24% fueron emisiones directas, 53% emisiones indirectas por compra de electricidad y 23% otras emisiones indirectas (transporte nacional de los productos, vuelos nacionales, actividades de proveedores y contratistas, entre otras).

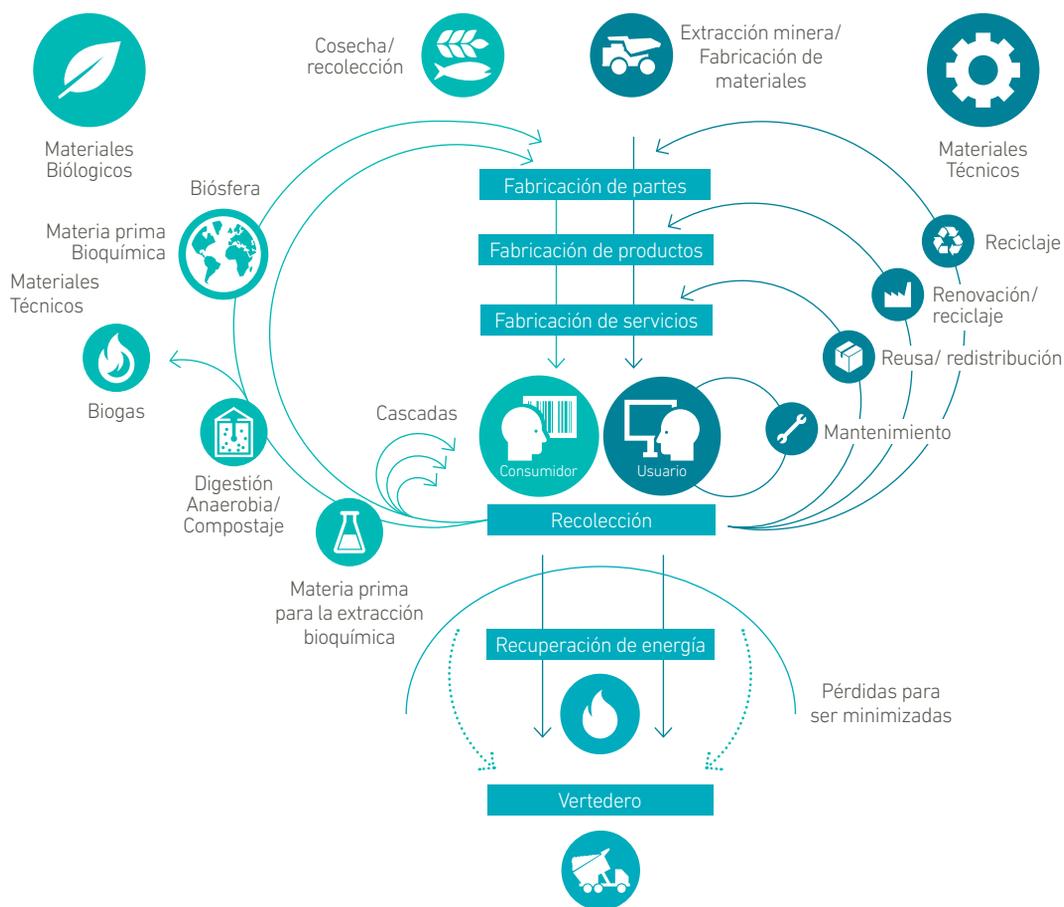
La aplicación de políticas de eficiencia energética y la incorporación de fuentes de energías renovables no convencionales a la matriz energética constituyen actualmente las principales medidas utilizadas por las compañías mineras para disminuir su huella de carbono. Ya en 2009, un estudio de Cochilco planteaba que los esfuerzos puestos en un escenario de eficiencia energética, reduciendo el consumo de energía en 23%, ofrecería a la industria minera un potencial de mitigación de emisiones de CO₂ de 18% al 2020. Sin embargo, en 2015, la presidenta Michelle Bachelet asumió el compromiso en la Asamblea de las Naciones Unidas de reducir las emisiones de dióxido de carbono de Chile en 30% y hasta 45% al 2030, compromiso que se ha materializado a través de la promulgación de una ley de eficiencia energética, la aplicación de impuesto a la emisión de carbono -incorporado en la reciente reforma tributaria- y la incorporación de fuentes de generación eléctrica con energías renovables, esperando alcanzar 60% del total de la producción energética el 2035 y 70% al 2050.

La minería ha dado pasos importantes en su transformación hacia una industria sustentable y las políticas de transición a energías renovables ayudarán a reducir de manera

importante las emisiones indirectas por compra de electricidad. Sin embargo, las políticas de eficiencia energética no son suficientes para reducir de manera significativa las emisiones directas e indirectas ni para cumplir con los compromisos asumidos por el gobierno al 2035.

Si bien la minería es una actividad extractiva y no se caracteriza por producir bienes y servicios, en Chile se ha transformando en el principal motor económico y de desarrollo de tecnología, emprendimiento e innovación. Esto le permite asumir un papel protagónico en la nueva era industrial que se está desarrollando a nivel global. Esta nueva etapa, que el *World Economic Forum* ha denominado una "Cuarta Revolución Industrial" (2016), no solo plantea el uso de nuevas tecnologías de manufactura e información, la incorporación de fuentes de energía renovables y combustibles alternativos o el uso de nanotecnología, robótica e inteligencia artificial, sino que además tiene como objetivo el reemplazo del actual modelo lineal de consumo. Históricamente, este ha dispuesto de grandes cantidades de energía y materias primas de fácil acceso y bajo costo, y que ha estado basado en el principio de "producir-usar-tirar", por un modelo circular que utilice los recursos –valiosos, escasos y finitos– de manera reponsable y eficiente con una baja emisión de gases de efecto invernadero. Este nuevo modelo es conocido hoy a nivel mundial como "economía circular".

FIGURA/17
Diagrama economía circular



Fuente: Ellen MacArthur Foundation (2015)

Como su nombre lo indica, la economía circular, es un concepto económico sostenible, reparador y regenerativo, basado en tres pilares fundamentales: uso de energía renovable, eficiencia energética y uso eficiente de los recursos. El modelo circular plantea que la producción de bienes y servicios incluya el cierre del ciclo de vida de los mismos, reduciendo el consumo y el desecho de materias primas, agua y energía. Además, la economía circular procura extender el ciclo de vida de los productos ya que, como filosofía de diseño, facilita la reutilización y reciclaje de materiales y componentes, así como la remanufactura de productos y equipos.

En Chile, una faena minera genera entre 300 y 400 toneladas mensuales de desechos en materiales, entre componentes y equipos, que son generalmente vendidos o simplemente desechados como chatarra con un precio por kilo al mejor postor. Sin embargo, bajo un modelo de economía circular, la reutilización de materiales y la remanufactura de productos podría significar, para las empresas proveedoras, una disminución del consumo energético de hasta 60%, una reducción de emisiones de CO₂ de hasta 70% y una disminución de sus desechos de hasta 75%. En la actualidad, ya existen empresas chilenas proveedoras de la minería que ofrecen un catálogo en que hasta 60% de los productos han sido fabricados y remanufacturados con materiales totalmente reciclados. Muchas han sido reconocidas internacionalmente por ser pioneras en la implementación del modelo de economía circular a nivel mundial.

RECUADRO 7: NEPTUNO PUMPS EN THE GUARDIAN: 10 NEGOCIOS DE ECONOMÍA CIRCULAR EN LA MIRA DE DAVOS

Esta empresa manufacturera chilena produce el 60% de sus bombas con materiales reutilizados y reciclados. Esto incluye bombas remanufacturadas, donde casi todas sus partes son reutilizadas o recicladas. El cliente de Neptuno recibe una bomba un 30% más barata, que igual incluye un año de garantía. Neptuno Pumps esta instalada en el desierto de Atacama, uno de los lugares más secos de la tierra y el corazón de la industria minera de billones de dólares de Chile, un gran consumidor de los escasos recursos hídricos del país. A través de su diseño, Neptuno asegura que sus bombas pueden ayudar a las compañías mineras a reciclar hasta un 70% del agua que utilizan, lo que reduce su consumo de energía en hasta un 30%.

Fuente: The Guardian, (Flynn 2016)



La irrupción de nuevas tecnologías como la impresión 3D e *Internet of Things (IoT)*, están acelerando la transición hacia una economía circular basada en capacidades locales de diseño y manufactura, que se ajustan a la medida de las necesidades de cada cliente. Al mismo tiempo, la minería no ha estado ajena a los nuevos modelos de negocio basados en el concepto de *Sharing Economy* o economía colaborativa que han impactado transversalmente a todas las industrias, transformando los modelos de negocio convencionales -basados en la venta de productos y servicios post-venta- en nuevos modelos de *Product-as-a-Service (Paas)* o producto como servicio. En este modelo, el usuario no debe comprar los productos, dejando la responsabilidad de disponibilidad, confiabilidad y eficiencia al proveedor. El fabricante del producto es su dueño y, por lo tanto, puede disponer del mismo a través del diseño, uso, mantención, reutilización, reciclaje y remanufactura durante todo el ciclo de vida, ofreciéndole al usuario final un servicio a cambio de una tarifa periódica. Así, el fabricante queda a cargo de la reducción de consumo en el energía, uso de materias primas y desecho. Esto permite tener acceso a productos sustentables y de mejor calidad.

El *cluster* minero en Chile reúne condiciones favorables para la implementación del modelo de economía circular y el desarrollo de soluciones innovadoras que permitan una mejora en la productividad, el uso eficiente de los recursos – energía, agua y materias primas- y la reducción de las emisiones de CO₂, tanto directas como indirectas, de las operaciones mineras. Además, la introducción de la economía circular puede

actualizar y dar un nuevo impulso a iniciativas que han tenido resultados de alto impacto en el círculo virtuoso minera-proveedor, como el Programa de Proveedores de Clase Mundial (PPCM) de BHP Billiton y Codelco, así como crear nuevas agendas público-privadas que busquen emular experiencias exitosas –como el caso de Australia- de desarrollo de la industria de METS (*mining equipment, technology and services*).

En los últimos años, empresas de industrias tan diversas como Google, Unilever, Ikea, Coca-Cola, HP, Philips y Caterpillar han adoptado medidas para transitar hacia una economía circular, siendo apoyadas por instituciones privadas reconocidas a nivel global como Ellen MacArthur Foundation y el World Economic Forum. A nivel gubernamental, el mensaje ha ido escalando hasta instancias como la Comisión Europea que en diciembre de 2015 adoptó un ambicioso e histórico paquete de medidas sobre economía circular que aseguró inversiones de 650 millones de euros para investigación e innovación, así como también 5.500 millones de euros, con cargo a fondos estructurales, para procesos regenerativos y de mejora de la gestión de residuos. Con estas medidas se anticipa un crecimiento del PIB de 1%, lo que crearía más de dos millones de empleos.

Chile y su industria minera no pueden quedar fuera de este proceso ya que no solo representa una oportunidad para impulsar la competitividad de las empresas, crear empleo y utilizar recursos de modo más sostenible, sino que se trata de una herramienta efectiva para reducir su huella de carbono y combatir el cambio climático.

CAMBIOS NORMATIVOS Y NUEVOS USOS DEL COBRE

Generalmente se entiende la gestión sustentable en el ámbito minero como la gestión sustentable del proceso de producción y sus impactos asociados, ya sea sobre el medio ambiente, la salud humana o las comunidades relacionadas. Sin embargo, en estas últimas décadas las tendencias normativas y de opinión pública han abierto un nuevo frente para la industria que va más allá de las fronteras de las operaciones productivas y que involucra todo aquello que ocurre con el producto una vez que éste deja la planta.

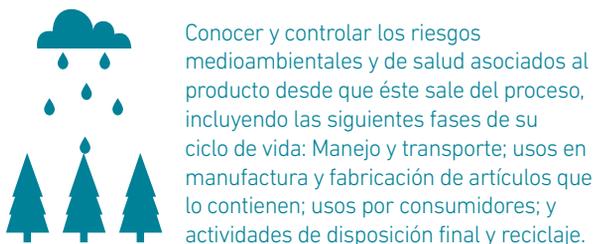
En el presente contexto, entendemos la gestión sustentable de un producto como una gestión que permite:

- Conocer y controlar los riesgos medioambientales y de salud asociados al producto desde que éste sale del proceso, incluyendo las siguientes fases de su ciclo de vida: manejo y transporte; usos en manufactura y fabricación de artículos que lo contienen; usos por consumidores; y actividades de disposición final y reciclaje.
- Promover normativas, regulaciones y estándares que aseguren un uso sustentable y seguro del producto y sus derivados, pero que al mismo tiempo no entrapen su comercialización y acceso a mercados.
- Promover el desarrollo de usos innovadores del producto y sus derivados que contribuyan a la sustentabilidad (por ejemplo, mejorando la eficiencia energética de procesos, reduciendo su huella ambiental, contribuyendo a la calidad de vida del ser humano, etc.)
- Monitorear y anticipar tendencias sustitutivas que afecten a la cartera de productos comerciales de la minería.

La redacción de esta sección estuvo a cargo de la Gerencia de Planificación Comercial y Desarrollo de Mercados de Codelco, coordinado por Víctor Pérez Vallejos.

FIGURA/18

Las cuatro dimensiones de la gestión sustentable de un producto



Promover el desarrollo de usos innovadores del producto y sus derivados que contribuyan a la sustentabilidad (por ejemplo mejorando la eficiencia energética de procesos, reduciendo su huella ambiental, contribuyendo a la calidad de vida del ser humano, etc.).



Promover normativas, estándares y regulaciones que aseguren un uso sustentable y seguro del producto y sus derivados, pero que al mismo tiempo no entran en su comercialización y acceso a mercados.



Monitorear y anticipar tendencias sustitutas que afecten a la cartera de productos comerciales de la minería.

Fuente: elaboración propia

El enfoque de gestión sustentable del producto implica, entre otras cosas, que la industria minera destine esfuerzos y recursos a un área de la cadena del negocio que hasta ahora ha tendido a ignorar: el uso final de las materias primas que produce. Es evidente que si uno de esos usos es sujeto de una restricción normativa, o de acusaciones en los medios de comunicación social por presuntos riesgos para la salud o el medio ambiente, el efecto económico puede llegar a ser tanto o más grave que una interrupción en la producción o una caída de la ley mineral o del precio.

Desde hace algunos años, a nivel internacional, la industria minera se ha visto enfrentada a la necesidad de abordar este aspecto de su negocio con creciente urgencia, a menudo sin estar plenamente capacitada para lidiar exitosamente con desarrollos normativos, o de percepción, que amenazan con limitar el acceso a los mercados de sus productos, o sus derivados, o vulnerar su competitividad frente a productos competitivos que pueden sustituirlos, no en base a criterios de costo sino de sustentabilidad, ya sea aparentes o reales.

Un ejemplo temprano de esto se dio a fines de los años 80, cuando a nivel de la Organización Mundial de la Salud se impulsaron gestiones para caracterizar al cobre como un elemento de alto riesgo para la salud humana, las que de haber tenido éxito habrían hecho inviable el mercado de cañerías de cobre para conducción de agua potable. En dicho caso, una alianza virtuosa entre entidades del gobierno de Chile, científicos nacionales y extranjeros y las asociaciones gremiales de la industria lograron conculcar la amenaza. No obstante, en el desarrollo de ese esfuerzo se pudo percibir algunas debilidades del sector para enfrentar este tipo de desarrollos:

- Escasa capacidad profesional al interior de la industria para abordar temáticas asociadas a la evaluación del riesgo medioambiental de los metales.
- Pobrísimo conocimiento de la literatura científica relevante así como de los criterios y mecanismos que subyacen a la toma de decisiones normativas en el ámbito del riesgo de las sustancias químicas.
- Escaso conocimiento de las instancias y vías apropiadas para actuar ante organismos normativos internacionales.

El caso de las cañerías de cobre fue un evento relativamente simple comparado con los escenarios que hoy comienza a enfrentar la industria minera. La opinión experta indica que estos escenarios sólo se harán más complejos y extensos en el futuro, abarcando desde las características físico-químicas intrínsecas de los productos hasta el impacto de su disposición final sobre el medio ambiente y seres humanos.

DESAFÍOS DE UN ESCENARIO NORMATIVO COMPLEJO

El acceso a los mercados internacionales es y será un tema crítico para la viabilidad de la actividad minera nacional. En este ámbito, la industria enfrenta hoy una muy diversa gama de desafíos normativos relacionados con la composición química de los mismos y los peligros o riesgos que ésta puede representar para la salud humana y el medio ambiente. Algunos ejemplos de escenarios regulatorios de este tipo son:

- Sistema Globalmente Armonizado de Clasificación y Etiquetado de Peligro de Sustancias Químicas de las Naciones Unidas (GHS).

- Directiva de Clasificación y Etiquetado de Peligro de Sustancias de la Unión Europea.
- Códigos y Convenciones Internacionales de Transporte Marítimo de la Organización Marítima Internacional.
- Sistema de Registro Evaluación y Autorización de Sustancias Químicas (REACH; Unión Europea, Corea de Sur).
- Convención de Basilea.
- Directiva de Productos Biocidas de la Unión Europea.
- Esquema de Declaración Ambiental de Productos (Unión Europea).
- Criterios de calidad de agua para metales a niveles regionales y nacionales (EEUU, Unión Europea, Chile, etc.)
- Directiva ROHS (Restricción de Sustancias Peligrosas en materiales eléctricos y electrónicos).
- Indicadores de Impacto de Ciclo de Vida de materiales, utilizados por autoridades regionales o nacionales en la adjudicación de proyectos financiados con fondos públicos.

Algunas disposiciones de estas normativas y esquemas están teniendo impacto sobre la factibilidad y costos asociados a la importación de determinados productos a mercados de Europa, Asia y Norteamérica. Por ejemplo, la reciente enmienda del Anexo V del Convenio Internacional para prevenir la contaminación por los buques (Marpol) obliga a los buques que transportan materiales a granel que sean considerados como perjudiciales para el medio ambiente marino a tratar las aguas residuales del lavado de bodegas en "instalaciones apropiadas" (que no existen en casi ningún puerto del mundo) prohibiendo que se descarguen al mar, todo esto con cargo de costos al expedidor. La determinación de

si un material es o no perjudicial para el medio ambiente marino se hace en base a criterios altamente técnicos establecidos por el Sistema Globalmente Armonizado de las Naciones Unidas.

Muchas de estas normativas internacionales aplicables a los productos de la minería no sólo exigen el registro, la evaluación de las características de peligrosidad y riesgo de sustancias, el etiquetado y desarrollo de nuevas formas de Hojas de Seguridad, la aplicación de prácticas seguras de manejo, transporte y uso de productos. También establecen criterios bajo los cuales se puede prohibir el transporte (por mar y tierra) o hasta el ingreso de determinados materiales a países. Por ejemplo, la Directiva Reach (Registro, evaluación, autorización y restricción de sustancias químicas), de la Unión Europea incluye mecanismos para establecer restricciones temporales o directamente la prohibición definitiva de importación o manufactura de determinadas sustancias en base a los riesgos que se estima implican para la salud o el medio ambiente. El peso de demostrar, bajo estrictos criterios científicos y técnicos, lo contrario cae naturalmente sobre el importador o fabricante.

UNA BRECHA DE CAPACIDADES PROFESIONALES Y TÉCNICAS

La aplicación de dichas normativas está exigiendo niveles cada vez más altos de capacidad técnica y científica en la evaluación de los peligros y riesgos químicos, toxicológicos y ecotoxicológicos de los productos. Estos niveles son particularmente sofisticados para productos con composiciones químicas complejas, heterogéneas y variables, como es el caso de muchos productos de la minería metálica (por ejemplo, concentrados minerales). El cumplimiento de estos exigentes estándares de calidad de datos

es crítico tanto para cumplir con las normativas que regulan la importación, manejo, almacenamiento y transporte de sustancias, como para hacer valer ante las autoridades los criterios de clasificación que la industria considera apropiados e impedir enfoques precautorios de clasificación y restricción.

Actualmente Chile no cuenta con una capacidad técnica a la altura de este desafío y, típicamente, las empresas envían sus muestras a laboratorios de países desarrollados, los que a menudo (a raíz de la proliferación de estas normativas) se encuentran copados en su capacidad. En otros casos, los requerimientos específicos asociados a la caracterización de algunos productos no son parte de la batería estándar de análisis disponibles en el mercado. Un ejemplo ilustrativo es el Protocolo de Disolución y Transformación de Metales establecido por el Sistema Globalmente Armonizado para evaluar la toxicidad acuática de metales y compuestos metálicos poco solubles: Actualmente sólo existen tres laboratorios en el mundo capacitados para realizarlo en forma confiable (uno de ellos lucha por sobrevivir en Chile, al amparo del Ministerio de Minería).

Esta falencia también tiene una dimensión de inteligencia analítica de normativas. Cada uno de los cuerpos normativos citados más arriba constituye un desafío de interpretación y adaptación a la realidad de cada tipo de producto, escenario de transporte y mercado de destino. La capacidad humana disponible en Chile para este tipo de tarea es escasa y en algunos casos simplemente inexistente. Como resultado, las empresas mineras que operan en los mercados desarrollados a menudo quedan a merced de los servicios de terceros (por ejemplo las asociaciones industriales en Europa o EE.UU.)

cuyos intereses no son necesariamente los de la industria minera nacional. Con frecuencia dichas asociaciones tampoco cuentan con capacidad especializada en dichos temas.

Estas vulnerabilidades se multiplican debido a la escasa capacidad del aparato estatal chileno para participar efectivamente y a tiempo en las instancias internacionales en que se generan muchos de estos desarrollos normativos o estándares (Diálogo Químico de APEC, Organización Marítima Internacional, OECD, Naciones Unidas). La generación de recursos humanos capacitados y de fondos para financiar dichas participaciones resultan fundamentales para que Chile tenga presencia en la multiplicidad de comités técnicos donde se adoptan decisiones que terminan impactando la comercialización o el acceso a mercado de productos que sustentan el desarrollo económico del país.

El desafío entonces para asegurar el futuro del negocio minero nacional es desarrollar las capacidades humanas y de equipamiento que permitan a las empresas nacionales enfrentar con solvencia las exigencias y amenazas normativas que se vienen, asegurando así el acceso a los mercados de sus productos y la sustentabilidad del negocio minero.

INNOVACIÓN Y PROMOCIÓN DE USOS SUSTENTABLES DEL COBRE

Un mejor conocimiento de las propiedades de un elemento y de sus efectos en el medio ambiente o al interior de un organismo vivo definitivamente abre la puerta a nuevos usos del mismo que, a la vez que expanden sus potenciales mercados, pueden hacer una contribución a la sustentabilidad del quehacer humano.

Parte importante de los desafíos que hoy tiene la humanidad están relacionados con el calentamiento global, la eficiencia energética, la disponibilidad de agua y la alimentación de la gente, entre otros. En todas estas necesidades, los usos del cobre juegan y podrán seguir jugando un rol fundamental en la medida que se destinen recursos al desarrollo de nuevos usos en el tiempo y se potencie un ecosistema de innovación a nivel nacional con este foco.

Un ejemplo reciente de este potencial es la explosión de aplicaciones de alto valor agregado del cobre metálico y no metálico como material con actividad antimicrobiana. Su uso en hospitales, por ejemplo, tiene el potencial de reducir las infecciones hospitalarias, impactando positivamente los indicadores de salud y reduciendo el uso de antibióticos. Similarmente, hay sólida evidencia de que el uso de jaulas de aleaciones de cobre metálico en la acuicultura aumenta la productividad de la industria acuícola, amplía las fronteras de la industria al permitir cultivos en zonas marinas expuestas, reduce los impactos de esta actividad sobre los ecosistemas aledaños y reduce la huella de carbono del producto.

Junto a lo anterior, y mientras la tecnología y la sociedad sigan avanzando, el nacimiento de nuevos sustitutos y otras amenazas siempre estará latente. En todos los sectores donde el cobre está presente en términos de consumo existen materiales alternativos que le compiten y buscan su sustitución. Por este motivo, resulta fundamental para el país y para la industria del cobre desarrollar capacidades de innovación tecnológica asociadas a las propiedades del cobre, a través de investigaciones, emprendimientos y modelos de negocios que permitan potenciar los

usos del cobre y reforzar su competitividad en el tiempo ante sus competidores a través de un modelo de innovación abierta que se articule a nivel nacional con una visión de impacto global.

Es necesario desarrollar los mercados existentes y potenciar los mercados emergentes para mantener la vigencia del cobre como material, aprovechando y potenciando todas las capacidades que Chile ha generado y pueda seguir generando. Nuestro país y su economía depende del mercado del cobre, y por este motivo es importante que su demanda se sostenga en fundamentos firmes en el tiempo.

Concretamente, los mayores desafíos de la industria se pueden resumir en los siguientes siete puntos: reducir los costos de procesamiento, maximizar su valor agregado, incrementar su valor competitivo contra otros materiales, resistir a cambios de regulaciones y estándares, asegurar el buen rendimiento de productos hechos de cobre, aumentar el uso de materiales complementarios, y diseñar los productos para que sean reciclables y recuperables.

El desarrollo de los mercados debe ser considerado como un proceso permanente en el tiempo, el cual debe articular ecosistemas de innovación transversales de manera de integrar ciencia, emprendimiento y financiamiento antes de que el peligro de la sustitución tenga impactos irreversibles para Chile.

Como ya vimos anteriormente, existen muchas oportunidades para innovar, crecer, y mostrar todas las potencialidades asociadas a las propiedades del metal rojo, como un material sustentable que puede traer enormes beneficios a la sociedad. Aprovechar estas

oportunidades puede marcar la diferencia, no solo en la industria del cobre, sino que además en el proceso de desarrollo y crecimiento económico de todos los chilenos.

La búsqueda de aplicaciones innovadoras que pueden ser intensivas o no en términos de toneladas de cobre, deben estar siempre vinculadas al alto valor agregado que entrega como beneficio a la sociedad y los desafíos del mundo moderno.

El desarrollo de nuevos usos del cobre requiere de ecosistemas de innovación que estimulen el pensamiento innovador y hagan posible la investigación especializada y el emprendimiento, aspectos fundamentales para cerrar las brechas existentes entre los desafíos tecnológicos y la llegada de productos a los mercados.

Esto, una vez más, exige que la industria minera, los centros de investigación, los emprendedores y los instrumentos de fomento consideren la sustentabilidad no sólo en el ámbito de sus procesos de producción y su relación con el entorno, sino también en el ámbito mucho más amplio de los usos finales y cómo éstos contribuyen a la sustentabilidad del planeta.

Hasta ahora la minería chilena ha depositado la responsabilidad de estos desafíos en las asociaciones gremiales internacionales de la industria. Aunque es claro que éstas han hecho una contribución muy valiosa, es indudable que los intereses de dichas agrupaciones distan mucho de los intereses de Chile, país cuyo presente y futuro parece estar indisolublemente ligados a sus riquezas minerales y a las oportunidades que nos ofrecen en toda su cadena de valor.



Fotografía Codelco (Mina Rajo y Planta Lixiviación, Salvador)

05

NÚCLEOS
TRACCIONANTES

Hacen referencia
a todos aquellos
ámbitos que, en el
corazón del proceso
minero, constituyen los
desafíos tecnológicos
más cruciales
para la evolución
de la industria

NÚCLEO RELAVES ANTECEDENTES

La minería del cobre extrae grandes cantidades de material, del cual sólo una pequeña fracción corresponde al elemento de interés económico que se desea recuperar. Una vez que este material ha sido procesado y se ha extraído el cobre y otros elementos de valor, se generan residuos (compuestos por material molido y agua con reactivos) que son denominados relaves.

Los relaves son transportados a través de canaletas hasta lugares especialmente habilitados para su depósito, denominados embalses o tranques de relaves dependiendo del método utilizado para la construcción del muro de contención (el muro de contención de un embalse de relaves está construido con material de empréstito y se encuentra impermeabilizado en el coronamiento y en su talud interno. Por su parte, el muro de contención de un tranque de relaves está construido con la fracción más gruesa del relave). En la cubeta los sólidos finos sedimentan y en la superficie se forma una laguna de aguas claras (Servicio Nacional de Geología y Minería [Sernageomin], 2013).

El capítulo Núcleos Traccionantes de la Hoja de Ruta de la Minería fue desarrollado en base al trabajo realizado por Enrique Molina, Director de Innovación en Minería de Fundación Chile, quién identificó los desafíos del sector y estructuró los núcleos traccionantes.

.....

La sección Núcleo Relaves fue elaborada en base al trabajo realizado por la Mesa Técnica del núcleo, la que estuvo compuesta por: Angela Oblasser, Antonio Videka, Carmen Gloria Dueñas, Carolina Soto, Constantino Suazo, Cristian Cifuentes, Enrique Román, Felipe Mujica, Gerard Van Lookeren, Grecia Pérez de Arce, Gullibert Novoa, Gustavo Tapia, Hernán Cifuentes, Jacques Wiertz, Juan Carlos Alarcón, Juanita Galaz, Julio Echevarría, Luis Felipe Mujica, Juan Rayo, Marcelo Capone, Miguel Herrera, Patricio Renner, Raúl Espinace, Rodolfo Camacho, Ronald Álvarez, Rosana Brantes, Sebastian Valerio, Sergio Barrera, Timothy Gardner, Ulrike Broschek y Waldo Vivallo.

La redacción de esta sección estuvo a cargo del equipo de Fundación Chile, compuesto por: Francisco Klima, Tomás González, Enrique Molina, Phillip Wood, Cristóbal Arteaga, Manuel Arre, Nicole Valdebenito y Hernán Araneda.

.....

FIGURA/19
Composición de un
tranque de relaves



Fuente: Sernageomin (2013)

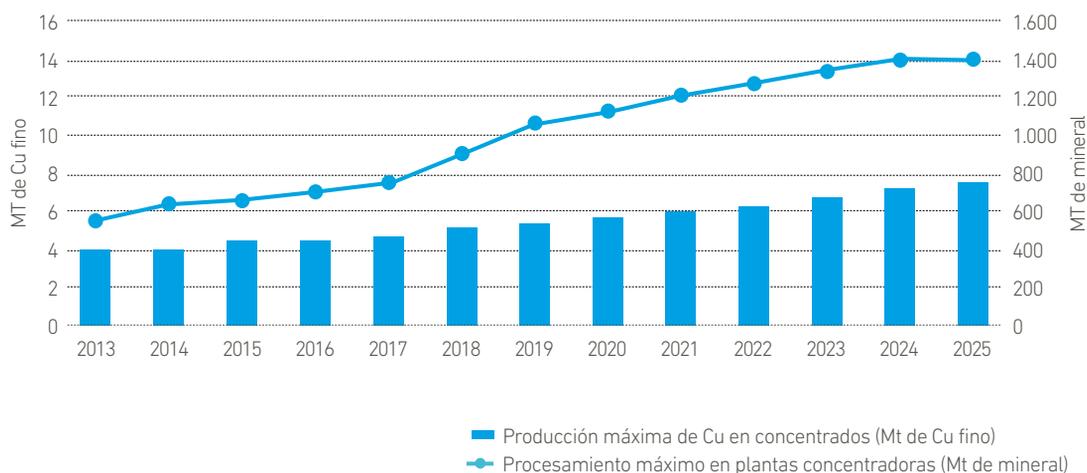
Debido a la disminución de las leyes de mineral de los yacimientos actualmente en explotación y de los que forman parte de los proyectos de desarrollo de las compañías mineras, éstas deberán aumentar sus esfuerzos para extraer cada vez mayores tonelajes de material para mantener sus niveles de producción o para crecer según la demanda de mercado, lo que significará un aumento proporcional de la cantidad de desechos que deben ser dispuestos, ya sea como material estéril o en la forma de relaves.

Se estima que la producción de relaves podría casi duplicarse al año 2035: si hoy cada 36 horas se depositan en Chile relaves

equivalentes a un cerro Santa Lucía, dentro de 20 años lo haremos sólo en 21 horas. El siguiente gráfico representa una proyección al 2025 de la relación entre mineral tratado y cobre fino contenido en el concentrado producido. Frente a una tasa anual de crecimiento del 5,7% en cobre fino contenido en concentrado, la tasa de crecimiento del tratamiento de mineral sería de 8% anual, aumentando desde 549 millones de toneladas de mineral tratado en 2013 a 1.389 millones de toneladas en 2025 (Cochilco, 2014d). Es decir, la minería chilena deberá extraer, transportar y procesar cada vez más material, lo cual trae consigo un impacto directo en la generación de relaves.

GRÁFICO/30

Relación entre mineral tratado y cobre fino contenido en el concentrado producido



Fuente: Cochilco (2014d)

Este escenario plantea un enorme desafío a la industria minera chilena. Los relaves constituyen hoy una importante fuente de conflicto entre compañías y comunidades. Un 47% de la producción de relaves en el país posee reclamos o algún tipo de conflicto con la población (JRI, 2015), lo cual se constituye en un desafío importante que se debe abordar con la participación de todos los actores (compañías mineras, comunidades y sector público) para avanzar en la materialización de la visión planteada en el presente documento.

Aún cuando en nuestro país no se han reportado mayores incidentes en el último tiempo, la experiencia internacional reciente ha demostrado que uno de los principales riesgos asociados a los tranques de relaves radica en la ruptura de las paredes de contención y la consecuente inundación de los terrenos adyacentes. Estos eventos pueden ocurrir como consecuencia de sucesos sísmicos o climatológicos extremos, y representan un riesgo importante para las comunidades aledañas.

TABLA/7

Incidentes recientes asociados a depósitos de relaves a nivel mundial.

FECHA	UBICACIÓN	COMPAÑÍA
21/NOV/2015	Hpakant, Kachin state, Myanmar	Sin información
5/NOV/2015	Germano mine, Bento Rodrigues, distrito de Mariana, Região Central, Minas Gerais, Brasil	Samarco Mineração S.A.
10/SEP/2014	Herculano mine, Itabirito, Região central, Minas Gerais, Brasil	Hercules Mineração Ltda.
7/AGO/2014	Buenavista del cobre mine, Cananea, Sonora, México	Southern Copper Corp.
4/AGO/2014	Mount Polley mine, near Likely, British Columbia, Canadá	Imperial Metals Corp
15/NOV/2013	Zageur Copper Molybdenum Combine, Kajaran Synuik Province, Armenia	Cronimet Mining AG
31/OCT/2013	Obed Mountain Coal Mine, northeast of Hinton, Alberta, Canadá	Sherrit International
17/DIC/2012	Former Gullbridge mine site, Newfoundland, Canadá	Sin información
4/NOV/2012	Sotkamo, Kainuu province, Finlandia	Talvivaara Mining Company PLC
21/JUL/2011	Mianyang City, Songpan Country, Sichuan Province, China	Xichun Minjiang Electrolytic Manganese Plant
4/OCT/2010	Kolontár, Hungría	MAL Magyar Aluminium
25/JUN/2010	Huancavelica, Perú	Unidad Minera Caudalosa Chica
29/AGO/2009	Karamken, Magadan región, Rusia	Karamken Minerals Processing Plant

continúa en la página siguiente

FECHA	UBICACIÓN	COMPAÑÍA
14/MAY/2009	Huayuan country, Xiangxi Autonomus Prefecture, Hunan province, China	-
22/DIC/2008	Kingston fossil plant, Harriman, Tennessee, EEUU	Tennessee Valley Authority
8/SEP/2008	Taoshi, Linfen City, Xiangfen county, Shanxi province, China	Tashan mining company
10/ENE/2007	Miraí, Minas Gerais, Brasil	Mineração Rio Pomba Cataguases Ltda
6/NOV/2006	Nchanga, Chingola, Zambia	plc (KCM) Konkola Copper Mines
30/ABR/2006	Miliang Zhen'an county, Shangluo, Shaanxi Province, China	Zhen'an county Gold Mining Co. Ltd
14/ABR/2005	Bangs Lake, Jackson Country, Mississippi, EEUU	Mississippi Phosphates Corp

Fuente: *World Information Service on Energy* (2016)

Por su parte, las infiltraciones de depósitos de relaves, activos e inactivos, han adquirido importancia en las evaluaciones de impacto ambiental. Éstas representan un desafío de largo plazo para las operaciones mineras, ya que pueden generar impactos ambientales incluso muchos años después de haber sido depositado el relave. Un deficiente control y mitigación de las infiltraciones puede ocasionar efectos nocivos sobre la salud y calidad de vida de la población, contaminación de cuerpos de agua y suelos, e impactos negativos en otras actividades económicas como la agricultura y ganadería.

Otro aspecto relevante a destacar refiere al cierre irregular de los tranques de relaves,

lo cual conlleva riesgos de contaminación de cuencas acuíferas, ríos, lagos, bordes costeros por efectos de la infiltración, riesgo de colapso de las instalaciones, emisión de material particulado, alteraciones estéticas y paisajísticas, generación de drenaje ácido, entre otros.

Por último, resulta necesario considerar la creciente escasez de agua y superficie, aspecto particularmente crítico si se considera el aumento de relaves proyectado. De hecho, a futuro se espera que una parte importante de la producción minera se realice en la zona central, donde existe una mayor densidad poblacional y, por ende, mayor competencia por el uso del suelo y del recurso hídrico.

FIGURA/20 Recursos futuros mineros Zona Central

En la zona central de Chile, considerada desde la IV a la VI región, se encuentran actualmente sobre el 50% de los futuros recursos de cobre del país.

● Operaciones



Fuente: Iniciativa Scenario Planning (2014)

Frente a esta realidad, el Estado ha definido una institucionalidad y adoptado una serie de normativas que buscan regular esta actividad, en especial los riesgos asociados a la gestión de relaves. Las principales normativas que regulan los depósitos de residuos mineros son:

- El DS 248, que regula el diseño, construcción, operación y cierre los depósitos de relaves.
- DS 132 Reglamento de Seguridad Minera, que establece el marco regulatorio general al que deben someterse las faenas de la Industria Extractiva Minera Nacional.
- Ley 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Ley orgánica de la Superintendencia del Medio Ambiente.
- Ley 20.819 que modifica la ley 20.551 que regula el cierre de faenas e instalaciones mineras e introduce otras modificaciones legales, promulgada a principios del 2015.
- Ley 3.525, Ley Orgánica del Sernageomin.

A pesar de que se han realizado avances desde el marco regulatorio para proteger a las personas y

el medio ambiente, aún existen temas pendientes que deberán abordarse en conjunto con la autoridad, como es el caso de las infiltraciones.

El incremento esperado de la producción, sumado a la escasez de superficie para los depósitos y el cuestionamiento por parte de la comunidad, sugieren revisar los procedimientos actuales de depositación, evaluar la metodología de diseño de nuevos depósitos y buscar alternativas para mitigar el impacto que pueden generar aquellos tranques que actualmente se encuentran en operación.

CATASTRO DE LOS DEPÓSITOS DE RELAVES EN CHILE

Sernageomin actualiza periódicamente un catastro de los depósitos de relaves existentes en el país. De acuerdo a dicha información, al año 2015 existen 718 depósitos a lo largo del país, de los cuales 119 están activos, 443 no activos, 124 abandonados y 32 sin información. La siguiente figura muestra el estado de los depósitos catastrados y su distribución en las distintas regiones del país.

FIGURA/21
 Estado de depósito de
 relaves en Chile según región



Fuente: Sernageomin (2015)

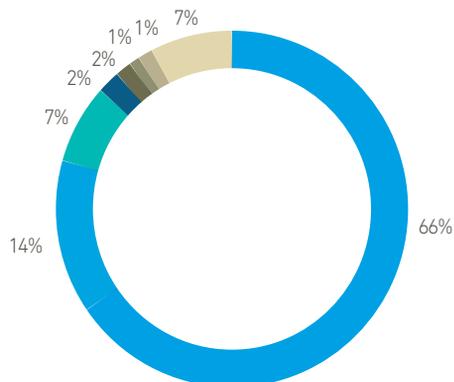
El catastro establece la existencia de 124 depósitos clasificados como abandonados, condición bajo la cual se clasifican a todos aquellos depósitos que no tienen dueño conocido ni resolución de origen, o bien si se tiene información oficial o fidedigna que indique que no se efectuó ninguna medida de cierre. Esta situación obliga al Estado a hacerse cargo de evaluar el nivel de riesgo estructural y de infiltraciones de aguas contaminadas, su medio de captura y neutralización.

Por otro lado, las regiones III y IV son las que concentran un mayor número de depósitos activos, con 37 y 36 respectivamente. Muy por debajo le siguen las regiones V y II, con 20 y 12 depósitos, respectivamente.

Del total de depósitos activos, 63 corresponden a relaves de la minería de cobre. No obstante, si se considera a aquellos depósitos cuyo mineral de origen incluye cobre y además otro mineral, esta cifra aumenta a 87 depósitos.

GRÁFICO/31

Tranques de relave según metal de beneficio



Fuente: Sernageomin (2015)

Las principales operaciones mineras generadoras de relaves son aquellas que componen el grupo de la gran minería. El resto del aporte en la producción de relaves proviene de la mediana y pequeña minería. Codelco es el principal productor con 28% de los relaves producidos en total en el país. Le siguen la empresa Antofagasta Minerals (AMSA) con 16% y BHP Billiton con 13% (JRI, 2015).

La producción actual de relaves mineros se concentra principalmente en la zona norte con 62% del total. En la zona centro se produce un 37% de los relaves mineros, mientras que en la zona sur la producción de relaves es prácticamente nula (1%).

Las principales operaciones mineras, generadoras de relaves, ubicadas en el norte de Chile, corresponden a Escondida, Chuquicamata, Collahuasi, Cacerones, Centinela, Candelaria, Ministro Hales y Salvador. En cuanto al centro de Chile, las principales faenas productoras de relaves son Los Pelambres, El Teniente, Andina, Los Bronces y El Soldado.

Los depósitos de relaves de mayor tamaño y operativos en Chile corresponden a El Mauro de Minera Los Pelambres, Las Tórtolas de Los Bronces, Talabre de Chuquicamata y Ministro Hales, Pampa Pabellón de Collahuasi y Ovejería de Andina, Carén de El Teniente y Laguna Seca de Escondida.

VISIÓN DEL NÚCLEO

"Alcanzar un liderazgo tecnológico mundial que, aplicado al diseño, operación y cierre ambiental en el manejo de relaves, facilite la obtención de la licencia social para operar y asegure el desarrollo de la industria minera".

DESAFÍOS, SOLUCIONES Y LÍNEAS DE I+D

En función de los antecedentes evaluados y de la visión establecida para el *Núcleo Relaves*, el grupo de expertos que participó en los talleres técnicos definió cuatro desafíos. Para cada uno de ellos se identificó posibles soluciones y líneas de I+D.

Desafío N°1: Enfrentar la creciente escasez de agua y superficie

La minería ha disminuido paulatinamente el consumo de agua gracias a tecnologías que han permitido la depositación de relaves espesados, en pasta y filtrados. Sin embargo, esto no ha sido aplicado transversalmente en la industria, pues se requieren condiciones adicionales para que este tipo de aplicaciones adquiera mayor escala. Más aún, junto con el intensivo consumo de agua de la línea de producción de concentrado de cobre a partir de minerales sulfurados, el paulatino agotamiento de los recursos oxidados y su remplazo por los primeros generará un aumento significativo en el consumo de agua por esta vía. El consumo neto actual de agua fresca en la minería del cobre se encuentra en torno a los 0,5 y 0,7 metros cúbicos por tonelada de mineral procesado, siendo la evaporación y retención de agua en los relaves las mayores razones detrás de dicho consumo.

Adicionalmente, dada la escasez de superficie y los conflictos que ello genera, se requiere del desarrollo de nuevos métodos y tecnologías que, en un futuro, permitan a la industria minera prescindir de la generación de relaves.

TABLA/8
Soluciones y líneas de I+D.
Desafío: enfrentar la creciente
escasez de agua y superficie

SOLUCIÓN	LÍNEA DE I+D+i
Separación sólido-líquido eficiente y de alta capacidad.	<p>Perfeccionamiento y desarrollo de método de separación sólido-líquido costo-eficientes y a gran escala para: filtrado, espesadores AD.</p> <p>Desarrollo de diferentes métodos de compactación para el aumento de la capacidad del depósito: electro-separación, agitación, parcelación, otros.</p> <p>Transporte de relaves: modificadores reológicos, otros.</p> <p>Perfeccionamiento/ conversión de métodos de depositación convencionales en nuevos métodos de depositación para tranques existentes.</p>
Minimizar la evaporación .	Perfeccionamiento y desarrollo de métodos operacionales, físicos, químicos o biológicos para reducir evaporaciones desde el depósito.
Recirculación del agua.	Desarrollo de nuevos sistemas de impulsión.
Gestión operacional óptima.	Desarrollo de tecnologías para facilitar: parcelación laguna central, otras.
Uso del agua de mar o agua de menor calidad en el proceso de flotación y su impacto en el transporte, tanto de agua como de relave, y en la gestión de los depósitos.	Efectos del agua de mar en la operación del depósito y su estabilidad en el corto, mediano y largo plazo.

continúa en la página siguiente

SOLUCIÓN	LÍNEA DE I+D+i
Procesos secos para la recuperación del mineral.	Desarrollo y perfeccionamiento de nuevos métodos o procesos secos para la recuperación de mineral
Predicción y monitoreo de la huella socio-ambiental de un depósito de relaves (tipo Mining Footprint).	Desarrollo y perfeccionamiento de nuevos métodos de predicción y monitoreo de la huella socio-ambiental de un depósito de relaves.
Manejo del recurso hídrico del depósito basado en su disponibilidad y uso a nivel cuenca.	Perfeccionamiento y desarrollo de métodos de manejo del recurso hídricos del depósito basado en su disponibilidad y uso a nivel cuenca.
Comparación de arenas y lamas.	Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías de compactación tales como electro-separación, agitación, parcelación, vibración, otros para aumentar la recuperación de agua desde el depósito y aumentar y la capacidad de éste.
Minería sin depósito de relaves.	Desarrollo de nuevos métodos que prescindan de depósitos de relaves.

Fuente: elaboración propia

Desafío N°2: Minimizar el impacto de las infiltraciones y asegurar la estabilidad de los depósitos

Las infiltraciones, y su impacto en el medioambiente y las personas, representan un desafío permanente para la operación de los depósitos y la sustentabilidad futura del negocio minero. En este sentido, se vuelve imprescindible desarrollar y perfeccionar tecnologías que permitan neutralizar los relaves antes de que sean depositados, caracterizar los sitios de depósito y sellarlos para impedir el contacto con aguas superficiales. Complementariamente, se requiere reforzar la legislación existente para que futuros depósitos sean diseñados y operados bajo el concepto de "cero descarga efectiva".

La estabilidad física de los depósitos se constituye en un aspecto central. Una revisión reciente de las fallas catastróficas ocurridas a nivel internacional en los grandes depósitos de relaves indica que los tipos de fallas corresponden a *overtopping* (erosión), inestabilidad de los muros e impacto de un gran sismo. Normalmente estas fallas ocurren por una combinación de causas, entre las que destacan mal diseño, construcción deficiente, operación con bajo control, bases de cálculo de eventos naturales erróneas, entre otras.

Por último, la estabilidad geoquímica de los depósitos normalmente está asociada a la posible generación de ácido debido a la reacción química del relave con el agua y el oxígeno de la atmósfera. Al respecto, se debe distinguir entre los depósitos abandonados, los que se encuentran en operación y aquellos futuros, para de esta manera generar estrategias de control y/o neutralización adecuadas a cada una de las situaciones mencionadas.

TABLA/9

Soluciones y líneas de I+D. Desafío:
minimizar el impacto de las infiltraciones
y asegurar la estabilidad de los depósitos

SOLUCIÓN	LÍNEAS DE I+D+i
Cero descarga a través de la captura y tratamiento de infiltraciones y aguas de contacto.	Perfeccionamiento y desarrollo de métodos pasivos, activos y combinados. Tecnologías para evitar la generación de infiltraciones post-cierre, incluyendo el manejo de las aguas superficiales y su interacción con el depósito, e impermeabilización (recubrimiento o sellado) de los depósitos.
Tratamiento y neutralización de relaves previo a su depositación.	Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías de bajo costo, simples, eficientes y escalables para el tratamiento (neutralización) de los relaves previo a su depositación (pirita, arsénico, otros).
Impermeabilización de futuros depósitos.	Desarrollo de tecnologías para la impermeabilización de la base de futuros depósitos como biosellado, polímeros, otros.
Localización y seguimiento de infiltraciones.	Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías de bajo costo para la localización y seguimiento de infiltraciones.
Nuevas técnicas de caracterización de sitios para depósitos.	Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías de bajo costo para la caracterización de sitios.
Control de material particulado.	Perfeccionamiento de tecnologías existentes tales como fitoestabilizadores, supresores, biomejoradores de suelo, coberturas granulares, biosellado y otras. Perfeccionamiento y desarrollo de modelos predictivos. Desarrollo de trazadores. Desarrollo nuevas tecnologías para el control.
Hermetización en la disposición de relaves	Perfeccionamiento y desarrollo de nuevas tecnologías para la Hermetización en la disposición de relaves.

Fuente: elaboración propia



Fotografía Codelco (Tranque relaves Los Leones, Andina)

Desafío N°3: Promover la conversión desde un pasivo a un activo

El concepto de Pasivo Ambiental (PAM) puede entenderse como aquellas faenas mineras, abandonadas o paralizadas, incluyendo sus residuos, que constituyen un riesgo significativo para la vida o salud de las personas o para el medio ambiente (Sernageomin, 2008), con lo cual los depósitos abandonados o paralizados se enmarcan en dicha definición.

La conversión de los depósitos de relaves en activos busca utilizar el relave o parte de éste como una fuente de valor. Aún cuando la recuperación de elementos con valor comercial constituye una contribución al respecto, no soluciona el problema por completo. Se requiere buscar usos alternativos que involucren una proporción importante del relave y no solo aquellos elementos como el cobre, oro, molibdeno, hierro u otros que podrían encontrarse presentes y ser sujetos a un reproceso. Una adecuada gestión de los pasivos ambientales beneficiaría directamente a las comunidades y contribuiría a la sostenibilidad futura de la industria minera.

TABLA/10
 Soluciones y líneas de I+D:
 promover la conversión desde
 un pasivo a un activo

SOLUCIÓN	LÍNEA DE I+D+i
Búsqueda de usos industriales de relaves.	Desarrollo de usos industriales para el relave.
	Impermeabilización y relleno de excavaciones mineras.
Recuperación de elementos valiosos.	Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías de bajo costo para caracterización del relave para la recuperación de elementos valiosos.
	Perfeccionamiento y desarrollo de técnicas de muestreo para lograr una alta recuperación.
	Marcha analítica: tierras raras, otros elementos de interés.
	Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías para la recuperación de elementos de interés.
Utilización de la superficie de depósitos para otros fines.	Fines industriales, recreativos.

Fuente: elaboración propia

Desafío N°4: Propiciar la inclusión y aceptación comunitaria

Como ya se ha mencionado, una importante proporción de los depósitos de relaves actualmente en funcionamiento presentan dificultades con las comunidades aledañas, lo que se traducen en reclamos a la autoridad y acciones legales interpuestas por la población.

La resolución de este desafío requiere como condición base que las comunidades puedan

contar con información clara y entendible respecto de los depósitos de relaves aledaños, aspecto que puede ser abordado desde el desarrollo de tecnologías especiales para ello. Complementariamente, se debe propiciar la generación de espacios de participación para involucrar a las comunidades y comunicar de manera efectiva los avances en el manejo y tratamiento de relaves.

TABLA/11

Soluciones y líneas de I+D.

Desafío: propiciar la inclusión y aceptación comunitaria

SOLUCIONES	LÍNEAS DE I+D+I
Captura y comunicación en tiempo real de variables críticas para el depósito y su entorno.	Definición de estándares seguros para la implementación de redes locales/operacionales.
	Desarrollo de interfaz comunicacional operador-comunidad-proceso.
	Perfeccionamiento y desarrollo de modelos fenomenológicos.
	Desarrollo de sensores para medición de variables críticas en línea.
Desarrollo de productos de valor compartido.	Generación de energía a partir del transporte de relaves.
	Aguas para diferentes usos en función de su calidad.

Fuente: elaboración propia



Fotografía Codeico (Mina Rajo Andina)

NÚCLEOS
RELAVES

4 DESAFÍOS

22 SOLUCIONES

37 LÍNEAS DE I+D

RECURSOS

INFRAESTRUCTURA

- Redes de fibras ópticas para telecomunicaciones

LEGAL INSTITUCIONAL

- Fomentar ecosistema I+D+i
- Política de Desarrollo de Personas
- Norma que se haga cargo de infiltraciones (fuentes no puntuales) y aguas de contacto
- Definiciones sobre pasivos existentes
- Fomento al reprocesamiento de relaves en operación

CAPACIDADES

- Recursos humanos especialistas para fiscalización de depósitos
- Recursos humanos especialistas para operación de depósitos
- Recursos humanos especialistas para I+D

PROVEEDORES

- Potenciar proveedores locales en instrumentación/representación

ALIANZAS

- Alianzas Proyectos FIE Codelco, AMSA y Enami
- Alianzas entre industrias y CFT formación de operadores
- Alianzas entre Centros de Investigación, Universidades Industrias / Estado / Proveedores.

INFOGRAFÍA/1

Vigilancia tecnológica
relaves (Patentes)

TOTAL DE PATENTES
PERIODO 2010-2015

70
PATENTES



PRINCIPALES
TENDENCIAS
TECNOLÓGICAS

- Destrucción o transformación de residuos sólidos
- Mezcladores de flujo
- Tratamiento de lodos
- Dispositivos para los mismos
- Tratamiento de aguas
- Naturaleza del contaminante

PATENTES MÁS CITADAS

Patente	Año	Citas
US8137566B2 <i>Recovery of tailings ponds</i>	2012	22
US8859090B2 <i>Micro-structured surface having tailored wetting properties</i>	2014	4
US7682582B2 <i>Simultaneous removal of H2S and SO2 from tail gases</i>	2010	4
KR101315807B1 <i>Production of Refuse Derived Fuel and Treatment of Biomass with zero discharge system Using Microbial Materials</i>	2013	3
CA2750934C <i>Parafinic froth treatment with tailings solvent recovery having internal flowrate inhibiting asphaltene mats</i>	2012	3
US8197676B2 <i>Method for tailings solvent recovery</i>	2012	3
FR2937257A1 <i>Methode of construction applicable aux adsorbours radiaux de grosse taille</i>	2010	2
US9068245B2 <i>Process for the recovery of gold from anode slimes</i>	2015	1
CN102267751B <i>Rapid precipitation and concentration tank for tailing sewage</i>	2013	1
EP1676478B1 <i>Slime remover and slime preventing/removing agent</i>	2011	1

PAÍSES CON MÁS PATENTES



- Canadá 19
- EE.UU. 18
- Alemania 13
- Japón 7
- Francia 7
- China 7
- Dinamarca 3
- Holanda 2
- Suiza 1
- Grecia 1



PRINCIPALES UNIVERSIDADES

Universidad de Freiberg
Universidad de Nankín

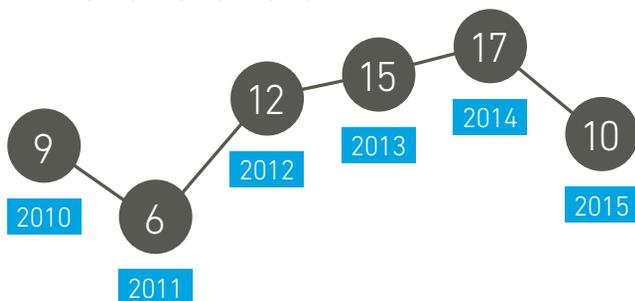
PRINCIPALES EMPRESAS Y/O CENTROS DE I+D

- Basf AG
- Suncor Energy INC
- Kurita Water IND LTD
- Smith & Co AS F L
- Changchun Gold Res INST
- Du Pont
- Fort Hills Energy LP
- Nippon Sodaco
- Total E&P Canada LTD.
- Chinanat Gold Group Corp Technology CT

INFOGRAFÍA/2

Vigilancia tecnológica
relaves (Publicaciones)

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS PERIODO 2010-2015



PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

69

PRINCIPALES TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN

Tendencia	N°
Ecología y ciencias ambientales	22
Ingeniería	14
Geología	9
Procesamiento de minerales	9
Agricultura	8
Geoquímica y geofísica	6
Ciencias de los materiales	6
Recursos hídricos	6
Biotechnología aplicada y microbiología	5
Química	5



PUBLICACIÓN MÁS CITADA

Hydraulic conductivity of
geosynthetic clay liners to
tailings impoundment solutions

Autores
Shackelford, Charles D
Sevick, Gerald W
Eykholt, Gerald R.

PRINCIPALES INSTITUCIONES DE INVESTIGACIÓN	Nº
Universidad de Vigo	8
Academia de Ciencias de China	7
Universidad de Arizona	7
Universidad de Chongqing	6
Universidad de Anhui	5
Universidad Sun Yat-sen	4
Departamento de Agricultura y Agroalimentación de Canadá	3
Universidad Técnica Federico Santa María	3
Universidad de Belgrado	3
AGH Universidad de Ciencia y Tecnología	2

PAÍSES CON PUBLICACIONES CIENTÍFICAS



NÚCLEO FUNDICIÓN Y REFINERÍA ANTECEDENTES

La fundición corresponde al tratamiento pirometalúrgico del concentrado de cobre. Tiene como objetivo separar el mineral de otras especies presentes en los concentrados, siendo el hierro y el azufre las más abundantes. Esto se logra mediante sucesivas etapas con las que se logra producir cobre blíster, ánodos de cobre o cobre RAF (Refino a Fuego). Dichos productos se diferencian de los cátodos de cobre al tener un mayor contenido de impurezas, las que pueden ser eliminadas en una etapa posterior conocida como Refinación Electrolítica.

La Refinación Electrolítica corresponde a un proceso electro-químico que busca “refinar” el cobre anódico obtenido en la fundición para producir cátodos de cobre de alta pureza, los que posteriormente son comercializados.

La fundición y refinación es considerada como un negocio de estrecho margen, donde los ingresos provienen principalmente de cargos por tratamiento y refinación (*Treatment Charges and Refining Charges*, TC/RC), ventas de ácido sulfúrico, factores de localización (ahorro de fletes o *Freight Allowance*), penalidades por calidad del concentrado y ánodos, y bonos por la recuperación de metales valiosos, siendo éstos mayoritariamente variables.

Por su parte, los costos más relevantes son aquellos asociados a energía

La sección Núcleo Fundición y Refinería fue elaborada en base al trabajo realizado por la Mesa Técnica del núcleo, la que estuvo compuesta por: Alejandro Dagnino, Andrés Secco, Antonio Luraschi, Benjamin Martinich, Carolina Águila, Cristián Martínez, Daniel Smith, Domingo Fuenzalida, Emilio Castillo, Enrique Roman, Fernando Hernández, Francisca Domínguez, Froilán Vergara, Gabriel Riveros, Gerardo Cifuentes, German Richter, Ignacio Moreno, Igor Wilkomirsky, Jonathan Castillo, Jorge Cantallopts, Jorge Zuñiga Aguirre, José Urrutia, Juan Carlos Torres, Leandro Voisin, Leonel Contreras, Luis Felipe Mujica, Manuel Cabrera, Marco Rosales, Orlando Rojas, Pedro Reyes, Rene Bustamante, Ricardo Bonifaz, Ricardo Parada, Roberto Parra, Rodrigo Abel, Victor Garay Lucero, Victor Paredes, Yanko Gonzalez.

Esta sección fue escrita gracias a la contribución de Cristóbal Arteaga, Enrique Molina, Francisco Klíma, Manuel Arre Philip Wood y Tomás González.

(principalmente eléctrica), mano de obra, mantenimiento e insumos, todos éstos con un alto componente fijo. Las fundiciones “cobran” a las empresas productoras de concentrado mediante algunos de los siguientes mecanismos (Parra, 2011):

- *Treatment Charges* (TC): Corresponde al costo de fundir el concentrado, lo cual es cobrado en base a las toneladas de concentrado a tratar.
- *Refining Charges* (RC): Cobro en base a las libras de cobre “refinadas”.
- *Price Sharing* (PS): Se utiliza en sustitución al TC y RC y corresponde a un porcentaje del precio de venta.
- *Price Participation* (PP): Corresponde al costo comercial que se paga/ cobra en complemento al TC y RC y equivale a un porcentaje de la venta del cobre fino cuando éste supera un valor base (normalmente 10%).

Los TC, son definidos principalmente de dos maneras:

1. Fijando el precio mediante contratos a largo plazo entre las fundiciones y las compañías productoras de concentrado, lo cual permite a las primeras asegurar el abastecimiento necesario para su operación. Esto ha impulsado a que fundiciones inviertan en el desarrollo y explotación de proyectos mineros, adquiriendo mayor control sobre el destino del concentrado producido.

2. Mediante cargas *spot*, donde los cobros por tratamiento y refinación se definen "carga a carga".

En la actualidad, China ha pasado a ser el actor principal en la producción de cobre en fundiciones, con más de 6 millones de toneladas de cobre fino anuales, seguido muy de lejos por Chile y Japón con aproximadamente 1,5 millones cada uno (Cochilco, 2015e), adquiriendo de este modo una posición predominante en la fijación de los cargos de tratamiento (TC).

Lo anterior es de particular relevancia si se considera que China es el principal país de destino del concentrado de cobre producido en Chile. Cerca de un tercio de las exportaciones tiene como destino dicho país, alcanzando las 887 mil toneladas de cobre fino (contenido)¹⁴ en 2014 (Cochilco, 2015f).

Se prevé que China alcanzará una participación cercana al 60% del mercado mundial de concentrados, lo que se traduciría en un todavía mayor poder para fijar las tarifas (TC/RC, penalidades, PP, otros), exponiendo a la industria minera chilena a un escenario de alto riesgo.

A todo lo anterior, se debe agregar que la futura producción chilena de cobre incrementará la tendencia a estar constituida mayoritariamente por concentrados, debido al agotamiento paulatino de los minerales oxidados de cobre. Esto impondrá grandes desafíos en materia de infraestructura para el transporte

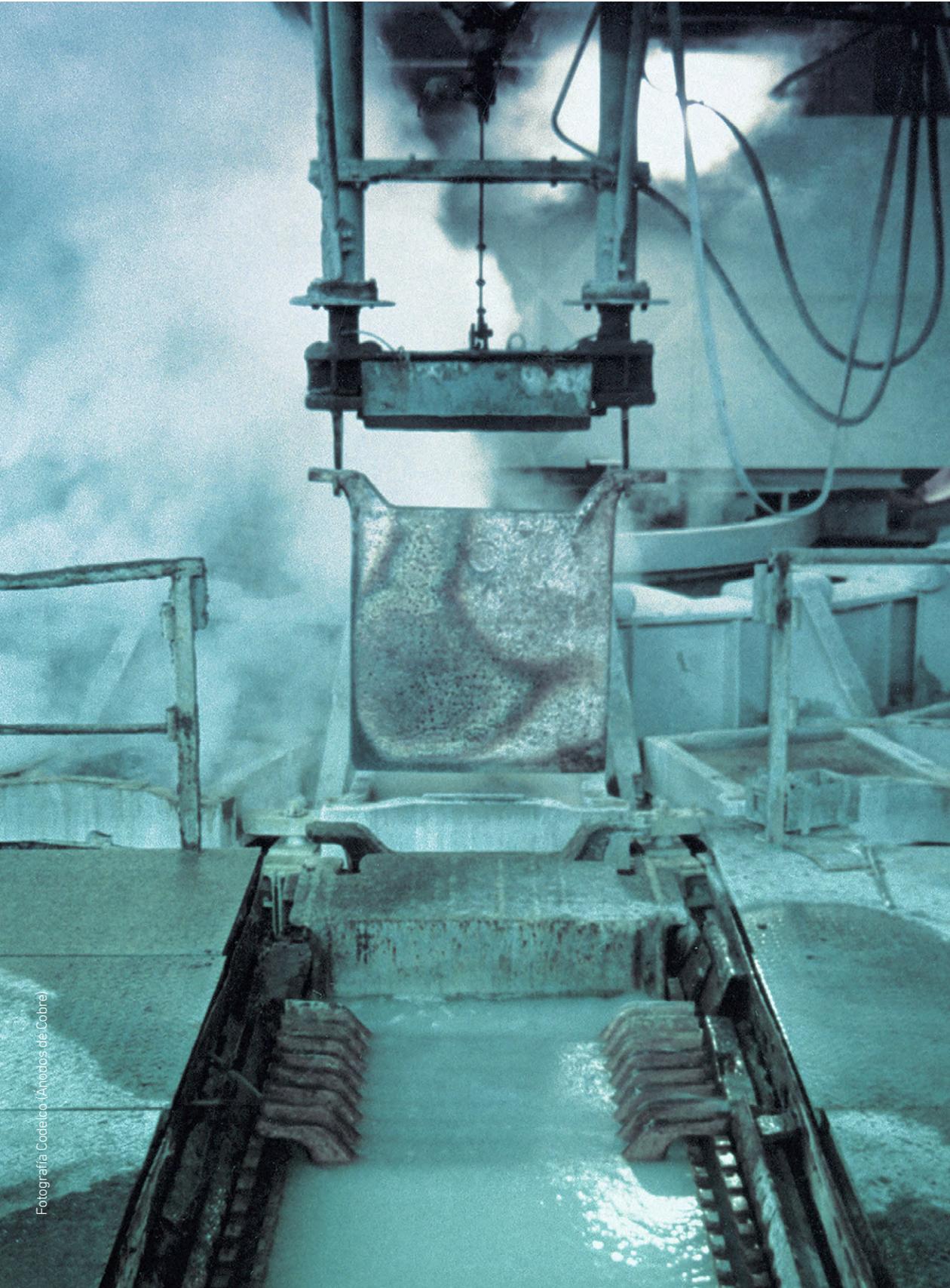
de este producto, constituido por una importante cantidad de ganga o material sin valor comercial (Cochilco, 2015d).

Al escenario descrito, donde se observa una concentración importante en el negocio de fundición y refinación, se agregan las dificultades que podría enfrentar el comercio de concentrado de cobre debido a las impurezas que éste contiene, pudiendo ser catalogados como sustancias peligrosas e incluso cancerígenas. Esto se traduciría en descuentos por lavado de barcos, adicionales a los de tratamiento. Eventualmente los concentrados "complejos", aquellos con alto contenido de arsénico y que constituyen una parte relevante de la futura producción chilena, podrían ser rechazados por las fundiciones, reduciéndose así las posibilidades para su comercialización.

Para nuestro país, que actualmente exporta 2,5 millones de toneladas de cobre en forma de cátodos (tanto refinados como electro-obtenidos) y 2,7 millones de toneladas contenidas en concentrados (Cochilco, 2015g), es fundamental anticipar los riesgos relacionados con los mercados de concentrados y, en base a ello, fortalecer su posición en el mercado de cátodos.

No obstante, la situación actual de las fundiciones y refinación chilenas enfrenta importantes desafíos que deben ser sorteados para favorecer el desarrollo de la industria minera nacional.

¹⁴ Corresponde a cobre fino contenido en graneles, dentro de cuales los concentrados de cobre constituyen casi el 100% de las exportaciones chilenas.



SITUACIÓN ACTUAL DE LAS FUNDICIONES Y REFINERÍAS EN CHILE

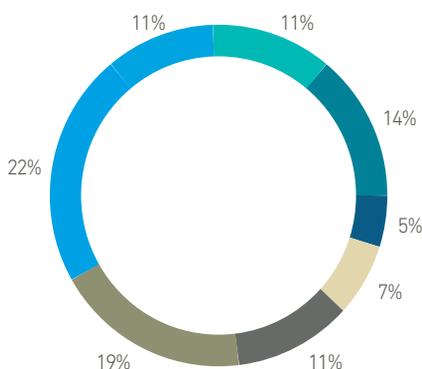
En Chile existen actualmente siete fundiciones de cobre: cinco estatales (Caletones, Potrerillos, Hernán Videla Lira, Chuquicamata y Ventanas) y dos privadas (Chagres y Altonorte). Emplean las tecnologías Flash (fusión en llamas), Convertidor Teniente (CT) y Convertidor Noranda (CN) (fusión en baño) para la fusión de concentrados, en ambos casos con convertidores Pierce Smith, situación que se

ha mantenido desde hace casi tres décadas atrás. La capacidad de fusión con tecnología Horno Flash de Fusión de Concentrados corresponde a un 25% de la capacidad nacional total (Horno Flash de Chuquicamata y fundición Chagres). El restante 75% de la capacidad de las fundiciones nacionales, incluyendo el CT de Chuquicamata, operan con tecnología CT o Noranda. Esto se detalla en el siguiente gráfico.

GRÁFICO/32 Capacidades y tecnologías fundiciones chilenas

Capacidad total de la 7 fundiciones Nacionales 6.470 KTPA concentrado.
Tecnología de fusión de las fundiciones nacionales 75% convertidor Teniente-Convertidor Noranda 25% horno Flash

- Caletones
- Altonorte
- Chuqui-Flash
- Chuqui-CT
- Potrerillos-CT
- Chagres- Flash
- Ventanas-CT
- Paipote-CT



Fuente: Amec Foster Wheeler (2015)

El desempeño de las fundiciones puede ser evaluado en función de los costos directos de operación, ingresos, nivel de captura y fijación de gases metalúrgicos. En todos ellos las fundiciones chilenas presentan una situación bastante desfavorable respecto de otros actores mundiales, lo cual se explica por sus bajos ingresos y altos costos, como los de mano de obra y de energía, en particular energía eléctrica. También inciden las bajas recuperaciones metalúrgicas, que reducen los ingresos por Bonus Metal. A lo anterior se agrega

la obsolescencia de las instalaciones y baja escala de las operaciones (en el caso de Potrerillos, Chagres, Paipote y Ventanas con niveles de fusión entre 340 y 720 ktpa de concentrado).

Al analizar el margen bruto¹⁵, las cifras indican que de las siete fundiciones, cuatro se encuentran en el último decil de la distribución global de competitividad del negocio, teniendo margen negativo. En el caso de las refinерías, la situación es aún peor, encontrándose todas ellas (3) con margen negativo.

¹⁵ El Margen Bruto es un parámetro económico que refleja en gran medida el nivel de competitividad de un negocio y se define como el Ingreso Total menos el Costo Neto de Caja. (excluye el factor de localización ya que no proviene de factores de eficiencia sino más bien de su ubicación particular).

TABLA/12
Margen Bruto Fundición

FUNDICIONES	COSTO DIRECTO	INGRESO TOTAL	MARGEN DE CAJA
	Promedio (c/lb Cu)	Promedio (c/lb Cu)	Promedio (c/lb Cu)
China	12,9	28,6	19,3
Mundo	23,5	27,0	12,2
Chile	39,9	22,3	-4,6

Fuente: Estudio "Estado del Arte y Visión de Futuro en fundición y Refinería", Programa Alta Ley, agosto 2015

TABLA/13
Margen Bruto Refinerías

REFINERÍAS	COSTO DIRECTO	INGRESO TOTAL	MARGEN DE CAJA
	Promedio (c/lb Cu)	Promedio (c/lb Cu)	Promedio (c/lb Cu)
China	4,33	12,13	7,80
Mundo	6,09	10,16	4,07
Chile	14,53	6,86	-7,67

Fuente: Estudio "Estado del Arte y Visión de Futuro en fundición y Refinería", Programa Alta Ley, agosto 2015

Al bajo nivel de competitividad actual de las fundiciones existentes en Chile, se debe sumar la nueva definición de límites máximos de emisión de azufre (dióxido de azufre, SO₂ y arsénico, As)¹⁶, normativa que surge a raíz de la recomendación realizada por la OCDE de desarrollar normas para reducir el dióxido de azufre y los contaminantes tóxicos.

La norma establece que en el caso de las fundiciones existentes, se “congelan” las emisiones de SO₂, se impone un límite máximo de emisiones de SO₂ y As (en toneladas por año) en función de un 95% de captura y fijación, y se establece un plazo máximo de 5 años para su cumplimiento. En el caso de las fundiciones nuevas, se establece un límite de emisiones más exigente, equivalente a 98% de captura para el SO₂ y de 99,976% para las emisiones de As. Además deberán cumplir con un porcentaje de captura y fijación de azufre y arsénico igual o superior a 95%.

Las refinерías chilenas (Chuquicamata, Potrerillos y Ventanas) aportan con un 6,8% de la capacidad global instalada

y un 6,6% de la producción mundial de cátodos electro-refinados de cobre (Amec Foster Wheeler, 2015).

Con una producción de ánodos de 1,300 millones de toneladas anuales, Chile podría utilizar el 100% de la capacidad de generación de sus refinерías, la cual asciende a 1.120 millones de toneladas de cátodos.

Las actuales tecnologías de electro-depositación en uso son:

- Cátodo permanente
- Láminas iniciales

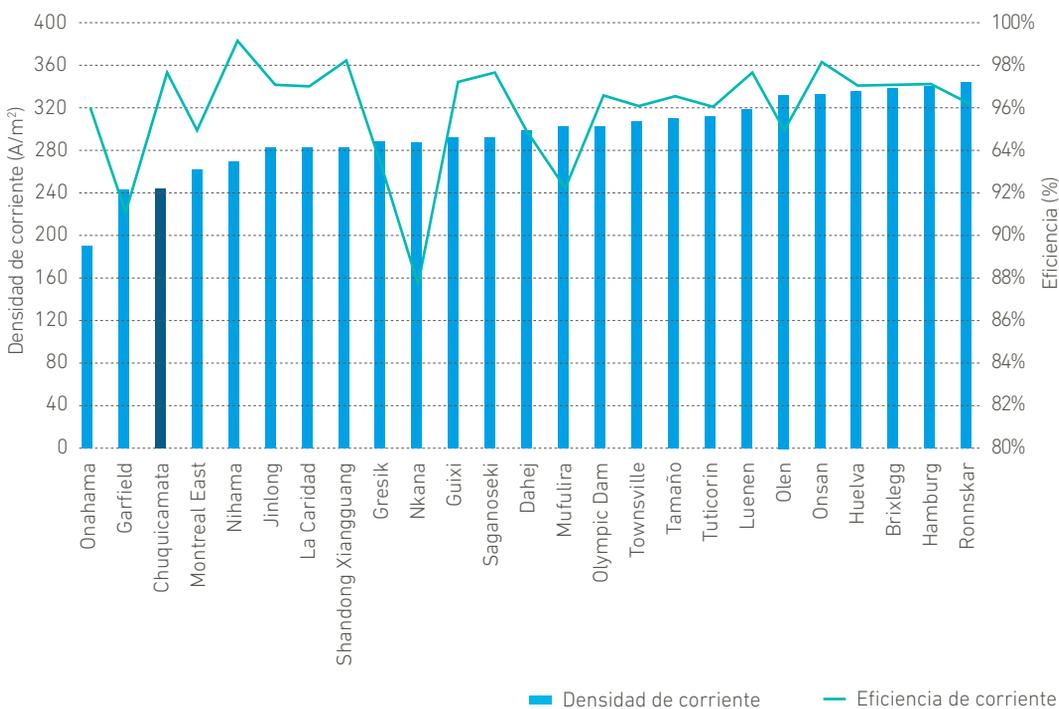
La tecnología de cátodos permanentes utiliza en promedio una mayor densidad de corriente que las láminas iniciales (278 y 260 A/m² respectivamente). Un parámetro importante de operación corresponde a la eficiencia de corriente y, como se aprecia en el gráfico 33 y 34, no se observa una correlación entre la densidad de corriente utilizada y la eficiencia de corriente. Es decir, no hay grandes diferencias entre los valores promedio de la eficiencia de corriente para cada una de las tecnologías.

¹⁶ D.S. N° 28 publicado en el Diario Oficial con fecha 12 de diciembre de 2013.

GRÁFICO F/33

Tecnología de la electro-depositación
(cátodos permanentes)Densidad corriente prom: 278 A/m²

Eficiencia corriente prom: 95%

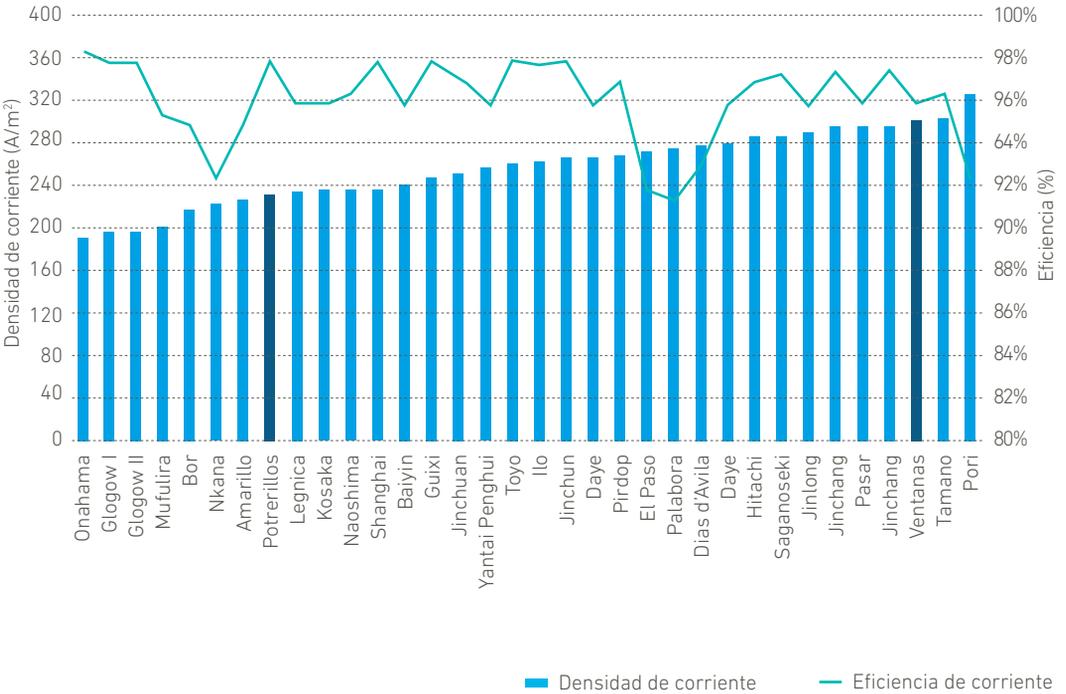


Fuente: Amec Foster Wheeler (2015)

GRÁFICO/34

Tecnología de la electro-depositación (láminas iniciales)

Densidad corriente prom: 260 A/m²
 Eficiencia corriente prom: 95,3%

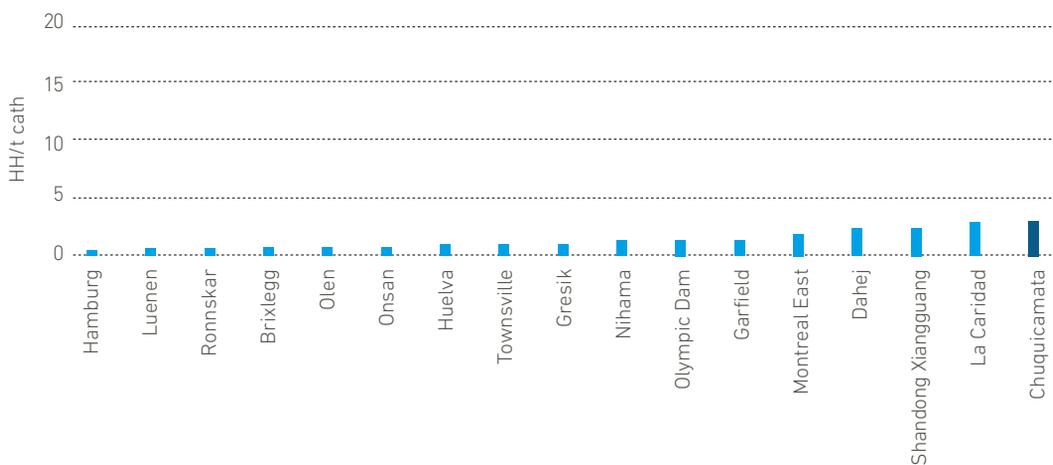


Fuente: Amec Foster Wheeler (2015)

Sin embargo, al analizar la productividad se observa que la tecnología de cátodos permanentes es muy superior en comparación a las láminas iniciales (ver gráfico 35 y 36). Ahora bien, es necesario mencionar que existe un importante número de refinerías de láminas iniciales modernas con muy buena productividad (mecanización y automatización).

GRÁFICO/35 Tecnología de refinación v/s productividad (HH/t cath) (cátodo permanente)

Productividad prom: 1,4 HH/ t cath)

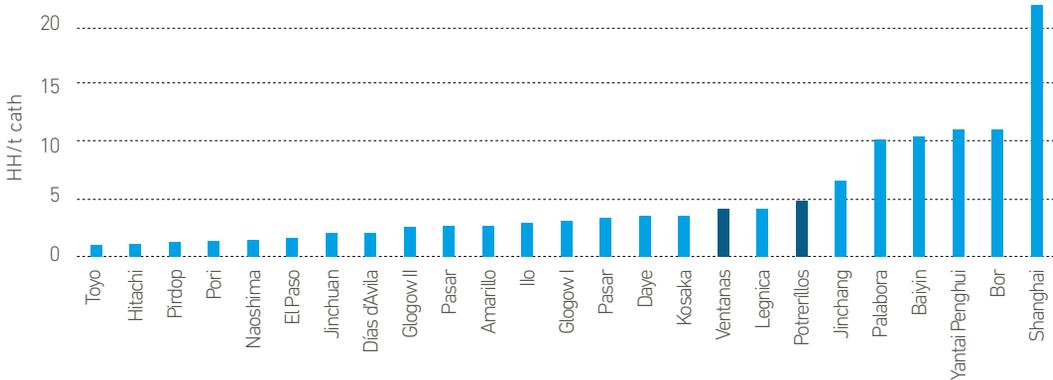


Fuente: Amec Foster Wheeler (2015)

GRÁFICO/36

Tecnología de refinación
v/s productividad (HH/t
cath) (láminas iniciales)

Productividad prom: 4,8w HH/ t cath)



Fuente: Amec Foster Wheeler (2015)



Fotografía Max Donodo (Fundición Chuquiramata)

Las refinerías chilenas se encuentran en una posición muy poco competitiva. En 2013 ocuparon el último decil de margen bruto de la industria, con un valor negativo en dicho margen. Esto se explica debido a que tienen costos mayores que el resto de la industria (Amec Foster Wheeler, 2015). El 2013 fue un año particularmente desventajoso para las fundiciones y refinerías en Chile debido a una muy alta actividad minera, un bajo precio del dólar y un alto precio de la energía eléctrica.

Chile, como primer productor mundial de cobre, debe defender su posición en el mercado global a través de la venta de cátodos. Esto presenta ventajas respecto de la venta de concentrado debido a:

- Potenciales restricciones a las exportaciones de concentrados (transporte marítimo).
- Posibles alzas del cargo de tratamiento y refinación dado el poder de negociación de las fundiciones asiáticas.
- Posibilidad de obtener premios en función de la calidad de los cátodos en lugar de castigos y costos adicionales por flete de los concentrados.
- Ingresos adicionales por la recuperación y venta de metales valiosos presentes en los concentrados.

Para avanzar en la dirección antes descrita, se requiere sacar las actuales operaciones del nivel de obsolescencia tecnológica en que se encuentran, actualizando y/o reemplazando dichas instalaciones para lograr operaciones de

clase mundial, con bajos costos de operación y altos niveles de captura que cumplan con las normas ambientales actuales y futuras.

En particular, se debería aspirar a que todas las fundiciones posean refinería electrolítica, situación normal y deseable a nivel global, lo cual permitiría aprovechar mejor las sinergias operacionales (tratamiento de *scrap* de ánodos y subproductos) y ahorros de fletes.

Por otra parte, para el tratamiento de los barros anódicos sería más eficiente contar con una sola planta de metales nobles a nivel nacional (por economía de escala y por ser una tecnología altamente especializada), lo que ya está considerado por Codelco en el Proyecto Planta de Metales Nobles de Mejillones.

Inspirada en tecnologías desarrolladas en Chile para el Convertidor Teniente, China ha impulsado un desarrollo explosivo de tecnologías eficientes de fundición, las que hoy se perfilan como el estándar mundial por sus ventajas de costos.

En el norte del país (en particular la Segunda Región) existe la necesidad de abordar los concentrados complejos con restricciones o sin posibilidades de exportación, sobre todo si se considera el gran volumen que provendrá del proyecto Chuquicamata Subterráneo. Este escenario abre la oportunidad de transformar las fundiciones en centros especializados de tratamiento de este tipo de concentrados.

VISIÓN DEL NÚCLEO

"Alcanzar un liderazgo tecnológico mundial, que aplicado al diseño y operación industrial, facilite la obtención de la aceptación de la comunidad para operar con altos estándares de desempeño, que aseguren un margen económico al menos en el segundo cuartil".

DESAFÍOS, SOLUCIONES Y LÍNEAS DE I+D

En función de los antecedentes evaluados y de la visión establecida para el *Núcleo Fundición y Refinería*, el grupo de expertos que participó en los talleres técnicos definió tres desafíos. Todas las soluciones identificadas, con sus respectivas líneas de I+D, aplican a más de un desafío. Existen casos en los que se agregan líneas de I+D adicionales en consideración del desafío planteado. Por ejemplo: la solución "*Alto nivel de captura y tratamiento de concentrados complejos*" es pertinente para los desafíos N°1, N°2 y N°3. Esta solución posee tres líneas de I+D para el desafío N°1, a las cuales se añade una línea de I+D cuando la solución es planteada en el marco del desafío N°2 y dos líneas de I+D cuando la solución es planteada en el marco del desafío N°3.

A continuación se detallan las soluciones y líneas de I+D identificadas para cada uno de los desafíos planteados.

Desafío N°1: Aumentar la eficiencia de los procesos de fundición y refinación

Las fundiciones chilenas presentan importantes brechas de productividad explicadas por una baja capacidad de fusión, baja recuperación de cobre y la nula recuperación de subproductos y de energía. Esto, junto al alto costo unitario del proceso, configura un escenario bajo el cual uno de los principales desafíos radica en mejorar la eficiencia de las fundiciones. La siguiente tabla compara los parámetros de las fundiciones chilenas con las de otros países con el fin de identificar las brechas de productividad.

TABLA/14
 Brechas de productividad de
 las funciones chilenas

PARÁMETRO	UNIDAD	FUNDICIONES CHINAS	FUNDICIONES JAPONESAS	FUNDICIONES ALEMANAS	FUNDICIONES CHILENAS
Capacidad de fusión	KTS/año	1.000-1.500	1.200	1.200	320-1.000
Captura de azufre	%	98	99	98,5	95
Costos unitarios	cUS\$/lb	13	18	19	22-40
Recuperación de cobre	%	98-98,5	98-99,5	98	95-97,3
Recuperación de energía	Sí/No	Sí	Sí	Sí	No
Recuperación de otros metales	Sí/No	Sí	Sí	Sí	No

Fuente: Enami (2015)

TABLA/15
soluciones y líneas de I+D. Desafío:
aumentar la eficiencia de los
procesos de fundición y refinería

SOLUCIÓN	LÍNEA DE I+D
Mínimas pérdidas de cobre y de otros metales con valor.	<p>Conversión continua con metal blanco sólido.</p> <p>Instrumentación y sistema de control expertos en hornos BS.</p> <p>Limpieza de escorias.</p> <p>Automatización, mecanización, robotización refinерías.</p> <p>Recuperación metales valiosos (Mo, Re, U Ge).</p> <p>Recuperación a partir de polvos de fundición y barros anódicos.</p> <p>Uso de toberas de alta presión en hornos <i>Bath Smelting</i>.</p> <p>Tecnología capa fundida.</p>
Equipos de alta capacidad de procesamiento y largas campañas.	<p>Conversión continua con metal blanco sólido.</p>
Mínimos procesos y operaciones unitarias.	<p>Conversión continua con metal blanco sólido.</p> <p>Uso de toberas de alta presión en hornos <i>Bath Smelting</i>.</p> <p>Nuevo proceso electro-refinación continua.</p> <p>Horno directo a blíster.</p>
Alto nivel de captura y tratamiento de concentrados complejos.	<p>Instrumentación y sistema de control expertos en hornos BS.</p> <p>Uso de toberas de alta presión en hornos <i>Bath Smelting</i>.</p> <p>Tecnología lecho empacado.</p>

continúa en la página siguiente

SOLUCIÓN	LÍNEA DE I+D
Intensa mecanización, automatización, robotización.	<p>Conversión continua con metal blanco sólido.</p> <p>Instrumentación y sistema de control expertos en hornos BS.</p> <p>Automatización, mecanización, robotización refinerías.</p>
Procesos continuos.	<p>Conversión continua con metal blanco sólido.</p> <p>Automatización, mecanización, robotización refinerías.</p> <p>Uso de toberas de alta presión en hornos <i>Bath Smelting</i>.</p> <p>Horno directo a blíster.</p> <p>Nuevo proceso electro-refinación continua.</p>
Mínimos desechos y obtención de otros subproductos.	<p>Limpieza de escorias.</p> <p>Recuperación metales valiosos (Mo, Re, U Ge).</p> <p>Recuperación a partir de polvos de fundición y barros anódicos.</p> <p>Control de impurezas.</p> <p>Control de Sb y Bi en refinería.</p>
Buenas condiciones laborales y Capital Humano Avanzado.	<p>Automatización, mecanización, robotización refinerías.</p> <p>Control de impurezas.</p> <p>Control de Sb y Bi en refinería.</p>

Fuente: elaboración propia

Desafío N°2: Disminuir el impacto medioambiental

Existen importantes brechas en términos de captura de azufre y arsénico, lo cual constituye un desafío importante para las fundiciones chilenas en materia medioambiental. La necesidad de aumentar estos parámetros para igualar los valores alcanzados en otros países se ha traducido en una nueva normativa (Decreto N°28, 2013), la cual establece estableciendo un nivel de captura del 98% (SO₂ y As) para las futuras instalaciones.

TABLA/16

Soluciones y líneas de I+D. Desafío:
disminuir el impacto medioambiental

SOLUCIÓN	LÍNEAS DE I+D
Mínimas pérdidas de cobre y de otros metales con valor.	<p>Conversión continua con metal blanco sólido.</p> <p>Instrumentación y sistema de control expertos en hornos BS.</p> <p>Recuperación metales valiosos (Mo,Re,U Ge).</p> <p>Recuperación a partir de polvos de fundición y barros anódicos.</p> <p>Limpieza de Escorias.</p> <p>Automatización, mecanización, robotización refinerías.</p> <p>Tecnología capa fundida.</p> <p>Uso de toberas de alta presión en hornos Bath Smelting.</p>
Equipos con alta capacidad de procesamientos y largas campañas.	<p>Conversión continua con metal blanco sólido.</p>
Alto nivel de captura y tratamientos de concentrados complejos.	<p>Instrumentación y sistema de control expertos en hornos BS.</p> <p>Automatización, mecanización, robotización refinerías.</p> <p>Tecnología Lecho empacado.</p> <p>Uso de toberas de alta presión en hornos Bath Smelting.</p> <p>Tratamiento de concentrados alto As en BBF.</p>
Mínimos desechos y obtención de otros subproductos.	<p>Recuperación metales valiosos (Mo,Re,U Ge).</p> <p>Recuperación a partir de polvos de fundición y barros anódicos.</p> <p>Limpieza de Escorias.</p> <p>Control de impurezas.</p> <p>Control de Sb y Bi en refinerías.</p>
Buenas condiciones laborales y Capital Humano Avanzado.	<p>Automatización, mecanización, robotización refinerías.</p> <p>Control de impurezas.</p> <p>Control de Sb y Bi en refinerías.</p>

Fuente: elaboración propia

Desafío N°3: Mejorar las condiciones laborales

La incorporación de nuevas tecnologías en los procesos de fundición y refinación no sólo tendrá impacto en los desafíos planteados anteriormente, sino que también contribuirá a mejorar las condiciones laborales de los trabajadores de las operaciones.

La manipulación del material fundido constituye un riesgo para los trabajadores involucrados en el proceso, por lo cual eliminar la actual brecha en accidentabilidad, explicada principalmente por la existencia de múltiples procesos discontinuos en las operaciones, constituye un importante desafío a abordar

TABLA/17
Soluciones y líneas de I+D. Desafío:
mejorar las condiciones laborales

SOLUCIÓN	LÍNEAS DE I+D
Mínimos procesos y operaciones unitarias.	Recuperación metales valiosos (Mo,Re,U Ge). Recuperación a partir de polvos de fundición y barros anódicos. Limpieza de Escorias Control de impurezas. Control de Sb y Bi en refinерías.
Intensa mecanización, automatización, robotización.	Conversión continua con metal blanco sólido. Instrumentación y sistema de control expertos en hornos BS. Automatización, mecanización, robotización refinерías.
Alto nivel de captura y tratamientos de concentrados complejos	Instrumentación y sistema de control expertos en hornos BS. Automatización, mecanización, robotización refinерías. Tecnología Lecho empacado. Uso de toberas de alta presión en hornos <i>Bath Smelting</i> . Tratamiento de concentrados alto As en BBF.
Buenas condiciones laborales y Capital Humano Avanzado.	Automatización, mecanización, robotización refinерías. Control de impurezas. Control de Sb y Bi en refinерías.
Mínimas pérdidas de Cu y otros metales con valor.	Conversión continua con metal blanco sólido. Instrumentación y sistema de control expertos en hornos BS. Recuperación metales valiosos (Mo,Re,U Ge). Recuperación a partir de polvos de fundición y barros anódicos. Limpieza de Escorias. Automatización, mecanización, robotización refinерías. Tecnología capa fundida. Uso de toberas de alta presión en hornos Bath Smelting
Equipos con alta capacidad de procesamientos y largas campañas.	Conversión continua con metal blanco sólido.

Fuente: elaboración propia

NÚCLEO FUNDICIÓN Y REFINERÍA

3 DESAFÍOS

19 SOLUCIONES

79 LÍNEAS DE I+D

RECURSOS

INFRAESTRUCTURA

- Pruebas piloto (China/Chile).
- Pruebas de laboratorio.

CAPACIDADES

- Investigación en ciencias básicas.
- Contribución de universidades en investigación, instrumentación y control.
- Capital humano avanzado con especialidad: fluido dinámica, fenómenos de transporte, cinética de reacciones, termodinámica, electroquímica, ciencia de los materiales, modelamiento de procesos, opto-electrónica, mineralo-química, tecnología digital, mecatrónica.
- Formación de técnicos en CTFs con capacidades expertas de operadores y mantenedores.
- Centro especializado en arsénico.
- Organización y transparencia.
- Centro de pensamiento tecnológico para la minería.

PROVEEDORES

- Potenciar desarrollo de proveedores locales de instrumentación, control experto, mecanización, automatización, robotización, gestión de la información, software de optimización, transmisión de datos, diseño de ingeniería, servicios de apoyo especializado.
- Sistema estructurado para el acompañamiento de empresas locales con capacidades tecnológicas.

ALIANZAS

- Acuerdo de colaboración China - Chile.
- Alianzas con universidades nacionales, extranjeras y centros de excelencia.

INFOGRAFÍA/3

Vigilancia tecnológica
fundición (Patentes)

TOTAL DE PATENTES
PERIODO 2010-2015

119
PATENTES



PRINCIPALES
TENDENCIAS
TECNOLÓGICAS

- Mitigación de cambio climático en la producción

PATENTES MÁS CITADAS

Patente	Año	Citas
EP1148295B1 Gasification melting furnace for wastes and gasification melting method	2011	14
US7771666B2 Method of producing nanoparticles using a evaporation-condensation process with a reaction chamber plasma reactor system	2010	11
US8052774B2 Method for concentration of gold in copper sulfide minerals	2011	5
EP1811821B1 Method of recycling waste printed circuit boards	2011	4
EP1964936B1 Process for recovering noble metals from electric and electronic wastes	2013	4
US8173086B2 Process of recovery of base metals from oxide ores	2012	3
US2010275730A1 Method for recycling precious metal from used printed circuit boards	2010	3
US7776135B2 Method for the recovery of gold	2010	2
US8800775B2 Method for recovering metals from electronic waste containing plastics materials	2014	2
US7815706B2 Method and apparatus for recovering platinum group elements	2010	2

PAÍSES CON MÁS PATENTES



PRINCIPALES UNIVERSIDADES

- Universidad del Centro Sur de China
- Instituto Nacional de Tecnología de Japón
- Universidad de Ciencia y Tecnología de Beijing
- Universidad Federal de Espíritu Santo
- Universidad Jiangxi de Ciencia y Tecnología
- Universidad Normal del Noroeste de China
- Universidad de Tokio
- Fundación de Investigación de la Universidad de Utah

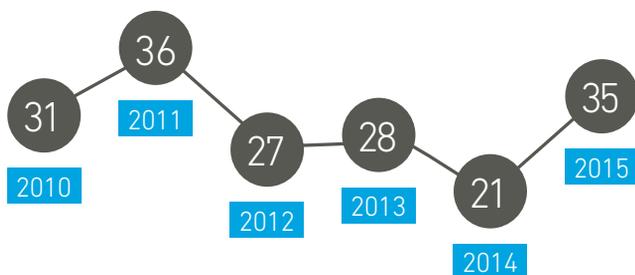
PRINCIPALES EMPRESAS Y/O CENTROS DE I+D

- Outotec OYJ
- Tanaka Precious Metal IND
- Dowa Metals & Mining CO LTD
- JX Nippon Mining & Metals Corp
- Precious Metals Recovery PTY LTD
- Mitsubishi Materials Corp
- Kosaka Smelting & Refining CO
- Nippon PGM CO LTD
- Outokumpu OY
- Umicore AG & CO KG

INFOGRAFÍA/4

Vigilancia tecnológica
fundición (Publicaciones)

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS
PERIODO 2010-2015



PUBLICACIONES
CIENTÍFICAS

178

PRINCIPALES TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN N°

Metalurgia / Ingeniería metalúrgica	63
Ingeniería	51
Ecología y ciencias ambientales	49
Ciencias de materiales	29
Procesamiento de mineral	29
Minerología	24
Química	18
Geología	15
Recursos hídricos	10



PUBLICACIÓN
MÁS CITADA

Low grades ores - Smelt,
leach or concentrate?

Autores
Norgate, T
Jahanshahi, S

PRINCIPALES INSTITUCIONES DE INVESTIGACIÓN	Nº
Academia de Ciencias de Rusia	17
Universidad de Belgrado	13
Universidad del Centro Sur de China	11
Universidad Carolina de Praga	8
Academia de Ciencias de China	7
Servicio Geológico Checo	6
Universidad Shahid Bahonar de Kerman	5
Instituto de Minería y Metalurgia de Bor	4
Universidad Politécnica de Silesia	4
Universidad de Tohoku	4

PAÍSES CON PUBLICACIONES CIENTÍFICAS



INFOGRAFÍA/5

Vigilancia tecnológica
refinería (Patentes)

TOTAL DE PATENTES
PERIODO 2010-2015

77

PATENTES

PRINCIPALES
TENDENCIAS
TECNOLÓGICAS

- Obtención de cobre
- Tecnologías relacionadas con el procesamiento de metales
- Tecnologías para la gestión de residuos sólidos
- Producción electrolítica
- Recuperación y refinación de metales por electrólisis de soluciones

PATENTES MÁS CITADAS

Patent	Año	Citas
US8052774B2 Method for concentration of gold in copper sulfide minerals	2011	5
US7700343B2 <i>Sulfur-oxidizing bacteria and their use in bioleaching processes for sulfured copper minerals</i>	2010	4
US8834715B2 <i>Copper recovery apparatus and copper recovery method</i>	2014	4
US2010065433A1 System and apparatus for enhancing convection in electrolytes to achieve improved electrodeposition of copper and other non ferrous metals in industrial electrolytic cells	2010	4
EP1903119B1 <i>A method of manufacturing high purity copper</i>	2015	3
US7811534B2 <i>Method for the treatment of copper-bearing materials</i>	2010	3
US8192596B2 <i>Ultrahigh-purity copper and process for producing the same</i>	2012	3
US7736487B2 <i>Process for recovery of copper from copper-bearing material using pressure leaching, direct electrowinning and solution extraction</i>	2010	3
US7722756B2 <i>Process for multiple stage direct electrowinning of copper</i>	2010	2
US7736488B2 <i>Process for recovery of copper from copper-bearing material using pressure leaching, direct electrowinning and solvent/solution extraction</i>	2010	2

PAÍSES CON MÁS PATENTES



·	Japón	22
·	EE.UU.	11
·	Chile	9
·	China	7
·	Austria	4
·	Finlandia	4
·	Polonia	4
·	Canadá	3
·	Australia	2
·	Suiza	2



PRINCIPALES UNIVERSIDADES

- Universidad de Chile
- Universidad Libre de Bruselas
- Universidad de Osaka
- Universidad de San Luis
- Universidad de Santiago de Chile
- Universidad de Columbia Británica

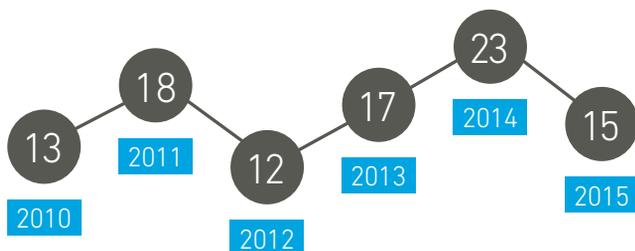
PRINCIPALES EMPRESAS Y/O CENTROS DE I+D

- JX Nippon Mining & Metals Corp
- Pan Pacific Copper CO LTDA
- Nippon Mining CO
- Phelps Dodge Corp
- Freeport McMoran Corp
- Outotec OYJ
- Xiangguang Copper CO LTDA.
- Sumitomo Metal Mining CO

INFOGRAFÍA/5

Vigilancia tecnológica
refinería (Publicaciones)

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS PERIODO 2010-2015



PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

98

PRINCIPALES TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN

Tendencia	Nº
Ciencias de los materiales	62
Metalurgia / Ingeniería Metalúrgica	44
Otros tópicos de ciencias tecnológicas	15
Física	11
Ingeniería	8
Química	7
Cristalografía	4
Minerología	3
Procesamiento de minerales	3
Microscopía	2

PUBLICACIÓN MÁS CITADA

The role of stacking faults and twin boundaries in grain refinement of a Cu-Zn alloy processed by high-pressure torsion

Autores
Wang, Y.B.
Liao, C.Z.
Zhao, Y.H

PRINCIPALES INSTITUCIONES DE INVESTIGACIÓN	Nº
Universidad de Tohoku	6
Universidad de Brunel	4
Universidad de Kyushu	4
Academia de Ciencias de Rusia	4
Centro Nacional para la Investigación Científica de Francia	3
Academia de Ciencias de la República Checa	3
Universidad de Monash	3
Universidad Politécnica del Noroeste de Estados Unidos	3
Universidad de Lorena	3

PAÍSES CON PUBLICACIONES CIENTÍFICAS



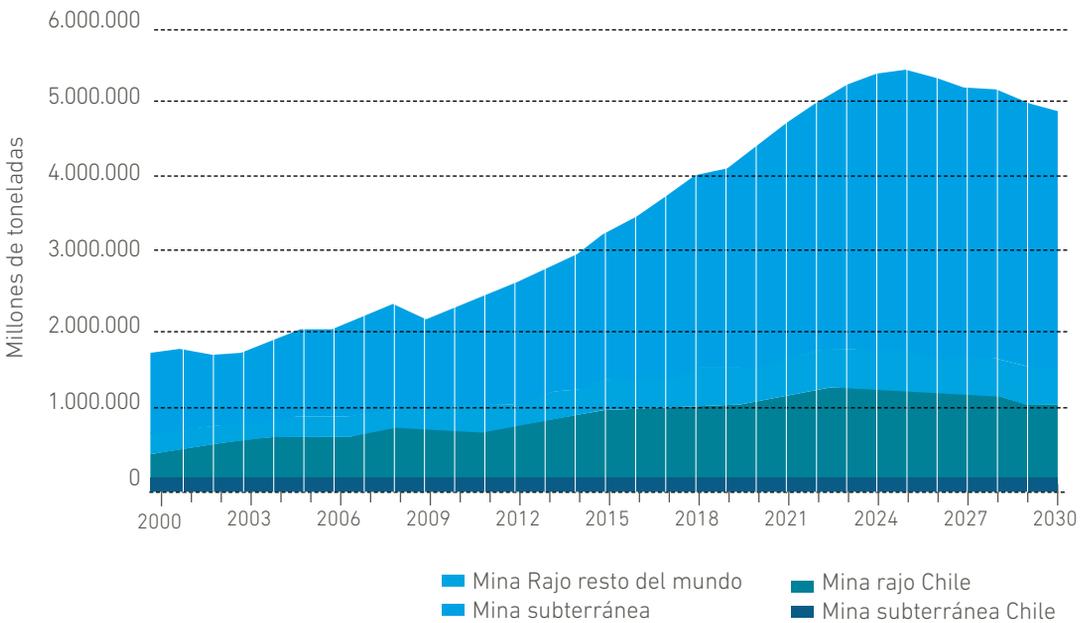
NÚCLEO OPERACIONES Y PLANIFICACIÓN MINERA ANTECEDENTES

La mayor parte del mineral extraído actualmente en Chile y el mundo proviene de minas a rajo abierto. Durante 2014 se extrajeron más de 3 mil millones de toneladas de mineral en el mundo, de las cuales cerca de un 87% corresponde a producción de minas rajo. Chile concentró aproximadamente un 30% de dicha producción.

La sección Núcleo Operación y Planificación Minera fue elaborada en base al trabajo realizado por la Mesa Técnica del núcleo, la que estuvo compuesta por: Agustín Sepulveda, Andrés Pérez, Brian Baird, Carlos Urenda, Christian Schnettler, Claudio Rojas, Cleve Lightfoot, Francisco Abbott, Hugo Toro, Jorge Soto, Murray Canfield, Nury Briceño, Pablo Asiain, Pierre Perrier.

La redacción de esta sección estuvo a cargo del equipo de Fundación Chile, compuesto por: Francisco Klima, Tomás González, Enrique Molina, Philip Wood, Cristóbal Arteaga, Manuel Arre, Nicole Valdebenito, Hernán Araneda.

GRÁFICO/37
 Mineral extraído en Chile y
 el mundo, 2000-2030



Fuente: Wood Mackenzie (2015)

Si bien se estima un crecimiento relevante de la producción de minas subterráneas al año 2025, las minas a rajo abierto continuarían aportando la mayor parte de la producción total, acercándose a los 5 mil millones de toneladas.

El método de explotación de superficie, denominado rajo o cielo abierto, constituye la primera opción a evaluar para el desarrollo de un proyecto minero, ya que habitualmente es el más económico si el cuerpo mineralizado se encuentra cercano a la superficie del terreno y posee una forma regular.

Dependiendo de la concentración de los elementos de interés económico, de los posibles contaminantes y en general de la geometría de los cuerpos mineralizados, las minas a rajo abierto pueden superar extensamente los 500 metros de profundidad.

Por otra parte, cuando la mineralización se encuentra emplazada a mayor profundidad, o bien cuando se ha superado el límite económico de la extracción por rajo, la selección corresponderá a un método subterráneo. En este caso el método subterráneo quedará definido por un conjunto de factores relacionados con la forma del cuerpo, otras características tanto del mineral como de la roca que lo rodea, factores medioambientales, factores tecnológicos y consideraciones económicas relacionadas con las reservas minerales disponibles, tasa de producción requerida, vida de la mina, productividad y finalmente el costo por tonelada de mineral de cada método posible.

Más del 50% de la producción de cobre fino, en cualquiera de sus formas de comercialización, proviene desde las seis operaciones que se detallan en la siguiente tabla.

TABLA/18
 Mayores operaciones en
 Chile (principalmente rajo) y
 su aporte de cobre fino

Faena	KT Cu FINO					% de total	% Acum.
	2010	2011	2012	2013	2014		
Escondida	1087	818	1076	1194	1165	20	20
Collahuasi	504	453	282	445	470	8	28
Anglo American Sur	258	264	417	467	437	8	36
Los Pelambres	398	426	418	419	405	7	43
División Chuquicamata	528	443	256	339	340	6	49
División Radomiro Tomic	375	470	428	380	327	6	55

Fuente: Cochilco (2015f)

Todas las operaciones anteriores (excepto Anglo American Sur, que incluye producción subterránea de El Soldado) corresponden a minas a rajo abierto. En el caso de Chuquicamata, la transición hacia una mina subterránea ya se encuentra en curso, pudiendo iniciar su producción a fines de esta década. Eventualmente, todas las operaciones podrían experimentar dicha transición.

Las principales operaciones subterráneas en Chile corresponden a las pertenecientes a Codelco (Divisiones El Teniente y Andina). Durante 2014 la División El Teniente aportó el 8% del cobre fino producido a nivel nacional, mientras que la División Andina lo hizo con un 4% del total. Ambas Divisiones cuentan también con minas a cielo abierto, cuya producción está incluida en las cifras antes mencionadas.

Se estima que, en promedio, transcurren 20 años desde que un yacimiento es descubierto hasta su entrada en operación. La etapa de exploración abarca un tiempo promedio de diez años, mientras que las fases de estudios, financiamiento, permisos y construcción tardan otros diez años (Fuentes, 2010).

La mayor parte de los descubrimientos de los grandes yacimientos de cobre porfídico en Chile ha sido el resultado del levantamiento geológico de detalle en áreas promisorias, luego de la aplicación de criterios metalogénicos que señalan áreas favorables para su exploración, seguido

de la ejecución de programas de sondajes, delineados con ayuda de investigaciones geoquímicas y geofísicas. En el caso de exploración de áreas cubiertas por rocas pos-minerales, la exploración debería estar guiada por la extrapolación de marcos geológicos favorables presentes en las rocas pre-minerales o por la existencia de anomalías geofísicas y geoquímicas (Zauschquevich & Sutulov, 1975).

La estimación del tamaño o tonelaje del material mineralizado y sus leyes se basa habitualmente en una interpretación geológica o modelo 3D del yacimiento y el procesamiento geo-estadístico de los datos recolectados. A partir de ello se obtiene una cuantificación de los Recursos Minerales, los que mediante sucesivas fases podrían ser convertidos a Reservas Minerales.

De acuerdo a la Comisión Minera¹⁷, la conversión de Recursos a Reservas incluye las siguientes fases: prospecto de exploración que da origen a la idea; análisis técnico-económico de orden de magnitud que da origen a un estudio de alcance; estudio de pre-factibilidad y; estudio de factibilidad, que proporciona una base de información utilizada por un proponente o entidad financiera para decidir sobre el desarrollo de un proyecto. En las primeras fases la información es fragmentaria o insuficiente, e implica un alto nivel de riesgo, aspecto que disminuye cuando se perfecciona y robustece la información.

¹⁷ Comisión Calificadora de Competencias en Recursos y Reservas Mineras, creada por Ley de la República N°20.235.

FIGURA/22
Las fases de la conversión
y niveles de estudio



Fuente: Tutcanza (2014)

Los sucesivos estudios mineros deberán reflejar el creciente nivel de certidumbre de los parámetros relevantes de la explotación y, en caso de contar con resultados económicos favorables, conducir a su construcción puesta en marcha y operación.

La operación de una mina comprende un trabajo multidisciplinario el cual debe ser coordinado y así, realizarse de manera segura y eficaz. Dentro de los equipos de trabajo que intervienen es posible mencionar: geología, geotecnia, planificación, topografía, operaciones mina, mantención, administración, servicios y apoyo en materias de seguridad, medio ambiente y calidad, junto con asesores en distintas materias. El equipo de geología tiene dentro de su misión proporcionar información sobre las características físicas, químicas y mineralógicas del material a extraer, constituyendo el punto de partida del proceso extractivo. Esta información es tomada por el grupo de ingeniería o planificación, el cual la integra con otras variables relacionadas con la operación, la geotecnia, la metalurgia, la mantención y los costos para generar un plan de producción o "plan minero". Dicho plan describe los movimientos de materiales que se llevarán a cabo en la operación y los recursos requeridos para ello.

El movimiento de materiales en la operación incluye la extracción y traslado de materiales de diferentes calidades o contenido del elemento de interés. Esto es, material sin ningún contenido valioso ("estéril"), material cuyo contenido valioso no justifica su procesamiento, y materiales con diferentes proporciones ("leyes") de elementos de interés. Este material, denominado genéricamente "mineral", tendrá como destino alguna de las líneas de proceso o los respectivos acopios.

La planificación minera se desarrolla permanentemente durante la operación de la mina, de manera similar a como se realiza en las etapas previas de proyecto minero o ingeniería, pero con bases de información diferentes.

Un equipo denominado tradicionalmente como "operaciones mina" es el encargado de la extracción de los materiales desde la mina. En la minería metálica esto se realiza siguiendo secuencialmente las siguientes operaciones unitarias: perforación, tronadura, carguío, transporte.

El conjunto de las operaciones unitarias y los equipos y/o tecnologías utilizadas para el desarrollo de cada una de ellas constituyen un "sistema minero", el cual está estrechamente ligado al "método de explotación" en cuestión. Por ejemplo, en la actualidad la mayoría de las grandes minas en explotación mediante el método rajo abierto, utilizan un sistema minero donde el arranque o extracción del material se realiza mediante perforación (principalmente rotativa) y tronadura con explosivos, y el carguío y transporte con un sistema pala-camión.

Como ya se ha mencionado en capítulos anteriores, la minería chilena se ha visto afectada por la disminución paulatina de la calidad de las reservas minerales. Las leyes de cobre son cada vez más bajas y, debido principalmente a la mayor profundidad que van alcanzando las minas, las rocas son de mayor dureza. Además, en el caso de las minas a cielo abierto, la expansión de las explotaciones habitualmente implica que se requiera remover una mayor proporción de material estéril o lastre por cada tonelada de mineral a recuperar.

Este escenario incide directamente en un mayor consumo de energía por libra de cobre fino producida y afecta de manera negativa la productividad del negocio minero. Más aun, a la necesidad de mover una mayor cantidad de lastre y de moler una mayor cantidad de mineral, se debe agregar la tendencia a encontrar mineral de mayor dureza, impactando adicionalmente el consumo energético (*ver capítulo 4, sección: "Escenario actual y desafíos de corto plazo"*)

Otra razón detrás del creciente requerimiento de energía en la minería está relacionada con la casi inexistente disponibilidad de agua continental para suplir los consumos de nuevas operaciones y futuros proyectos mineros, teniendo que recurrir al transporte de agua desde el nivel del mar con el consiguiente gasto energético asociado.

Aún cuando el precio del cobre tiene un efecto directo en la productividad de la industria (periodos de precios altos propician la explotación de yacimientos de menor ley y menor productividad, pero con resultados económicamente convenientes), es un hecho que la disminución de las leyes del mineral, su mayor dureza e impurezas y el aumento de las distancias de transporte sitúan a la productividad como un foco prioritario para la minería de cobre en Chile.

DESAFÍOS, SOLUCIONES Y LÍNEAS DE I+D

En función de los antecedentes evaluados, el grupo de expertos que participó en los talleres técnicos definió cuatro desafíos: i) *Aumento de la productividad*; ii) *Incremento de los recursos y reservas minerales*; iii) *Cuidado del medioambiente y responsabilidad social*; iv) *Mayor seguridad y calidad en los ambientes de trabajo*.

Tal como se describió en los antecedentes de esta sección, la planificación y operación minera incluye cuatro fases. Éstas son: i) *Exploración*; ii) *Proyecto minero, ingeniería y control y planificación minera (C&PM)*; iii) *Extracción rajo abierto*; iv) *Extracción subterránea*. La siguiente tabla indica cuáles de los desafíos identificados aplican a cada una de las fases.

TABLA/19
 Desafíos y fases del núcleo
 operaciones y planificación minera

DESAFIOS/FASES	EXPLORACIÓN	PROYECTO MINERO, INGENIERÍA Y CONTROL Y PLANIFICACIÓN MINERA (C&PM)	EXTRACCIÓN RAJO ABIERTO	EXTRACCIÓN SUBTERRÁNEA
Aumento de la productividad	●	●	●	●
Incremento de los recursos y reservas minerales	●	●		
Cuidado del medio ambiente y responsabilidad social			●	
Mayor seguridad y calidad en los ambientes de trabajo	●			

Fuente: elaboración propia

Desafío N°1: Aumento de la productividad

Como se ha mencionado a lo largo de este libro, la productividad es un tema central que la industria minera debe abordar en el corto y largo plazo. Este desafío es transversal a todas las fases definidas en el marco de este núcleo. No obstante, debido a los antecedentes expuestos, adquiere particular importancia en las etapas de extracción rajo abierto y extracción subterránea.

En la extracción rajo abierto las soluciones asociadas al movimiento de grandes volúmenes de tierra a largas distancias y la gestión de activos, entendida como la aplicación del universo de equipamiento para el desarrollo de las actividades, se identifican como las principales líneas de desarrollo para mejorar la productividad.

Por su parte, las soluciones asociadas al aumento de productividad en la extracción subterránea se relacionan con el desarrollo de minería profunda a gran escala, lo cual implica, entre otros aspectos, avanzar en tecnologías que permitan operar bajo altos esfuerzos geomecánicos y desarrollar e integrar operaciones autónomas.

TABLA/20
Soluciones y líneas de I+D. Desafíos:
Aumento de la productividad

SOLUCIÓN	ETAPA	LÍNEAS I+D
Disminuir la intervención directa de los operadores mejorando tanto la seguridad y auditabilidad.	Exploración.	<ul style="list-style-type: none"> · Perfeccionamiento y desarrollo de las técnicas para la automatización del muestreo y preparación de muestras.
Selección óptima de equipos y cálculos de flotas principales.	Proyecto Minero, Ingeniería, C&PN.	<ul style="list-style-type: none"> · Perfeccionamiento desarrollo y estandarización de metodologías y herramientas para selección de equipos y cálculo de flotas.
Estimación de costos, evaluación económica y financiera de proyectos.		<ul style="list-style-type: none"> · Perfeccionamiento, desarrollo y estandarización de metodologías y herramientas para costeo y evaluación de planes mineros.
Manejo de grandes volúmenes de material a través de largas distancias.	Extracción Rajo Abierto.	<ul style="list-style-type: none"> · Fragmentación/tronadura. · Correas de gran tonelaje. · Constructibilidad de taludes.
Gestión de activos.		<ul style="list-style-type: none"> · Integración de operaciones (mina-planta). · Medición en línea de leyes en pozos, palas, correas. · Integración de operaciones unitarias remotizadas. · Automatización y operaciones autónomas. · Mantenibilidad: sintonización de equipos principales, otros. · Desarrollo de sistemas para la alimentación a chancadores para disminución de camiones.

continúa en la página siguiente

SOLUCIÓN	ETAPA	LÍNEAS I+D
Desarrollo de una minería profunda a gran escala.	Extracción subterránea.	<ul style="list-style-type: none"> · Minería continua. · Caracterización. · Flujo gravitacional. · Medición de leyes en línea. · Soporte y fortificación. · Fragmentación/tronadura. · Automatización y operaciones autónoma. · Operación bajo altos esfuerzos geotécnicos.
Gestión de activos.		<ul style="list-style-type: none"> · Mantenibilidad: sintomatización de equipos principales, otros.

Fuente: elaboración propia



Desafío N°2: Incremento de los recursos y reservas minerales

El segundo desafío identificado en este núcleo tiene relación con las dos primeras fases: *Exploración y Proyecto minero, Ingeniería y control y planificación minera*. Para el caso de la exploración, se identifica como posible solución perfeccionar y desarrollar tecnologías que permitan aumentar la tasa de nuevos hallazgos. Por su parte, el incremento de los recursos y reservas minerales en la fase de ingeniería y planificación implica perfeccionar herramientas que permitan, entre otros aspectos, acortar el ciclo inversional de los proyectos, disminuir la brecha entre los parámetros proyectados y reales y desarrollar estrategias óptimas de consumo de reservas.

TABLA/21

Soluciones y líneas de I+D.
Desafíos: Incremento de los recursos y reservas minerales

SOLUCIONES	ETAPA	LÍNEAS I+D
Aumentar la tasa de éxito en las campañas.	Exploración.	<ul style="list-style-type: none"> · Perfeccionamiento y desarrollo de técnicas de prospección. Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías de perforación. · Perfeccionamiento y desarrollo de tecnologías de caracterización.
Acortar el ciclo inversional.	Proyecto Minero, Ingeniería, C&PM.	<ul style="list-style-type: none"> · Integración del conocimiento de operaciones y proyectos.
Disminuir la brecha entre parámetros proyectados y reales.		<ul style="list-style-type: none"> · Caracterización y modelamiento de variables (geociencias).
Estrategia óptima de consumo de reservas.		<ul style="list-style-type: none"> · Nuevas herramientas para el secuenciamiento (en base a bloques, otras) que integren las restricciones operacionales. · Perfeccionamiento de herramientas para definición para transición de rajo-subterránea. · Perfeccionamiento de herramientas para la planificación de mediano plazo integrada de minas en un distrito minero. · Planificación holística que integre variables relevantes de la geometalurgia, geomecánica, medioambiente (ácido, viento, otras), comercialización, etc.

Fuente: elaboración propia

Desafío N°3: Cuidado del medio ambiente y responsabilidad social

Como se ha mencionado en otros capítulos, los aspectos socio-ambientales han adquirido una particular relevancia en el desarrollo y sustentabilidad futura de la industria minera. En dicho contexto, las líneas de I+D identificadas en el marco de este desafío se encuentran asociadas al manejo de residuos y su potencial impacto.

TABLA/22
Soluciones y líneas de I+D. Desafío:
Cuidado del medio ambiente
y responsabilidad social

SOLUCIÓN	ETAPA	LÍNEAS I+D
Manejo de residuos e impacto.	Extracción rajo abierto.	<ul style="list-style-type: none"> · Control de polvo/emisiones. · Técnicas para permitir el uso futuro del terreno y control de erosión. · Potencial generador de ácido. · Neumáticos. · Lubricantes.

Fuente: elaboración propia

Desafío N°4: Mayor seguridad y calidad en los ambientes de trabajo

La preocupación por la seguridad laboral es un foco de atención constante de la industria minera. La tasa de accidentabilidad de la minería es la menor en comparación con el resto de las actividades económicas que se desarrollan en el país, mientras que la tasa de mortalidad ha ido disminuyendo paulatinamente.

En el marco de esta Hoja de Ruta se identificó que este aspecto representa un importante desafío para la fase de exploración, en la cual se propone avanzar en el desarrollo de técnicas que permitan disminuir la intervención directa de los operadores.

TABLA/23
Soluciones y líneas de I+D. Desafío:
Mayor seguridad y calidad en
los ambientes de trabajo

SOLUCIÓN	ETAPA	LÍNEAS I+D
Disminuir la intervención directa de los operadores mejorando tanto la seguridad y auditabilidad.	Exploración.	· Perfeccionamiento y desarrollo de técnicas para la automatización del muestreo y preparación de muestras.

Fuente: elaboración propia

NÚCLEO OPERACIONES Y PLANIFICACIÓN MINERA

4 DESAFÍOS

13 SOLUCIONES

35 LÍNEAS DE I+D

RECURSOS

CAPACIDADES

- Investigación en ciencias básicas.
- Contribución de universidades en investigación, instrumentación y control.
- Capital humano avanzado con especialización en: modelamiento de procesos, gestión de activos, mecatrónica, robótica, caracterización y modelamiento de variables, geo metalurgia, geo mecánica, geo químicas, geofísicas y medio ambiental.
- Formación de operadores y mantenedores en CTFs con capacidades expertas en automatización y robótica.
- Centro de pensamiento tecnológico para la minería.
- Organización para transferencia de conocimiento.

PROVEEDORES

- Potenciar desarrollo de proveedores locales de instrumentación, control experto, mecanización, automatización, robotización, gestión de la información, software de optimización, transmisión de datos, diseño de ingeniería y servicios de apoyo especializado.
- Sistema estructurado para el acompañamiento de empresas locales con capacidades tecnológicas.

ALIANZAS

- Alianza entre Universidades nacionales, extranjeras y centros de excelencia.
- Alianza entre Industria y CFT para la formación de operadores.
- Alianza entre Centros de Investigación / Universidades / Industria / Estado / Proveedores.

INFOGRAFÍA/7

Vigilancia tecnológica
planificación (Patentes)

TOTAL DE PATENTES
PERIODO 2010-2015

43
PATENTES

PRINCIPALES
TENDENCIAS
TECNOLÓGICAS

- Procedimientos de explotación minera subterránea o de superficie.
- Detalles diversos relativos a las máquinas que practican hendiduras o que liberan completamente la materia mineral de la vena.

PATENTES MÁS CITADAS

Patente	Año	Citas
US8144245B2 <i>Method of determining a machine operation using virtual imaging</i>	2012	23
US8567871B2 <i>Method for automatically creating a defined face opening in longwall mining operations</i>	2013	8
US7925474B2 <i>System and methods(s) of blended mine planning, design and processing</i>	2011	7
US8070394B2 <i>Versatile grout bag type of underground support</i>	2011	6
US7853439B2 <i>Mining optimisation</i>	2010	5
US2010104376A1 <i>Grout bag type of underground support</i>	2010	5
US8376467B2 <i>Method for automatically producing a defined face opening in plow operations in coal mining</i>	2013	4
US7681660B2 <i>Arrangement for positioning drilling unit</i>	2010	3
US8886382B2 <i>Method and system for regulating movement of an entity between zones</i>	2014	3
US7883298B2 <i>Supporting device for an advance working or mining machine</i>	2011	3

PAÍSES CON MÁS PATENTES



PRINCIPALES UNIVERSIDADES

- Universidad de Sidney

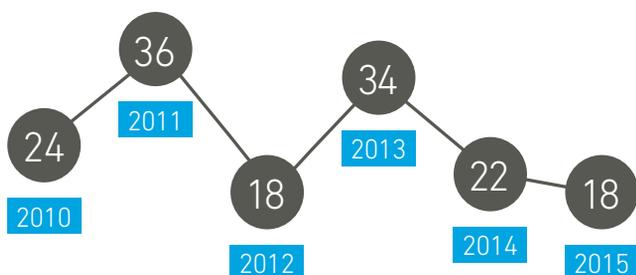
PRINCIPALES EMPRESAS Y/O CENTROS DE I+D

- Sandvik Mining & Constr OY
- Bhp Billiton Innovation PTY
- Sandvik Intellectual Property
- Atlas Copco Rock Drills AB
- FCI Holdings Delaware INC
- Rag AG
- Trimble Navigation LTD
- Soletnache Freyssinet
- Sandvik Tamrock OY

INFOGRAFÍA/8

Vigilancia tecnológica
planificación (Publicaciones)

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS PERIODO 2010-2015



PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

152

PRINCIPALES TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN	Nº
Ecología y Ciencias Ambientales	62
Ingeniería	40
Procesamiento de Minerales	37
Metalurgia / Ingeniería Metalúrgica	17
Recursos Hídricos	15
Geología	14
Ciencias de la Computación	12
Investigación de Operaciones y Ciencias de la Gestión	11
Agricultura	10



PUBLICACIÓN MÁS CITADA

Nitrate leaching from
organic arable crop rotations
is mostly determined by
autumn field management

Autores
Askegaard, M
Olsen, J.E.
Rasmussen, I.A.

PRINCIPALES INSTITUCIONES DE INVESTIGACIÓN	Nº
Academia de Ciencias de China	5
AGH Universidad de Ciencia y Tecnología	4
Instituto de Construcción Mecanizada y Minería de Roca de Varsovia	4
Universidad Técnica de Ostrava	4
Universidad de San Pablo	4
Universidad Politécnica de Silesia	3
Departamento de Agricultura de Estados Unidos	3
Universidad Federal de Oro Negro	3
Universidad de Belgrado	3
Universidad de Columbia Británica	3

PAÍSES CON PUBLICACIONES CIENTÍFICAS



INFOGRAFÍA/9

Vigilancia tecnológica
exploración (Patentes)

TOTAL DE PATENTES
PERIODO 2010-2015

315
PATENTES

PRINCIPALES
TENDENCIAS
TECNOLÓGICAS

- Trabajando con rayo láser
- Sismología; Prospección o detección sísmica o acústica
- Túneles o galerías
- Métodos o disposiciones para la lectura o el reconocimiento de caracteres impresos o escritos o para reconocer patrones
- Sistemas que utilizan la reflexión o rerradiación de las ondas electromagnéticas que no sean ondas de radio

PATENTES MÁS CITADAS

Patente	Año	Citas
US7860301B2 <i>3D imaging system</i>	2010	75
US7756615B2 <i>Traffic management system for a passageway environment</i>	2010	66
US7725253B2 <i>Tracking, auto-calibration, and map-building system</i>	2010	47
US7832126B2 <i>Systems, devices, and/or methods regarding excavating</i>	2010	36
US8325030B2 <i>Heat stress, plant stress and plant health monitor system</i>	2012	28
US8050206B2 <i>Wireless network camera systems</i>	2011	27
US8235110B2 <i>Preconditioning an oilfield reservoir</i>	2012	22
US2011030586A1 <i>Carbonate products for carbon capture and storage</i>	2011	21
US8585786B2 <i>Methods and systems for briquetting solid fuel</i>	2013	20
US2011096168A1 <i>Video delivery systems using wireless cameras</i>	2011	16

PAÍSES CON MÁS PATENTES DE PLANIFICACIÓN



PRINCIPALES UNIVERSIDADES

- Universidad de Sidney
- Instituto Tecnológico de California,
- Universidad China de Minería y Tecnología
- Universidad Jiangnan
- Pontificia Universidad Católica de Chile
- Universidad de Akron
- Universidad de Nevada
- Universidad del Sureste
- Fundación de Investigación de la Universidad de Utah
- Universidad de Ontario Occidental

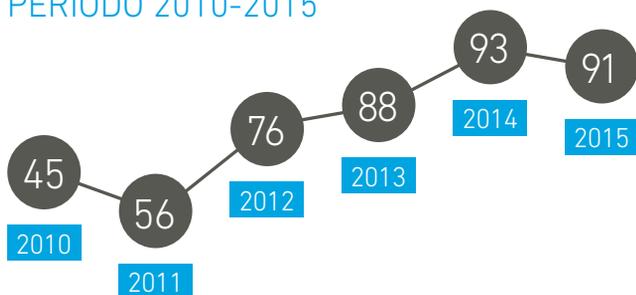
PRINCIPALES EMPRESAS Y/O CENTROS DE I+D

- Caterpillar INC.
- Shell Oil CO.
- Exxonmobil Upstream res CO.
- Foro energy INC.
- Tech resources PTY LTD.
- Sandvik Mining & Constr OY.
- Halliburton Energy Serv INC.
- Safemine AG.

INFOGRAFÍA/10

Vigilancia tecnológica
exploración (Publicaciones)

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS PERIODO 2010-2015



PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

449

PRINCIPALES TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN

Tendencia	N°
Geoquímica y Geofísica	11
Geología	11
Procesamiento de Minerales	11
Minerología	14
Ecología y Ciencias Ambientales	16
Sensores Remotos	19
Geografía Física	62
Ciencias de la Computación	69
Ingeniería	174
Otros tópicos de Ciencia y Tecnología	190



PUBLICACIÓN MÁS CITADA

The "chessboard" classification
scheme of mineral deposits:
Mineralogy and geology from
aluminum to zirconium

Autores
Dill, Harald G.

PRINCIPALES INSTITUCIONES DE INVESTIGACIÓN	Nº
Universidad de Geociencias de China	48
Universidad de Geociencias de China, campus Pekín	40
Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (CSIRO)	38
Servicio Geológico de Canadá	26
Universidad de Geociencias de China, campus Wuhan	20
Universidad de Australia Occidental	20
Academia China de Ciencias Geológicas	18
Academia de Ciencias de China	16
Universidad Islámica Azad de Damavand	12
Universidad de Queen	12

PAÍSES CON PUBLICACIONES CIENTÍFICAS



INFOGRAFÍA/11

Vigilancia tecnológica
operación (Patentes)

TOTAL DE PATENTES
PERIODO 2010-2015

212
PATENTES

PRINCIPALES
TENDENCIAS
TECNOLÓGICAS

- Barrenas especialmente adaptadas para modificar la dirección de perforación; con medios para recoger sustancias.
- Fabricación de capas compuestas, de piezas u objetos a base de polvos metálicos, por sinterizado con o sin compactado.

PATENTES MÁS CITADAS DE OPERACIÓN

Patente	Citas
US7776256B2 <i>Earth-boring rotary drill bits and methods of manufacturing earth-boring rotary drill bits having particle-matrix composite bit bodies</i>	75
US7802495B2 <i>Methods of forming earth-boring rotary drill bits</i>	56
US7954569B2 <i>Earth-boring bits</i>	51
US8517125B2 <i>Impregnated material with variable erosion properties for rock drilling</i>	28
US7913779B2 <i>Earth-boring rotary drill bits including bit bodies having boron carbide particles in aluminum or aluminum-based alloy matrix materials, and methods for forming such bits</i>	23
US8156871B2 <i>Liner for shaped charges</i>	22
US7784567B2 <i>Earth-boring rotary drill bits including bit bodies comprising reinforced titanium or titanium-based alloy matrix materials, and methods for forming such bits</i>	19
US7807099B2 <i>Method for forming earth-boring tools comprising silicon carbide composite materials</i>	18
US8322466B2 <i>Drill bits and other downhole tools with hardfacing having tungsten carbide pellets and other hard materials and methods of making thereof</i>	17
US7977420B2 <i>Reactive material compositions, shot shells including reactive materials, and a method of producing same</i>	14

PAÍSES CON MÁS PATENTES DE PLANIFICACIÓN



PRINCIPALES UNIVERSIDADES

- Universidad China de Minería y Tecnología

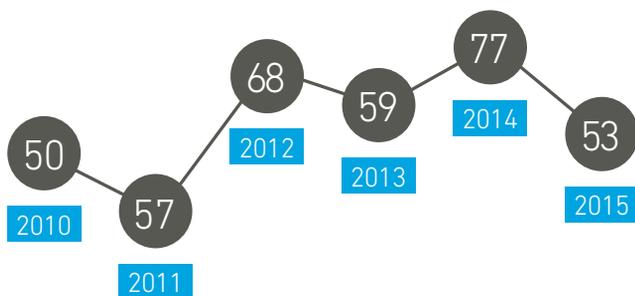
PRINCIPALES EMPRESAS Y/O CENTROS DE I+D

- Baker Hughes INC.
- Halliburton Energy Serv INC.
- Kennametal INC.
- Longyear TM INC.
- Potter Drilling INC.
- Schlumberger technology BV
- Smith International
- TDY IND INC.

INFOGRAFÍA/12

Vigilancia tecnológica
operación (Publicaciones)

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS
PERIODO 2010-2015



PUBLICACIONES
CIENTÍFICAS

364

PRINCIPALES TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN	N°
Ingeniería	153
Geología	97
Procesamiento de Minerales	88
Ecología y Ciencias Ambientales	71
Recursos Hídricos	49
Geoquímica y Geofísica	39
Metalurgia / Ingeniería Metalúrgica	29
Meteorología y Ciencias de la Atmosfera	20
Ciencias de la Computación	15

PUBLICACIÓN
MÁS CITADA

TOUGHREACT Version 2.0:
A simulator for subsurface
reactive transport under
non-isothermal multiphase
flow conditions

Autores
Xu, Tianfu;
Spycher, Nicolas;
Sonnenthal, Eric; et al.

PRINCIPALES INSTITUCIONES DE INVESTIGACIÓN	Nº
Universidad Tarbiat Modares	16
Shahrood Universidad de Tecnología	13
Universidad Islámica Azad de Damavand	12
Instituto de Tecnología de Pekín	10
Universidad China de Minería y Tecnología	9
Academia de Ciencias de China	8
Instituto de Tecnología de India	8
Academia de Ciencias de Rusia	8
Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (CSIRO)	7
Universidad de Agricultura y Tecnología Maharana Pratap	7

PAÍSES CON PUBLICACIONES CIENTÍFICAS



NÚCLEO CONCENTRACIÓN DE MINERALES ANTECEDENTES

De acuerdo a lo planteado anteriormente en este libro, la productividad de la minería ha disminuido por factores que exceden la disminución de la calidad del recurso geológico (medido a través de la razón estéril y la ley del mineral). Así también, la demanda energética general de la industria a nivel nacional se ha incrementado en parte importante por el mayor procesamiento mediante concentración de minerales.

Lo anterior implica que la concentración, etapa del proceso productivo que continúa a la extracción del mineral sulfurado, es un aspecto prioritario a abordar si se desea generar transformaciones en pos de resolver los desafíos de productividad que enfrenta la industria.

El proceso de concentración comienza con la reducción de tamaño o "conminución", la cual está compuesta por dos etapas secuenciales: chancado y molienda húmeda. Éstas constituyen una parte importante del costo asociado al proceso de concentración, debido al alto consumo energético que implica la molienda.

La sección Núcleo Concentración de Minerales fue elaborada en base al trabajo realizado por la Mesa Técnica del núcleo, la que estuvo compuesta por: Agustín Sepulveda, Andrés Pérez, Brian Baird, Carlos Urenda, Christian Schnettler, Claudio Rojas, Cleve Lightfoot, Francisco Abbott, Hugo Toro, Jorge Soto, Murray Canfield, Nury Briceño, Pablo Asiain, Pierre Perrier.

La redacción de esta sección estuvo a cargo del equipo de Fundación Chile, compuesto por: Francisco Klima, Tomás González, Enrique Molina, Philip Wood, Cristóbal Arteaga, Manuel Arre, Nicole Valdebenito, Hernán Araneda.



Fotografía: Cordeiro (Rajio Chuquibambilla)

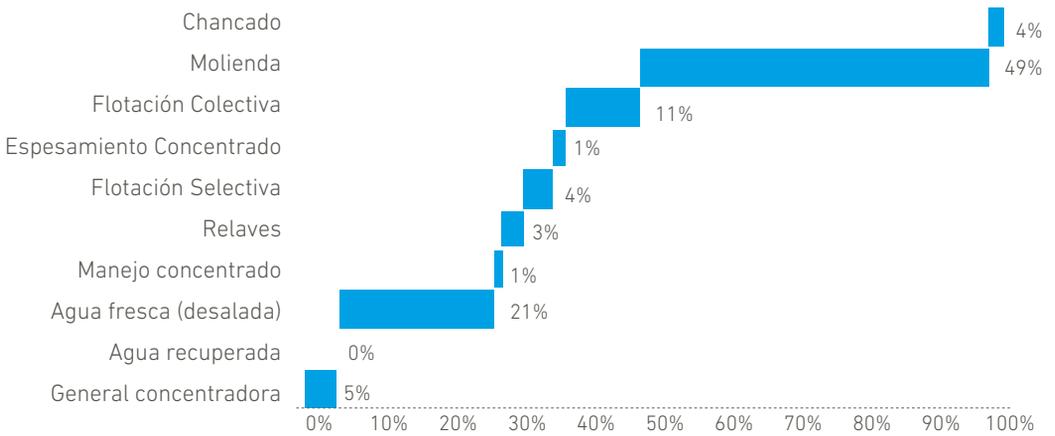
Los minerales sulfurados de cobre que se busca recuperar mediante la concentración por flotación, se encuentran normalmente acompañados de otros minerales de menor o nulo beneficio económico relativo ("ganga"), siendo la separación de éstos el objetivo del proceso de concentración. De esta manera, se obtiene un concentrado de cobre, formado principalmente por sulfuros de cobre tales como la bornita y la calcopirita. La ganga constituye la "cola" del proceso de flotación y son depositados como relaves.

A lo largo de éste proceso, la energía eléctrica, los aceros (en la forma de revestimientos y medios de molienda) y el agua son insumos muy determinantes de los costos, en especial debido al proceso inicial de reducción de tamaño o "conminución".

La molienda genera la mayor parte del gasto asociado al proceso de concentración debido a su consumo energético, de hecho, más de un tercio del consumo de energía eléctrica en la minería metálica corresponde a aquella utilizada en molienda. Esta etapa posee bajos niveles de eficiencia energética (alrededor de 1%). En el caso del chancado la eficiencia alcanza el 50%, mientras que el consumo de energía corresponde aproximadamente al 1% del total requerido para la producción de cobre. Lo anterior se puede observar en el siguiente gráfico.

GRÁFICO/38

Desglose por etapas del
gasto en operación del
proceso de concentración



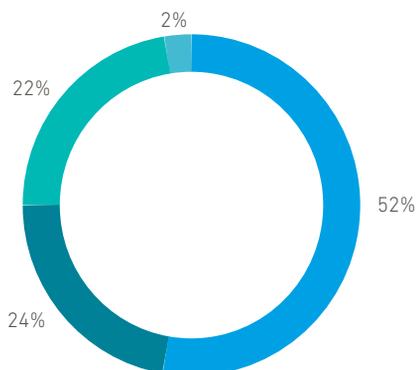
Fuente: Cochilco (2014e)

En relación al consumo de aceros, se calcula que en 2025 alcanzará las 1.077.000 toneladas, lo que equivale a un incremento de 127% respecto al año 2014 (Cochilco, 2014e). El costo actual de medios de molienda corresponde al 22% del costo de operación de esta etapa.

GRÁFICO/39

Costo operacional de la etapa de molienda

- Energía eléctrica molienda
- Servicios de M&R (Mec-Elec)
- Bolas molino 3 y 5
- Resto molienda



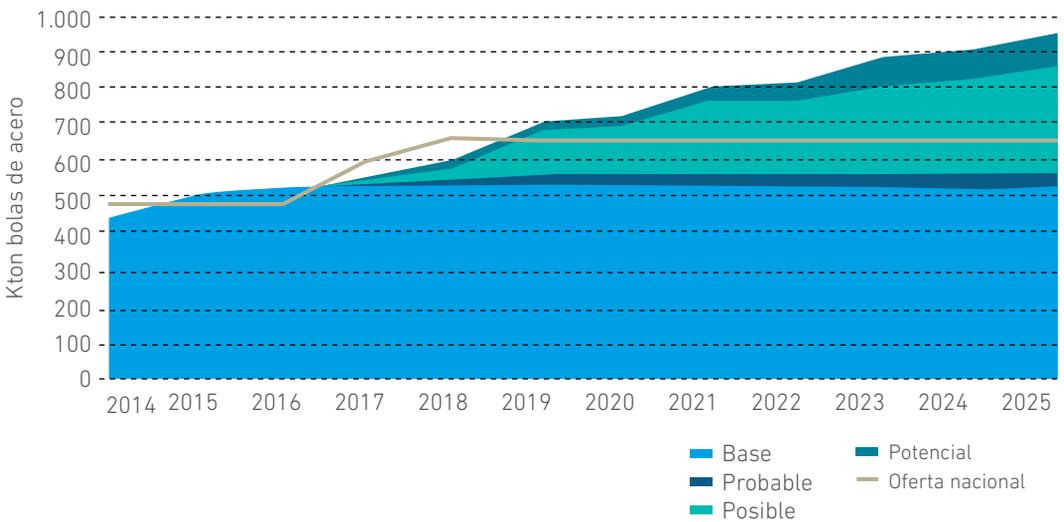
Fuente: Cochilco (2014e)

El agua es también altamente requerida en el proceso de concentración, desde la molienda hasta la flotación y para facilitar el transporte de las colas del proceso (relaves). Tradicionalmente se ha utilizado agua continental, pero en los últimos años se ha incorporado crecientemente el agua de mar, con su consecuente impacto en el consumo de energía.

El siguiente gráfico evidencia que, entre los años 2017 y 2018, la oferta nacional de bolas de molienda superaría a la demanda. No obstante, a partir del año 2019 la oferta nacional sólo alcanzaría para satisfacer aquellos proyectos catalogados como probables y parte de los posibles.

GRÁFICO/40

Balance oferta- demanda de bolas de acero (2014-2025)



Fuente: Cochilco (2015h)

Otros problemas en molienda y flotación se deben a la acumulación de partículas grandes que llegan a las celdas de flotación *rougher* y que puede afectar negativamente el patrón de flujo de la pulpa; generando zonas muertas, reduciendo la recuperación de mineral valioso y aumentando los costos de mantenimiento. La flotación también enfrenta la necesidad de manejar eficientemente partículas finas con un uso eficaz de la energía cinética que demanda el proceso.

Además de los gastos de operación mencionados, el costo de capital (inversión) requerido para la concentración de minerales es alto, pudiendo constituir un “cuello de botella”. En este sentido, la gestión de activos se vuelve particularmente relevante para las plantas de concentración.

Las tecnologías inteligentes¹⁸ aparecen como un medio para optimizar el uso de activos y mejorar la eficiencia de los procesos. Junto con proporcionar seguridad a las personas, estas tecnologías permiten estabilizar los procesos (menor variabilidad), reducir los costos, aumentar la productividad y mejorar la calidad de los productos intermedios y finales.

En la actualidad son de amplia utilización los desarrollos en control multi-variable de chancado, molienda, flotación y espesamiento. Por su parte, los proveedores de servicios de mantenimiento también han ido ajustando sus modelos y prácticas a estas nuevas tendencias, en particular la mantención proactiva: monitoreo y registro de parámetros clave en el desempeño de una máquina, lo cual permite obtener patrones o señales para determinar la condición del equipo y, de esta manera, planificar actividades de mantenimiento específicas y programar el momento oportuno para la intervención del activo.

Si bien la utilización de modelos de falla predictivos para realizar mantenencias programadas es una práctica aceptada, existe la oportunidad de aumentar la productividad si se mejoran los modelos de desgaste y corrosión de componentes críticos, de modo de realizar mantenencias considerando el costo y la probabilidad de falla. Dentro de las tendencias en servicios de mantención, está la organización del mantenimiento centrado en la confiabilidad de los activos, según su contexto operacional y costos de mantención esperados.

¹⁸ Ver Capítulo 6, Sección Minería Inteligente

DESAFÍOS, SOLUCIONES Y LÍNEAS DE I+D

En función de los antecedentes evaluados, el grupo de expertos que participó en los talleres técnicos definió los siguientes desafíos, para los cuales se identificó las soluciones y líneas de I+D que también se presentan a continuación.

Desafío N°1: Aumento de la productividad

Se considera esencial en el contexto presentado avanzar en la gestión de activos, disminuir el consumo de energía y aceros, así como también hacer más eficiente el uso y transporte de agua para aumentar la productividad de la etapa de concentración de minerales.

En particular hay que tener presente que actualmente existen plantas concentradoras operando con bancos de celdas de flotación agitadas con una potencia instalada extraordinariamente alta, las que requieren un análisis crítico del costo-efectividad de su operación.

TABLA/24
Soluciones y líneas de I+D. Desafío:
aumento de la productividad

SOLUCIÓN	LÍNEAS I+D
Gestión de activos.	Monitoreo de equipos principales.
	Manejo de inchancables.
	Mantenibilidad de instrumentación.
	Robotización y operación autónoma.
Disminución del consumo de energía y aceros.	Impacto del uso de agua de mar.
	Fragmentación /tronadura.
	Pre-clasificación.
	Pre-concentración.
	Desarrollo de nuevos equipos y adaptación de tecnologías existentes.
	Eficiencia de clasificación.
	Desarrollo de sensores y control automáticos/optimizante de procesos.
	Impacto del uso de agua de mar.
Eficiencia en el uso y transporte de agua.	Medios de molienda y revestimientos.
	Uso de agua de mar o desalada.
	Disminución del make-up de agua.
	Mayor eficiencia de bombeo.

Fuente: elaboración propia

Desafío N°2: Incremento de los recursos y reservas minerales

Para aumentar la base de recursos y reservas minerales se debe aumentar la recuperación de cobre, el control de impurezas y el desarrollo de nuevas tecnologías.

TABLA /25
Soluciones y líneas de I+D.
Desafío: incremento de los recursos y reservas minerales

SOLUCIÓN	LÍNEAS I+D
Aumento de la ley de cobre en concentrados y de la recuperación de elementos de interés.	Flotación selectiva de subproductos.
	Desarrollo de sensores y control automático/optimizante de procesos.
	Depresión de pirita.
	Flotación de finos, gruesos y arenas.
	Explorar el uso de nanopartículas en flotación.
Control de Impurezas.	Impacto del uso de agua de mar.
	Desarrollo de tecnologías para asegurar la calidad del concentrado.
Desarrollo de nuevas tecnologías.	Desarrollo de nuevos métodos de concentración.

Fuente: elaboración propia

NÚCLEO CONCENTRACIÓN DE MINERALES

2 DESAFÍOS

6 SOLUCIONES

24 LÍNEAS DE I+D

RECURSOS

CAPACIDADES

- Investigación en ciencias básicas.
- Contribución de universidades en investigación, instrumentación y control.
- Capital humano avanzado con especialización en: mecánica de fluidos, ciencias de los materiales, nano ciencias, modelamiento de procesos, robótica, automatización y control, geo química y medio ambiente.
- Formación de operadores y mantenedores en CTFs con capacidades expertas en automatización y robótica.
- Centro de pensamiento tecnológico para la minería.
- Organización para transferencia de conocimiento.

PROVEEDORES

- Potenciar desarrollo de proveedores locales de instrumentación, control experto, mecanización, automatización, robotización, gestión de la información, software de optimización, transmisión de datos, diseño ingeniería, servicios de apoyo especializado.

ALIANZAS

- Alianza entre Universidades nacionales, extranjeras y centros de excelencia.
- Alianza entre Industria y CFT para la formación de operadores.
- Alianza entre Centros de Investigación / Universidades / Industria / Estado / Proveedores.

INFOGRAFÍA/13

Vigilancia tecnológica
chancado (Patentes)

TOTAL DE PATENTES
PERIODO 2010-2015

77
PATENTES

PRINCIPALES
TENDENCIAS
TECNOLÓGICAS

- Tratamiento preliminar de mineral o chatarra
- Métodos o dispositivos auxiliares o accesorios especialmente adaptados para triturar o desintegrar
- Transporte especialmente adaptado a las condiciones subterráneas

PATENTES MÁS CITADAS

Patente	Año	Citas
US7861955B2 <i>Wet-grinding gypsum with polycarboxylates</i>	2011	5
US8960337B2 <i>High impact resistant tool with an apex width between a first and second transitions</i>	2015	5
US8302890B2 <i>Modular ore processor</i>	2012	4
US8022019B2 <i>Method of making proppant used in gas or oil extraction</i>	2011	3
US8434706B2 <i>Overburden removal system with triple track mobile sizer</i>	2013	2
WO2010037215A1 <i>Method and apparatus for processing a sized ore feed</i>	2010	2
EP2319624A1 <i>Method for fine crushing of lump material</i>	2011	2
US2010044276A1 <i>Method and apparatus to create an oil sand slurry</i>	2010	2
DE102009018236A1 <i>Mobile crusher for use in open-cast mining for crushing broken rock, has loading belt connected with hopper, suspended by hydraulic cylinder on upper ring support at raised and lowered position and partially compensated by counterweight</i>	2010	2
US8182601B2 <i>Powder formed from mineral or rock material with controlled particle size distribution for thermal films</i>	2012	1

PAÍSES CON MÁS PATENTES



PRINCIPALES UNIVERSIDADES

- Universidad China de Minería y Tecnología
- Universidad de Houston
- Universidad de Melbourne

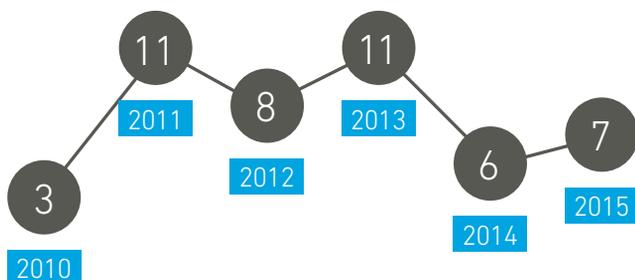
PRINCIPALES EMPRESAS Y/O CENTROS DE I+D

- Tech Resources PTY LTD
- Takraf GMBH
- Unimin Corp
- Joy MM Delaware INC
- Thyssenkrupp Foerdertechnik
- Suncor Energy INC
- Arter Teknolodzhi LTD
- Harnischfeger Tech INC
- Corporación Nacional del Cobre - Codelco

INFOGRAFÍA/14

Vigilancia tecnológica
chancado (Patentes)

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS
PERIODO 2010-2015



PUBLICACIONES
CIENTÍFICAS

46

PRINCIPALES TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN

Tendencia	Nº
Procesamiento de minerales	46
Minerología	20
Ingeniería	19
Metalurgia / Ingeniería Metalúrgica	12
Química	4
Ciencias de los Materiales	2
Ciencia y Tecnología Nuclear	2
Combustibles fósiles	1



PUBLICACIÓN
MÁS CITADA

Large particle effect in
chemical/biochemical heap
leach processes - A review

Autores
Ghorbani, Y.
Becker, M.
Mainza, A.

PRINCIPALES INSTITUCIONES DE INVESTIGACIÓN	Nº
Universidad de Columbia Británica	3
Universidad Tecnológica Chalmers	2
Universidad China de Minería y Tecnología	2
Universidad de Ciudad del Cabo	2
ADP Group of Companies	1
AGH Universidad de Ciencia y Tecnología	1
Amec Americas Limited	1
Aminpro Chile	1
Caspeo	1
Universidad de Geociencias de China	1

PAÍSES CON PUBLICACIONES CIENTÍFICAS



INFOGRAFÍA/15

Vigilancia tecnológica molienta (Patentes)

TOTAL DE PATENTES
PERIODO 2010-2015

113

PATENTES



PRINCIPALES TENDENCIAS TECNOLÓGICAS

- Presas especialmente adaptadas para fines particulares
- Disposición general de separación de la planta
- Sistemas de control especialmente adaptados para triturar o desintegrar
- Trabajo del metal

PATENTES MÁS CITADAS DE MOLIENDA

Patente	Año	Citas
US8147980B2 <i>Wear-resistant metal matrix ceramic composite parts and methods of manufacturing thereof</i>	2012	8
US7757976B2 <i>Method of processing nepheline syenite powder to produce an ultra-fine grain size product</i>	2010	7
US7954734B2 <i>Disruptor system for dry cellulosic materials</i>	2011	7
WO2012016286A1 <i>Sorting mined material</i>	2012	6
US7677079B2 <i>Method and device for sensing wear</i>	2010	6
US7861955B2 <i>Wet-grinding gypsum with polycarboxylates</i>	2011	5
US8960337B2 <i>High impact resistant tool with an apex width between a first and second transitions</i>	2015	5
US7690589B2 <i>Method, system and apparatus for the deagglomeration and/or disaggregation of clustered materials</i>	2010	4
US8302890B2 <i>Modular ore processor</i>	2012	4
US8157193B2 <i>Waterless separation methods and systems for coal and minerals</i>	2012	3

PAÍSES CON MÁS PATENTES DE MOLIENDA



PRINCIPALES UNIVERSIDADES

- Universidad McGill
- Universidad de KwaZulu-Natal,
- Universidad de Queensland
- Universidad de Santiago de Chile
- Universidad de Melbourne

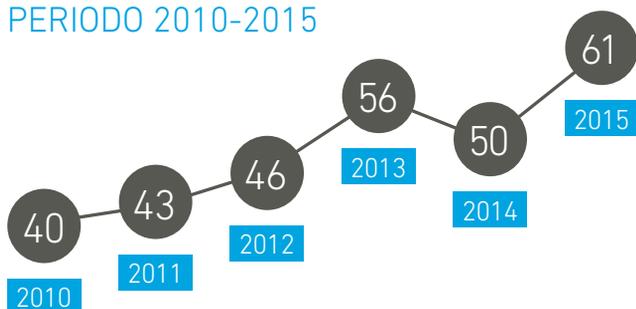
PRINCIPALES EMPRESAS Y/O CENTROS DE I+D

- Smidth & CO AS F L
- Unimin Corp
- Outotec OYJ
- Metso Minerals France SA
- Schlumberher Technology BV
- Tech Resources PTY LTD
- Arter Technology BV
- KDH Humboldt Wedag GMBH

INFOGRAFÍA/16

Vigilancia tecnológica
molienta (Publicaciones)

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS PERIODO 2010-2015



PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

296

PRINCIPALES TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN

Tendencia	N°
Ingeniería	107
Geología	62
Procesamiento de Minerales	54
Ecología y Ciencias Ambientales	53
Recursos Hídricos	34
Geoquímica y Geofísica	33
Metalurgia / Ingeniería Metalúrgica	21
Meteorología y Ciencias de la Atmósfera	19
Sensores Remotos	15
Ciencias de la Computación	13



PUBLICACIÓN MÁS CITADA

Large particle effect in
chemical/biochemical heap
leach processes - A review

Autores
Ghorbani, Y.
Becker, M.
Mainza, A.

PRINCIPALES INSTITUCIONES DE INVESTIGACIÓN	Nº
Universidad China de Minería y Tecnología	10
Universidad de Saskatchewan	9
Instituto Coreano de Geociencias y Recursos Minerales	7
Universidad de Pretoria	7
Academia de Ciencias de China	6
Departamento de Energía de Estados Unidos	6
Universidad de Columbia Británica	6
Centro Nacional para la Investigación Científica de Francia	5
Consejo Superior de Investigaciones Científicas de España	5

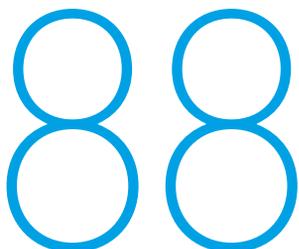
PAÍSES CON PUBLICACIONES CIENTÍFICAS



INFOGRAFÍA/17

Vigilancia tecnológica
flotación (Patentes)

TOTAL DE PATENTES
PERIODO 2010-2015



PATENTES



PRINCIPALES
TENDENCIAS
TECNOLÓGICAS

- Efectos previstos producidos por los agentes de flotación
- Materiales especificados tratados por los agentes de flotación, aplicaciones especificadas

PATENTES MÁS CITADAS

Patente	Año	Citas
US7763166B2 <i>Relocatable countercurrent decantation system</i>	2010	16
US8011514B2 <i>Modified amine-aldehyde resins and uses thereof in separation processes</i>	2011	11
US8424601B2 <i>System and method for minimizing the negative environmental impact of the oilsands industry</i>	2013	10
US8757389B2 <i>Amine-aldehyde resins and uses thereof in separation processes</i>	2014	10
US8133970B2 <i>Oxidized and maleated derivative compositions</i>	2012	9
US9114406B2 <i>Steam driven direct contact steam generation</i>	2015	7
US7922788B2 <i>Process for recovering gold and silver from refractory ores</i>	2011	5
US8025341B2 <i>Mobile oil sands mining system</i>	2011	5
CN102085526B <i>Recycling method of blast furnace dust generated in steel making industry</i>	2012	5
US2011155651A1 <i>Separation of copper minerals from pyrite using air-metabisulfite treatment</i>	2011	2

PAÍSES CON MÁS PATENTES



PRINCIPALES UNIVERSIDADES

- Universidad Técnica de Aquisgrán
- Universidad de Manchester
- Universidad McMaster
- Universidad de Osaka
- Fundación de Investigación de la Universidad de Utah

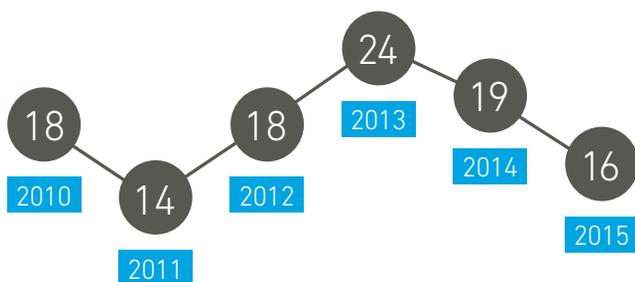
PRINCIPALES EMPRESAS Y/O CENTROS DE I+D

- Barrick Gold Corp
- Basf AG
- BHP Billiton SSM Dev PTY LTD
- Cytec Tech Corp
- Evonik Industries AG
- Ex Tar Technologies INC
- Georgia Pacific Chemicals LLC
- Sumimoto Metal Mining CO

INFOGRAFÍA/18

Vigilancia tecnológica
flotación (Publicaciones)

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS PERIODO 2010-2015



PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

109

PRINCIPALES TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN

Tendencia	N°
Procesamiento de Minerales	60
Ingeniería	46
Minerología	34
Metalurgia / Ingeniería Metalúrgica	22
Ecología y Ciencias Ambientales	15
Química	14
Ciencias de los Materiales	6
Combustibles Fósiles	5
Bioquímica y Biología Molecular	2
Biotecnología y Microbiología Aplicada	2



PUBLICACIÓN MÁS CITADA

Large particle effect in
chemical/biochemical heap
leach processes - A review

Autores
Ghorbani, Y.
Becker, M.
Mainza, A.

PRINCIPALES INSTITUCIONES DE INVESTIGACIÓN	Nº
Universidad de Belgrado	9
Universidad de Queensland	9
Universidad de Ciudad del Cabo	7
Universidad China de Minería y Tecnología	4
AGH Universidad de Ciencia y Tecnología	3
Universidad de Tecnología de Amirkabir	3
Academia de Ciencias de China	3
Centro Nacional de Investigación Ingenieril de China sobre Preparación y Purificación del Carbón	3
Universidad Agrícola de Cracovia	2
Universidad Al-Hussein Bin Talal	2

PAÍSES CON PUBLICACIONES CIENTÍFICAS



NÚCLEO HIDROMETALURGIA ANTECEDENTES

La hidrometalurgia del cobre corresponde a la metodología seguida para procesar los minerales oxidados de cobre (óxidos) y algunas especies de sulfurados. Con ésta, por medio de distintas reacciones físicas y químicas¹⁹, se extrae el cobre del resto del mineral chancado, disolviéndolo en una solución ácida (etapa de lixiviación) para luego continuar a una etapa de extracción por solventes y luego de electro-obtención, produciendo cátodos de cobre de alta pureza.

Los óxidos se forman cerca de la superficie debido a que son minerales derivados del proceso de oxidación de un yacimiento, es decir, del ataque por parte del oxígeno proveniente de la atmósfera en la forma de fluidos oxidantes (agua, aire) (Codelco, 2008).

Ahora bien, la industria ha ido avanzando cada vez más en la profundidad desde la que se extraen los minerales (las minas a rajo abierto están cada vez más profundas y/o convirtiéndose en subterráneas; así también las subterráneas se están profundizando).

¹⁹ Los principales procesos involucrados son: aglomeración, lixiviación ROM, lixiviación HEAP, extracción por solventes y electro-obtención.

La sección Núcleo Hidrometalurgia fue elaborada en base al trabajo realizado por la Mesa Técnica del núcleo, la que estuvo compuesta por: Agustín Sepulveda, Andrés Pérez, Brian Baird, Carlos Urenda, Christian Schnettler, Claudio Rojas, Cleve Lightfoot, Francisco Abbott, Hugo Toro, Jorge Soto, Murray Canfield, Nury Briceño, Pablo Asiain, Pierre Perrier.

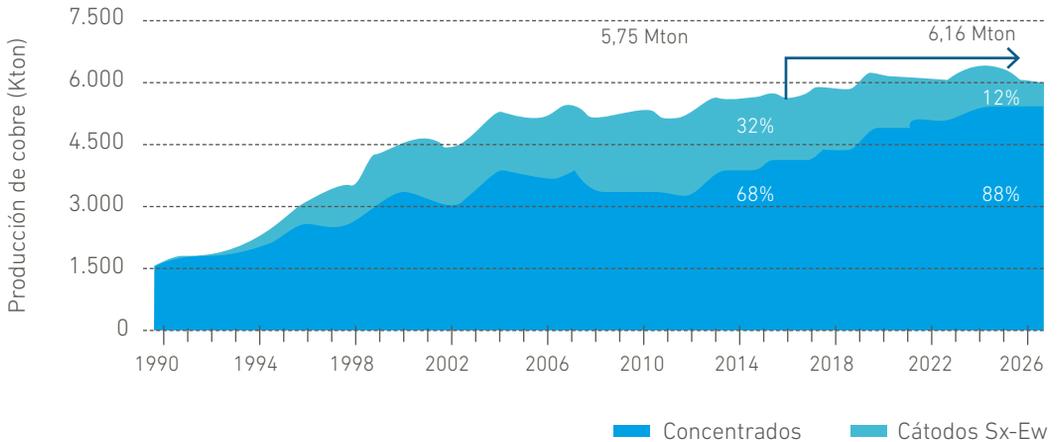
La redacción de esta sección estuvo a cargo del equipo de Fundación Chile, compuesto por: Francisco Klima, Tomás González, Enrique Molina, Philip Wood, Cristóbal Arteaga, Manuel Arre, Nicole Valdebenito, Hernán Araneda.

Con esto, en los últimos años la industria no ha incorporado a su base de recursos nuevos yacimientos lixiviables. Mientras que entre los años 2009 y 2012 la producción promedio de cátodos electro-obtenidos fue de 2 millones de toneladas, en 2013 y 2014 se obtuvo alrededor de 1,9 millones y 1,8 millones respectivamente.

De la misma forma, las carteras de proyectos y los planes de desarrollo futuro de las empresas mineras están basados fuertemente en el aprovechamiento de minas que ya se encuentran

en operación (proyectos *brownfield*), donde la mayor profundización de sus yacimientos conllevará el agotamiento de minerales oxidados. Lo anterior, sumado al deterioro en la calidad del mineral, tanto de las leyes como de sus características de lixivabilidad, lleva a que en estimaciones recientes para el año 2026 se prevea que sólo un 12% de la producción esperada de cobre corresponda a cátodos electro-obtenidos, generándose una importante capacidad ociosa en las plantas de electro-obtención (Cochilco, 2015i).

GRÁFICO/41
Producción esperada de
cobre en Chile al 2026



Fuente: Cochilco (2015e)

En los próximos años el desarrollo de la industria minera nacional se basará en explotar reservas mineras sulfuradas (mayoritariamente calcopiríticas), para las cuales, actualmente, se utilizan los procesos de concentración de minerales. Sin embargo, en este escenario futuro, la hidrometalurgia también deberá abordar el tratamiento de minerales sulfurados.

Frente a la concentración, la hidrometalurgia es poco competitiva, dado que la primera permite una recuperación superior al 90% en cuestión de horas y la segunda alcanza entre 35% y 60% de recuperación en periodos mayores a 300 días. En este sentido, se hace evidente que es crucial para la hidrometalurgia contar con tecnologías que permitan aumentar la eficiencia en relación al tiempo de recuperación.

Junto con lo anterior, se debe tener presente que la energía es el insumo más relevante en términos de costos en el proceso hidrometalúrgico. Ésta representa, según el precio de compra, entre el 25% y el 30% del total (con entre 80% y 90% de este gasto generado por la electro-obtención).

En el caso del agua, si bien su consumo es relativamente bajo (0,1 a 0,2 m³ por tonelada de mineral), las posibles restricciones futuras de uso asociadas a los desafíos presentados anteriormente en este libro y a las implicancias que podría tener en la lixiviación de recursos sulfurados de baja ley, podrían frenar la implementación de este proceso.

Finalmente cabe mencionar que mejoras significativas de productividad podrían rentabilizar la explotación de recursos marginales que hoy no se entienden como parte ni de los recursos minerales ni de las reservas. En otras palabras, quiebres tecnológicos podrían permitir la conversión de estos pasivos en activos, como ya ha sucedido anteriormente.

Durante las últimas décadas se desarrollaron nuevos procesos y tecnologías muy significativas en el campo de la hidrometalurgia. Hacia fines del año 1980 entró en funcionamiento en Lo Aguirre, Región Metropolitana, una planta productora de cátodos basada en nuevas tecnologías para ese entonces, la que combinaba un novedoso proceso de lixiviación en pilas *Thin Layer* (TL), con operaciones de extracción por solventes y electro-obtención. Esta planta fue la primera en el mundo en aplicar, a escala comercial, el proceso de lixiviación en pilas TL, además de ser la primera aplicación comercial en Chile del proceso de extracción por solventes y electro-obtención de cobre.

Este nuevo proceso hizo rentable la extracción de cobre desde minerales con leyes menores a 0,5%, como ocurre actualmente en faenas como El Abra, Radomiro Tomic y Lomas Bayas. A lo largo de los años ochenta y noventa, la lixiviación en pilas TL integrada con extracción por solventes y electro-obtención se convirtió en una de las innovaciones más importantes de la minería y metalurgia del cobre, tanto en Chile como en el mundo.



Fotografía Codeleo (Ciudad El Salvador)

DESAFÍOS, SOLUCIONES Y LÍNEAS DE I+D

En función de los antecedentes evaluados, el grupo de expertos que participó en los talleres técnicos definió los siguientes desafíos, para los cuales se identificó posibles soluciones y líneas de I+D.

Desafío N°1: Cuidado del medio ambiente y responsabilidad social

Un aspecto de suma importancia corresponde a la creciente necesidad de contar con "licencia social" para operar, es decir, contar con la aceptación por parte de las comunidades sobre las operaciones, condicionada, entre otras cosas, por el cumplimiento pleno de la normativa ambiental. Debido a esto, el adecuado manejo de los residuos de hidrometalurgia es una práctica fundamental para la industria.

TABLA/26

Soluciones y líneas de I+D. Desafío: cuidado del medio ambiente y responsabilidad social

SOLUCIÓN	LÍNEAS I+D
Manejo de residuos industriales sólidos, líquidos y gaseosos.	Manejo de residuos.

Fuente: elaboración propia

Desafío N°2: Aumento de la productividad

Mejorar la eficiencia de procesos, en términos de la cinética de extracción de cobre y el consumo de ácido y energía, es y seguirá siendo un aspecto muy relevante para enfrentar la disminución de las leyes, la componente soluble de los minerales y la presencia de especies consumidoras de ácido.

TABLA/27

Soluciones y líneas de I+D. Desafío: aumento de la productividad

SOLUCIÓN	LÍNEAS I+D
Disminución del consumo de energía y agua.	Consumo de energía en EW.
Desarrollo de nuevas tecnologías.	Nuevos procesos de lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención.

Fuente: elaboración propia

Desafío N°3: Incremento de los recursos y reservas minerales

La existencia de especies alteradas con baja presencia de cobre soluble, la aparición de arcillas que afectan la percolación de los lechos de lixiviación y de minerales de cobre refractarios (sulfuros primarios del tipo calcopirita), son aspectos que se deberán enfrentar cada vez más.

En este contexto, la base de recursos y reservas minerales seguirá determinando fuertemente la productividad y la proyección del negocio, por lo que resulta de suma importancia disponer de métodos de tratamiento más eficientes, versátiles y capaces de responder a la variabilidad del mineral

TABLA/28
Soluciones y líneas de I+D.
Desafío: incremento de los recursos y reservas minerales

SOLUCIÓN	LÍNEAS I+D
Uso de futura capacidad ociosa	Lixiviación de minerales de baja ley (ROM, óxidos, sulfuros) y ripios.
	Lixiviación de concentrados.
	Lixiviación de metal blanco, polvos.
	Lixiviación de minerales alterados, arcillosos, generadores de finos.
	Lixiviación Insitu, Inplace.
Recuperación de cobre y metales preciosos	Recuperación de metales preciosos.
Desarrollo de nuevas tecnologías	Nuevos procesos de lixiviación, extracción por solventes y electro-obtención.

Fuente: elaboración propia



NÚCLEOS HIDROMETALURGIA

3 DESAFÍOS

6 SOLUCIONES

10 LÍNEAS DE I+D

RECURSOS

CAPACIDADES

- Investigación en ciencias básicas.
- Contribución de universidades en investigación, instrumentación y control.
- Capital humano avanzado con especialización en: físico química de superficies, nano ciencias, mineralo-química, electroquímica, modelamiento de procesos, gestión de activos, geo química y medio ambiente.
- Formación de técnicos en CTFs con capacidades expertas operadores y mantenedores.
- Centro de pensamiento tecnológico para la minería.

PROVEEDORES

- Potenciar desarrollo de proveedores locales de instrumentación, control experto, mecanización, automatización, robotización, gestión de la información, software de optimización, transmisión de datos, diseño de ingeniería, servicios de apoyo especializado.
- Sistema estructurado para el acompañamiento de empresas locales con capacidades tecnológicas.

ALIANZAS

- Alianza entre Universidades nacionales, extranjeras y centros de excelencia.
- Alianza entre Industria y CFT para la formación de operadores y mantenedores.
- Alianza entre Centros de Investigación / Universidades / Industria / Estado / Proveedores.

INFOGRAFÍA/19

Vigilancia tecnológica electro-
obtención (Patentes)

TOTAL DE PATENTES
PERIODO 2010-2015

61
PATENTES



PRINCIPALES
TENDENCIAS
TECNOLÓGICAS

No se identifican

PATENTES MÁS CITADAS

Patente	Año	Citas
US7901561B2 Method for electrolytic production and refining of metals	2011	12
US7846233B2 Leaching process for copper concentrates	2010	11
US8658007B2 Oxygen-producing inert anodes for SOM process	2014	4
US7846309B2 Metal electrowinning cell with electrolyte purifier	2010	3
US7740745B2 Non-carbon anodes with active coatings	2010	3
CN101717969A Alloy material suitable for inert anode of metal fused-salt electrolysis cell	2010	3
US8784639B2 Electrochemical process for the recovery of metallic iron and chlorine values from iron-rich metal chloride wastes	2014	2
US8598473B2 Bus bar electrical feedthrough for electrorefiner system	2013	2
US2011000782A1 Aluminum recovery process	2011	2
US8070851B2 Chloride heap leaching	2011	1

PAÍSES CON MÁS PATENTES



PRINCIPALES UNIVERSIDADES

- Fundación de Investigación y Desarrollo de la Universidad Nacional de Seúl
- Universidad de Alabama
- Universidad de Boston
- Universidad de Columbia Británica
- Universidad Libre de Bruselas

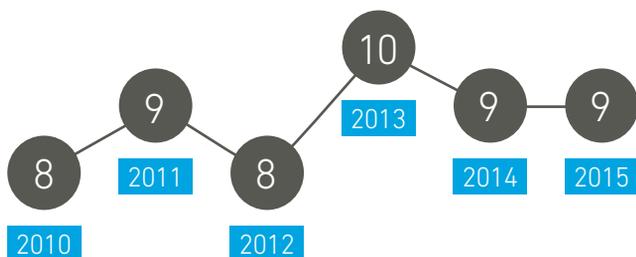
PRINCIPALES EMPRESAS Y/O CENTROS DE I+D

- Alcan INT LTD
- Aluminum Of America
- Aluminum Corp of China LTD
- BHP Billiton SALTD
- Elkem AS
- Green Metals LTD
- Moltech Invent SA
- Pechiney Aluminium

INFOGRAFÍA/20

Vigilancia tecnológica electro-
obtención (Patentes)

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS
PERIODO 2010-2015



PUBLICACIONES
CIENTÍFICAS

53

PRINCIPALES TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN

PRINCIPALES TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN	N°
Metalurgia / Ingeniería Metalúrgica	30
Ingeniería	11
Química	8
Ciencias de los materiales	7
Electroquímica	3
Instrumentación e instrumentos	2
Procesamiento de minerales	2
Óptica	2
Física	2
Minerología	1

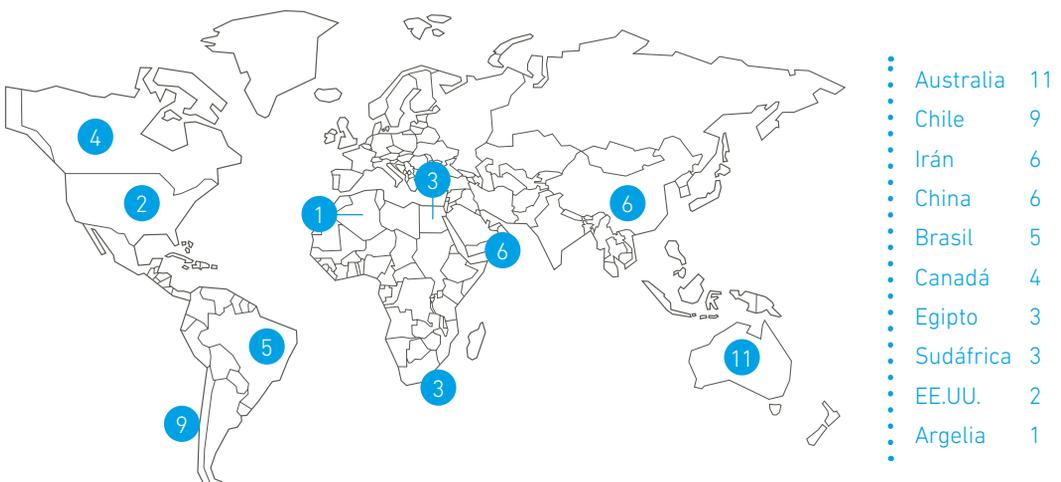
PUBLICACIÓN
MÁS CITADA

The influence of alloying
elements on the
electrochemistry of lead
anodes for electrowinning
of metals: A review

Autores
Clancy, M
Bettles, C.J.
Stuart, A.

PRINCIPALES INSTITUCIONES DE INVESTIGACIÓN	N°
Universidad de Concepción	7
Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (CSIRO)	4
Glencore Xstrata	4
Universidad James Cook	4
Universidad Federal de San Carlos	4
Universidad de Alejandría	3
Universidad Laval	3
Universidad de Monash	3
Universidad de Tecnología de Amirkabir	2
Sincrotrón Australiano	2

PAÍSES CON PUBLICACIONES CIENTÍFICAS



INFOGRAFÍA/21

Vigilancia tecnológica extracción
por solventes (Patentes)

TOTAL DE PATENTES
PERIODO 2010-2015

141
PATENTES



PRINCIPALES
TENDENCIAS
TECNOLÓGICAS

- Tecnologías para la gestión de residuos sólidos
- La obtención de metales de tierras raras
- La obtención de metales nobles
- Compuestos de metales de tierras raras

PATENTES MÁS CITADAS DE FLOTACIÓN

Patente	Año	Citas
US8177881B2 <i>Method for extracting and separating rare earth elements</i>	2012	8
US7829044B2 <i>Phosphoramides, process for producing the same, and use thereof</i>	2010	7
EP1752550B1 <i>Method of recovering nickel and cobalt</i>	2014	5
US7686865B2 <i>Method and system for recovering metal from metal-containing materials</i>	2010	6
US7935322B2 <i>Method and system for recovering metal from metal-containing materials</i>	2011	4
WO2012149642A1 <i>Processes for recovering rare earth elements from various ores</i>	2012	3
US8916116B2 <i>Separation of iron from value metals in leaching of laterite ores</i>	2014	3
US8147782B2 <i>Producing nickel hydroxide suitable for pelletization with iron-containing ore and for stainless steel manufacture</i>	2012	3
US7750066B2 <i>Treatment of aqueous compositions containing contaminants</i>	2010	4
JP4524394B2 <i>Extraction Method Of Am, Cm And Ln Existing In Acidic Solution</i>	2010	7

PAÍSES CON MÁS PATENTES DE FLOTACIÓN



PRINCIPALES UNIVERSIDADES

- Universidad de Nevada
- Universidad de Columbia Británica
- Universidad del Centro Sur de China
- Universidad Cristiana Chung Yuan
- Universidad de KwaZulu-Natal
- Universidad Católica de Lovaina
- Universidad Complutense de Madrid
- Universidad de Nantes
- Universidad Northwestern
- Universidad de Osaka

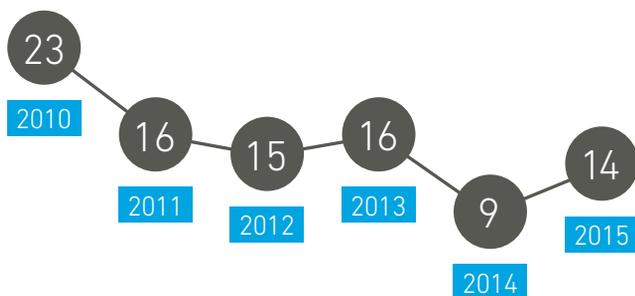
PRINCIPALES EMPRESAS Y/O CENTROS DE I+D

- Cognis Ip Man GMBH
- Commw Scient IND RES ORG
- Cytec Tech Corp
- Freeport McMoran Corp
- JX Nippon Mining & Metals Corp
- Nippon Mining CO
- Outotec OYJ
- Porcess Res Ortech INC

INFOGRAFÍA/22

Vigilancia tecnológica extracción
por solventes (Publicaciones)

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS PERIODO 2010-2015



PUBLICACIONES CIENTÍFICAS

93

PRINCIPALES TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN

PRINCIPALES TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN	Nº
Ingeniería	38
Química	36
Metalurgia / Ingeniería Metalúrgica	26
Procesamiento de Minerales	11
Ecología y Ciencias Ambientales	5
Minerología	5
Ciencias y tecnologías de los alimentos	3
Recursos hídricos	3
Bioquímica y biología molecular	2
Espectroscopía	1

PUBLICACIÓN MÁS CITADA

Removal of transition metals from rare earths by solvent extraction with an undiluted phosphonium ionic liquid: separations relevant to rare-earth magnet recycling

Autores
Vander Hoogerstraete, T
Wellens, S.
Verachtert, K

PRINCIPALES INSTITUCIONES DE INVESTIGACIÓN	Nº
Universidad de Columbia Británica	6
Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (CSIRO)	5
Universidad del Centro Sur de China	4
Consejo para la Investigación Científica e Industrial	4
Universidad de Tecnología de Poznan	4
Instituto de Geociencia y Recursos Minerales de Corea del Sur	3
Laboratorio Metalúrgico Nacional de India	3
Universidad de Teherán	3
Universidad de Damasco	2
Universidad de Tecnología de Wroclaw	2

PAÍSES CON PUBLICACIONES CIENTÍFICAS



INFOGRAFÍA/23

Vigilancia tecnológica
lixiviación (Patentes)

TOTAL DE PATENTES
PERIODO 2010-2015

291
PATENTES

PRINCIPALES
TENDENCIAS
TECNOLÓGICAS

- Cambio de iones en el cual se forma un complejo o un quelato; Utilización de una sustancia como cambiador de iones que forma complejos o quelatos
- Tratamiento de una sustancia en vista de mejorar sus propiedades de cambio o de iones que forma complejos o quelatos

PATENTES MÁS CITADAS

Patente	Año	Citas
US8852777B2 Methods for the preparation and purification of electrolytes for redox flow batteries	2014	20
US7892505B2 Hydrometallurgical process for the treatment of metal-bearing sulfide mineral concentrates	2011	17
US7858056B2 Recovering metals from sulfidic materials	2010	12
US7846233B2 Leaching process for copper concentrates	2010	11
US2010155330A1 Target material removal using rare earth metals	2010	11
US7771700B2 Target material removal using rare earth metals	2010	11
US7686866B2 Recovery of copper from chalcopyrite	2010	8
WO2011128061A1 Functionalised materials and uses thereof	2011	8
US8329124B2 Metal Extractant Reagents Having Increased Resistance To Degradation	2012	7
US7993613B2 More efficient ether modifiers for copper extractant formulations	2011	7

PAÍSES CON MÁS PATENTES DE LIXIVIACIÓN



PRINCIPALES UNIVERSIDADES

- Universidad de Columbia Británica
- Universidad de Alberta
- Universidad Autónoma Metropolitana de México
- Universidad de Ciudad del Cabo
- Universidad del Centro Sur de China
- Universidad Donghua
- Universidad James Cook
- Universidad de Kingston

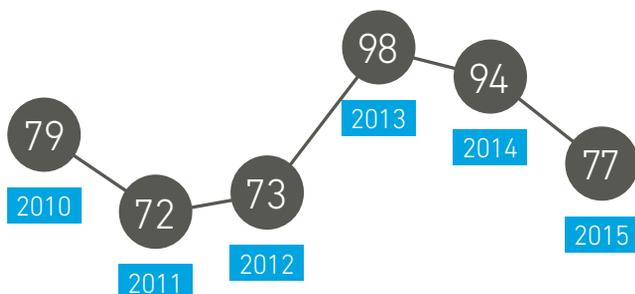
PRINCIPALES EMPRESAS Y/O CENTROS DE I+D

- Freeport McMoran Corp
- JX Nippon Mining & Metals Corp
- Outotec OYJ
- Nippon Mining Corp
- Cognis IP Man GMBH
- Basf AG
- Cytec Tech Corp
- Outotec Finland OY

INFOGRAFÍA/24

Vigilancia tecnológica
lixiviación (Publicaciones)

PUBLICACIONES CIENTÍFICAS
PERIODO 2010-2015



PUBLICACIONES
CIENTÍFICAS

493

PRINCIPALES TENDENCIAS DE INVESTIGACIÓN

Tendencia	N°
Metalurgia / Ingeniería Metalúrgica	181
Ingeniería	157
Ecología y Ciencias Ambientales	115
Procesamiento de Minerales	110
Química	65
Minerología	62
Ciencias de los Materiales	54
Biotechnología y Microbiología Aplicada	14
Recursos Hídricos	13
Toxicología	11



PUBLICACIÓN
MÁS CITADA

Low grade ores - Smelt,
leach or concentrate?

Autores
Norgate, T
Jahanshani, S

PRINCIPALES INSTITUCIONES DE INVESTIGACIÓN	N°
Universidad del Centro Sur de China	31
Consejo para la Investigación Científica e Industrial de Sudáfrica	22
Organización de Investigación Científica e Industrial de la Commonwealth (CSIRO)	18
Universidad de Ciencia y Tecnología de Kunming	13
Universidad de Columbia Británica	12
Academia de Ciencias de China	11
Universidad de Concepción	10
Universidad de Quebec	10
Universidad de Utah	10
Sistema de Educación Superior de Utah	10

PAÍSES CON PUBLICACIONES CIENTÍFICAS





06

NÚCLEOS
HABILITADORES

Son aquellas
dimensiones que,
sin ser exclusivas
del proceso minero,
condicionan la
capacidad de la
industria para
llevar a cabo su
plan de desarrollo

CAPITAL HUMANO

Como se ha expresado a lo largo de este libro, el capital humano es un eje transversal que cruza gran parte de los desafíos actuales y futuros de la industria minera nacional. En efecto, el capital humano se constituye en un elemento habilitador para materializar los futuros proyectos de inversión, mejorar la productividad de la industria e incorporar nuevas tecnologías a los procesos de la minería y sus proveedores. Avanzar hacia una minería innovadora depende, en gran medida, de la calidad y cantidad del capital humano disponible para ello.

En esta sección se analizan los desafíos del país y de la industria minera en materia de capital humano. Para ello, se distingue entre capital humano especializado -concepto acuñado para hacer alusión a todos aquellos técnicos y profesionales que, sin estar dedicados a labores de desarrollo científico y tecnológico, poseen un nivel de especialización que les permite trabajar en minería y capital humano avanzado -que involucra a los recursos humanos dedicados a labores de investigación y desarrollo.

CAPITAL HUMANO ESPECIALIZADO

Las condiciones de operación de la industria minera se han vuelto cada vez más exigentes, y la materialización de los proyectos futuros requerirá, entre otros aspectos, del desarrollo de nuevas tecnologías y de alinear la calidad de la formación del capital humano con los nuevos requerimientos de la industria.

En dicho contexto, el desafío de capital humano especializado asociado a la industria minera se circunscribe principalmente en tres dimensiones:

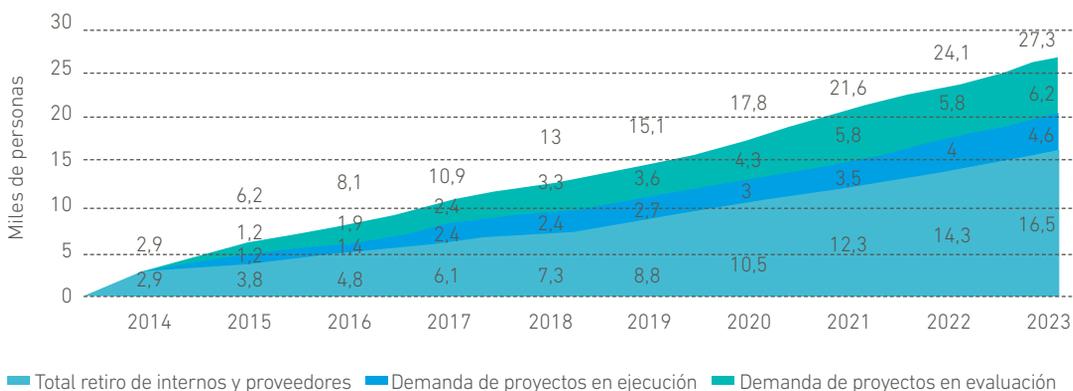
La redacción de esta sección estuvo a cargo del equipo de Fundación Chile compuesto por: Francisco Klima, Tomás González, Paulina Peña, Nicole Valdebenito y Hernán Araneda.

cantidad, calidad y ajuste de la formación a los nuevos requerimientos de la industria.

En relación a la cantidad, el Estudio de Fuerza Laboral de la Gran Minería Chilena (Consejo de Competencias Mineras, 2014) estima que al año 2023 la minería requerirá alrededor de 27.000 nuevos trabajadores, concentrándose las mayores brechas en base a oferta y demanda en los perfiles de mantenedores y operadores de equipos móviles y fijos. Esta demanda incremental se explica por la creación de nuevos puestos de trabajo y la necesidad de reponer dotación por las altas tasas de retiro que se proyectan para los próximos años.

GRÁFICO/42

Demanda acumulada de internos y proveedores (Miles de personas)



Fuente: Consejo Minero (2014)

Aun cuando la industria se encuentra hoy en un período de contracción debido a la disminución del precio del cobre, contar con una cantidad de trabajadores especializados acorde a las aspiraciones de largo plazo de la industria se vuelve un aspecto central que el país y la industria minera deben abordar.

En relación a la calidad del capital humano, la evidencia en América Latina demuestra que los progresos en la cobertura, sin mejoras en la calidad o pertinencia, no han sido eficaces para promover el desarrollo productivo (Crespi, Fernández-Arias & Stein, 2014). En el caso de la minería, las mejoras de productividad están asociadas fuertemente a la incorporación de trabajadores mejor formados.

Por último, la formación de capital humano deberá ir ajustándose a los nuevos requerimientos de la industria minera. En efecto, el uso en minería de robótica, automatización, TICs, entre otros ámbitos tecnológicos, requerirá de la formación de nuevos perfiles de trabajadores que sean capaces de operar estas nuevas tecnologías. Ello impone un enorme desafío al mundo formativo, el cual debe reaccionar oportunamente ante el cambio tecnológico de la minería en Chile (Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation [CSIRO], 2014)²⁰.

Abordar dichos desafíos supone superar una serie de problemas que dificultan un ajuste entre la demanda y oferta de capital humano con calidad y pertinencia.

En primer lugar, no existe suficiente conexión entre las necesidades del sector productivo y las habilidades y capacidades que se desarrollan en el mundo formativo. La ausencia de estos vínculos se constituye en uno de los principales problemas para el desarrollo de la educación técnica (Crespi, Fernández-Arias & Stein, 2014).

Ello implica que las posibilidades de las compañías mineras para encontrar personal con habilidades y competencias para producir de forma competitiva son bajas. Por lo general, las compañías deben invertir recursos para capacitar nuevamente a los egresados del sistema de educación según sus propios requerimientos, lo cual tiene una incidencia directa en la productividad y costos de contratación.

En segundo lugar, las instituciones de formación técnica deben avanzar en la calidad y pertinencia de sus programas. La Educación Media Técnico Profesional (EMTP) no cuenta con criterios definidos respecto de las condiciones mínimas que una unidad educativa debe cumplir para impartir una determinada oferta de especialidades y que sean verificadas durante su reconocimiento oficial (Sevilla, 2012).

²⁰ Sobre el impacto de la minería del futuro, en el rol del mantenedor, ver por ejemplo el informe de CRC Mining (2014), titulado *Maintainer of the Future*.

Por su parte, a pesar de que las Instituciones de Educación Superior (IES) están regidas por el Sistema de Aseguramiento de la Calidad de la Educación Superior, este mecanismo no incorpora las especificidades propias de la educación técnica ni su adecuación con el mundo formativo.

En tercer lugar, un número relevante de establecimientos e instituciones cuentan con equipamientos inferiores a los estándares de formación requeridos por la industria (Sevilla, 2012). Los Centros de Formación Técnica (CFT), Institutos Profesionales (IP) y universidades con oferta de programas en temas tecnológicos relevantes para la minería, poseen pedagogías convencionales, no basadas en competencias y con escaso equipamiento para un aprendizaje para el trabajo que simule condiciones reales de operación o mantenimiento (ver Consejo de Competencias Mineras, 2014, pp. 43-59). Más aún, no se cuenta en el país con estándares validados para definir equipamiento para las especialidades mineras de nivel medio y superior.

Por último, no existen mecanismos efectivos de conexión institucional y curricular entre la Educación Media Técnico Profesional y las carreras Técnicas de Nivel Superior, impidiendo el desarrollo de trayectorias formativas entre ambos niveles. Esto aumenta el costo de la formación y reduce la eficiencia de la inversión en capital humano y del mercado del trabajo.

Abordar estas problemáticas y desafíos requiere de un esfuerzo conjunto que involucre al sector minero, las instituciones de formación y el Estado.

CAPITAL HUMANO AVANZADO

El capital humano avanzado involucra los recursos humanos asociados a la ciencia y la tecnología, así como el conjunto de profesionales técnicos o universitarios que avanzan en formación o perfeccionamiento luego de la educación formal de pregrado. Todos ellos son esenciales para hacer frente a los desafíos de los sectores productivos y la sociedad en pos del desarrollo (Consejo Nacional de Innovación para la Competitividad [CNID], 2009).

Durante los últimos años el número de postgraduados en programas de magíster y doctorado se ha incrementado considerablemente, lo cual se explica por los programas de becas que ha impulsado la Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica (Conicyt). El objetivo tras esta política de Capital Humano Avanzado apunta a incrementar el número de investigadores y profesionales con alta preparación en todas las áreas del conocimiento para el desarrollo de Chile y su participación activa en el mundo globalizado (Conicyt, 2016).

Ilustrar el panorama actual del capital humano avanzado en minería en Chile es una tarea compleja debido a la dificultad que implica relacionar los ámbitos de conocimiento en los que se enmarcan los investigadores con las actividades económicas y procesos productivos. Aún así, existe información para establecer algunos lineamientos al respecto.

A continuación se presenta un análisis de encuestas nacionales relacionadas a personal en I+D y doctores residentes en Chile, los resultados de una consulta realizada por Fundación Chile a centros de I+D nacionales y la revisión de los programas de postgrado vinculados a minería existentes en el país.

De la información recopilada por Fundación Chile y los datos públicos disponibles, se puede estimar que el personal dedicado a labores de I+D en minería oscila en torno a las 600 personas. Es necesario considerar que este número puede estar subestimado, pues no incorpora a los investigadores que trabajan en empresas proveedoras de la minería.

De acuerdo a la **Cuarta Encuesta Nacional sobre Gasto y Personal en I+D** el personal dedicado a I+D puede clasificarse en tres categorías: “investigadores”, “técnicos y personal de apoyo” y “otro personal de apoyo” (Ministerio de Economía

[Minecon], 2015). Aun cuando la información entregada por esta encuesta no permite desagregar los resultados para cuantificar el número de investigadores asociados a la minería, sí es posible hacerlo para el sector empresas.

La siguiente tabla muestra que existen 123 personas, en jornada completa equivalente (JCE), trabajando en labores de I+D en compañías mineras, lo cual corresponde sólo a un 3% del total de personal de I+D del país que trabaja en empresas. De ellos, 49 son investigadores y las restantes 74 personas realizan labores de apoyo.

TABLA/29
Personal dedicado a I+D en empresas mineras (2013)

	INVESTIGADORES	TÉCNICOS Y PERSONAL DE APOYO	OTRO PERSONAL DE APOYO	TOTAL
Minería	49	39	35	123
Total	1.448	1.413	1.091	3.953
Relación respecto del total país	3,4%	2,8%	3,2%	3,1%

Fuente: elaboración propia en base a Minecon (2015)

Se estima que el número de investigadores en Chile que realizan labores de I+D en empresas mineras representa sólo el 3,6% del total de investigadores que en Australia desempeñan esta labor²¹.

Complementariamente, la **Primera Encuesta Trayectoria de Profesionales con Grado de Doctor Residentes en Chile**, revela que al año 2011 existían en el país 7.670 profesionales con grado de doctor trabajando en empresas, universidades y centros de investigación. De ellos,

351 declararon el ámbito "recursos minerales" como uno de sus objetivos de investigación (Minecon, 2015a).

La "extracción de recursos minerales", "sostenibilidad ambiental en actividades mineras" y "tratamiento de primera etapa en actividades mineras" son los principales ámbitos de investigación declarados por los doctores, con un 45%, 44% y 37% respectivamente. Le siguen los sub-objetivos "otros recursos minerales" con 25% y "exploración minera" con 17%.

²¹ Estimación realizada en base al informe "Business Expenditure on Research and Development by industry sector", (2013-14).

TABLA/30 Objetivo de la investigación desagregado

SUB-OBJETIVO	CANTIDAD	% DEL TOTAL QUE REALIZA I+D
Exploración minera	59	17%
Extracción de recursos minerales	159	45%
Tratamiento de primeras etapas de minerales	131	37%
Sostenibilidad ambiental en actividades mineras	153	44%
Otros recursos minerales	87	25%
Total	351	

Fuente: Minecon (2015a)

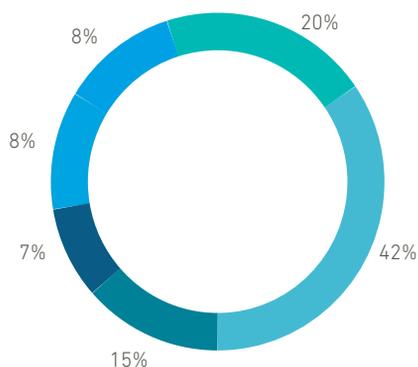
Finalmente, un aspecto relevante a analizar se refiere a la cantidad y características de los programas de postgrado vinculados a minería que se imparten en universidades chilenas.

Actualmente existen 40 programas de postgrados vinculados a minería. De ellos, 28 son programas de doctorado, 11 magíster y un postítulo. Del total de programas, seis se enmarcan en el área de ciencias y los 34 restantes en ámbitos de tecnología.

El siguiente gráfico muestra la distribución de los programas de postgrado clasificados por área del proceso minero, donde el ámbito de mantenimiento es el que posee la mayor cantidad de programas asociados (17), seguido por geología y metalurgia, con 8 y 6 programas respectivamente (ver gráfico 43).

GRÁFICO/43 Programas de postgrado para minería

- Geología
- Mantenimiento
- Metalurgia
- Minas
- Procesos
- Otros



Fuente: elaboración propia en base a información del SIES (2013).



POWER TRAIN

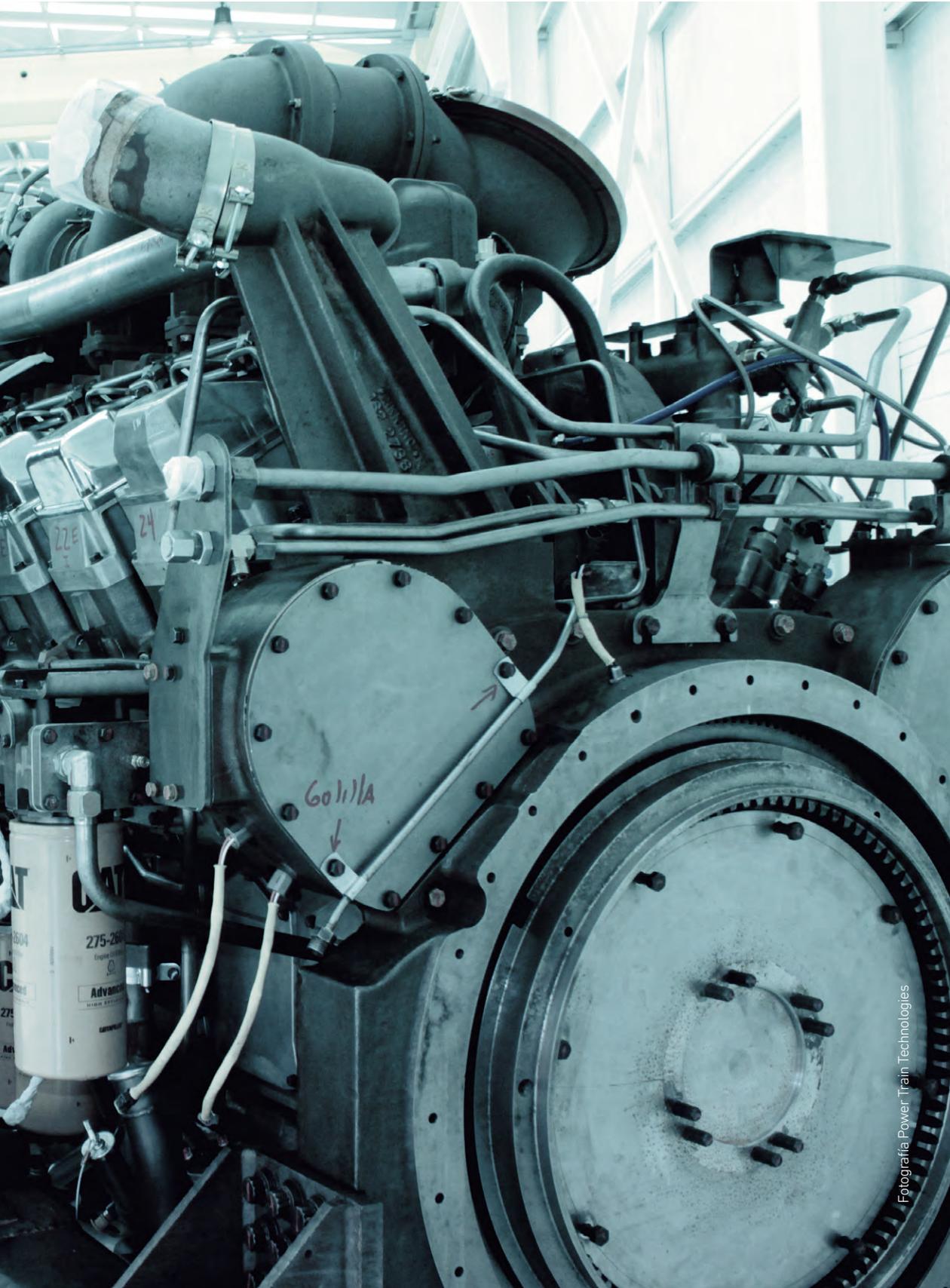
GAP 10 TON

CAT

1R-0755

Advanced

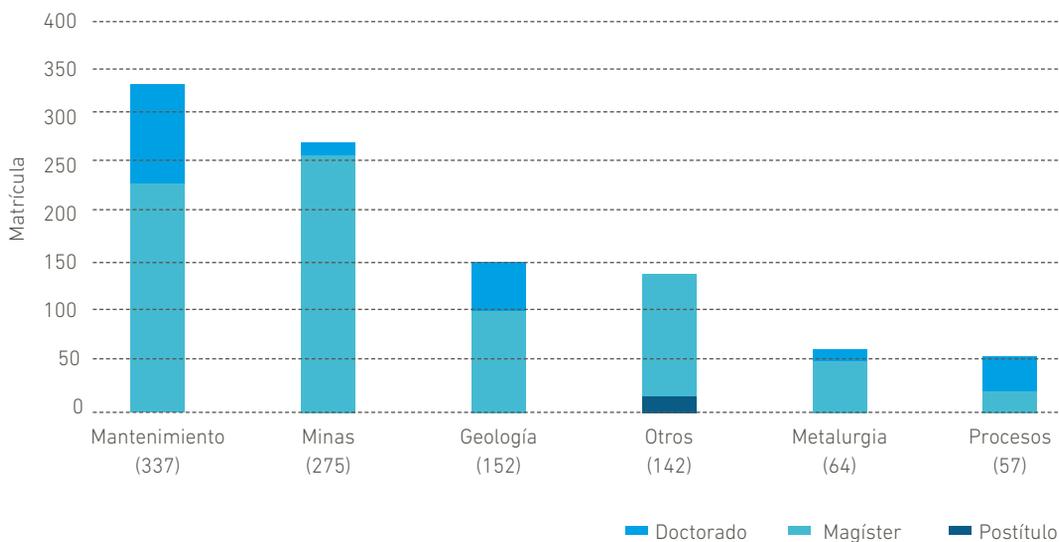
CAT



Así también, cuando se analiza la matrícula de los programas según área del proceso, se observa que la mayor parte de ésta (33%) está concentrada en programas relacionados con "mantenimiento". Le siguen los programas asociados a los procesos "minas" y "geología", con 27% y 15% de la matrícula. Cabe señalar que, a pesar de que en el ámbito "minas" existen sólo tres programas, en éste se concentra una proporción significativa de alumnos de postgrado.

GRÁFICO/44

Matrículas de los programas vinculados a minería



Fuente: elaboración propia en base a SIES (2013).

A pesar de que la información disponible para analizar el capital humano avanzado en minería es poca, los antecedentes expuestos denotan una importante brecha en este aspecto. Por un lado, la industria minera concentra un bajo número de investigadores en comparación con otros sectores económicos, lo cual resulta paradójico si se considera el tamaño relativo de esta industria en el país y el nivel de complejidad de los desafíos que está enfrentando. Por otro lado, si se compara a Chile con otros países mineros –como es el caso de Australia–, la brecha de capital humano avanzado en minería resulta evidente. Éste es un aspecto que se debe abordar si el país y la industria minera desean consolidar sus aspiraciones futuras.

Propuestas de acción para el desarrollo de capacidades críticas de capital humano establecidas en la Agenda Minería: Plataforma de Futuro para Chile

En la **Agenda Minería: Una Plataforma de Futuro para Chile** se establece una propuesta de acción para abordar las necesidades de desarrollo de capital humano vinculado a la industria minera. Las acciones establecidas en dicha agenda son las siguientes:

- Implementar en todas las instituciones de formación técnica y profesional para la minería, a nivel secundario y post secundario, el Marco de Cualificaciones y el Marco de Calidad propuesto por el Consejo de Competencias Mineras (CCM).
- Sugerir que 3 de los 15 centros de formación técnica que el Gobierno ha decidido potenciar se focalicen en el sector minero, particularmente

en ámbitos como automatización, minería subterránea, operación y mantención de equipos mineros, siguiendo las mallas y necesidades definida por el Consejo de Competencia Mineras. También se sugiere potenciar a los centros privados a través de los instrumentos existentes para que se focalicen en minería. Estos centros (públicos y privados) deben transformarse en training hubs de clase mundial, donde liceos técnico profesionales e instituciones de educación superior compartan capacidades y desarrollen innovaciones para mejorar los resultados de aprendizaje, en sintonía con las demandas de mayor productividad del sector.

- Aumentar la base de investigadores de primer nivel en áreas estratégicas definidas por el Consejo público-privado en los próximos 2 años, sentando la base para un crecimiento significativo de largo plazo. Metas de aumento de la base de investigadores: 2 años, 100 investigadores; 5 años, 270 investigadores; 10 años, 1.000 investigadores.
- Fortalecer la formación de ingenieros y otros profesionales de alta calificación que requiere el sector, modernizando los contenidos y organización curriculares de los programas (mejor combinación de competencias técnicas y habilidades claves).
- Fortalecer las capacidades en gestión de la innovación, transferencia tecnológica y aquellas relevantes para el empaquetamiento y escalamiento comercial de innovaciones. Explorar la atracción de profesionales desde el extranjero y la movilidad de talentos.

PROVEEDORES E INNOVACIÓN

Los proveedores de la minería ocupan un lugar central en la presente hoja de ruta. La visión establecida al 2035 (ver capítulo 3, sección “*Visión estratégica al 2035 y principales métricas de impacto*”) contempla el desarrollo de un sector de empresas proveedoras intensivas en conocimiento y tecnologías que sean capaces de exportar productos y servicios, lo cual se operacionaliza en dos metas: i) Creación de 250 empresas proveedoras de clase mundial; ii) Alcanzar los US\$4.000 millones en exportaciones de tecnologías y servicios intensivos en conocimiento vinculados a la industria minera.

La centralidad del sector de proveedores en la estrategia de desarrollo futuro de la industria minera radica en dos aspectos:

- Por un lado, la complejidad y magnitud de los desafíos que enfrenta la minería requerirá de la incorporación de nuevo conocimiento, innovación y tecnologías, por lo cual la consolidación de un sector *STEM* (servicios, tecnologías y equipos mineros) se constituye en un aspecto habilitador para el desarrollo futuro de la minería chilena. Un 60% de los costos operacionales de las compañías mineras corresponden a la compra de bienes y servicios (excluyendo energía y combustibles), de modo que gran parte de la sustentabilidad y competitividad de la minería depende, precisamente, de la sustentabilidad y competitividad de las empresas proveedoras (Fundación Chile & Cochilco, 2013).
- Por otro lado, hoy existen condiciones únicas para impulsar el desarrollo de servicios intensivos en conocimiento y tecnologías en torno a la minería. Como se ha señalado en capítulos anteriores (ver capítulo 3, sección “*Diversificación productiva y*

desarrollo tecnológico en torno a la minería”), los desafíos presentes en la industria, el conocimiento y experiencia que el país ha acumulado en la materia y la demanda por cobre configuran un escenario propicio para crear un nuevo sector exportador de conocimiento que otorgue posibilidades reales de diversificación productiva.

El sector de proveedores de la minería agrupa a más de 5.000 empresas (Fundación Chile, 2014), las que venden alrededor de US\$20.000 millones (excluyendo energía y combustibles) a la gran minería (Fundación Chile & Cochilco, 2013).

Durante 2014, 329 empresas proveedoras exportaron productos y/o servicios por un monto total de US\$537 millones. No obstante, es necesario precisar que las exportaciones del sector se encuentran concentradas en un número reducido de proveedores, ya que cinco empresas exportaron el 61% del total. La mayoría de las empresas (87%) exportó menos de US\$1 millón (Fundación Chile, 2015).

El sector de proveedores mineros australianos (METS) se constituye en un referente para Chile, pues se caracteriza por ser competitivo internacionalmente e innovador (Meller & Gana, 2015). Está compuesto por alrededor de 1.500 empresas, con ventas totales estimadas en AUS\$90.000 millones y exportaciones en insumos para la minería al año 2013 de AUS\$15.000 millones (Austmine, 2013).

Scott-Kemis (2012) plantea, que la consolidación de un sector de proveedores en torno a una industria de recursos supone la articulación de un cluster de instituciones relacionadas e independientes, lo que involucra cuatro procesos fundamentales:

- i) Entrada y formación de nuevas instituciones;

ii) Creciente interacción entre las organizaciones; iii) Creciente especialización y mejora de capacidades dentro de las organizaciones; iv) Desarrollo de instituciones, políticas y prioridades compartidas que posibiliten la colaboración y el apoyo mutuo. Una de las claves que explicaría el desarrollo de capacidades de las empresas proveedoras australianas radica en la existencia de un número importante de desafíos complejos y en el establecimiento de relaciones colaborativas entre las compañías mineras y los proveedores (Scott-Kemis, 2012).

Considerando la experiencia internacional y las especificidades locales, surge la pregunta por las barreras que han impedido que el sector de proveedores chilenos despliegue todo su potencial. Al respecto, un artículo desarrollado por el Centro de Estudios del Cobre y la Minería (Cesco) y Fundación Chile (2013) entrega luces al respecto.

Históricamente, la relación entre compañía minera y empresa proveedora ha estado marcada por la mera transacción de un producto y/o servicio, lo que ha generado asimetrías de información entre ambos actores en torno a los desafíos y problemas que la minería debe resolver y ha dificultado el desarrollo de nuevas soluciones e innovaciones.

Muchas de las innovaciones que se generan en la industria minera requieren de una fase piloto en "escala real". Dado que la relación entre proveedores y mineras ha sido transaccional, los espacios para la realización de pruebas en operaciones mineras han sido reducidos.

Una alternativa para facilitar estas instancias, que existe en otras partes del mundo, es habilitar espacios especialmente dedicados para la realización de pruebas a escala real. En Canadá

destaca el Centro de Minería Subterránea de Norcat, que funciona desde 1997 en una mina inactiva en Onaping, Ontario. A través de este centro, Norcat provee acceso a espacios para la prueba de prototipos tecnológicos y realización de entrenamiento práctico en minería. Parte de las inversiones en este centro han sido realizadas en alianza con proveedores de la minería locales e internacionales, los que prueban y exhiben sus productos en NORCAT. En el caso de Australia, existen espacios para pruebas de campo, entrenamiento y capacitación asociados al Centro de Investigación Cooperativa en Tecnologías de Exploración Profunda (DET CRC por sus siglas en inglés), ubicados en una mina abandonada en las afueras de Adelaide.

Otra barrera que ha dificultado el desarrollo del sector, refiere a los incentivos para el desarrollo de innovación. Al ser una industria determinada por el precio del mineral, los incentivos al interior de las compañías mineras están puestos en el corto plazo, con lo cual el desarrollo de innovaciones, cuyos resultados se observan en el mediano y largo plazo, pierden prioridad.

Por último, el acceso a financiamiento para el desarrollo de innovación e I+D es un aspecto central que podría condicionar el potencial de crecimiento del sector de proveedores de la minería.

La mayoría de los países desarrollados gasta alrededor de 2,5% del PIB en I+D, cifra que en Chile se ubica apenas en torno al 0,4% (Meller, 2015). Más aún, si se analiza el gasto en I+D según objetivo socioeconómico, se observa que sólo el 13% de lo que gastó el país en I+D durante 2013 se destinó a minería (Minecon, 2015), la cual contrata con la importancia de esta

industria en la economía nacional. A ello se suma que el mercado de capitales de riesgo no ha logrado establecer relaciones efectivas con el sector.

Estos aspectos se constituyen en problemas que el país debe abordar si se desea propiciar el desarrollo de un sector de proveedores de la minería intensivos en conocimiento y tecnologías y, con ello, contribuir a consolidar las aspiraciones de la minería chilena en el futuro.

Propuestas de acción para el desarrollo de una industria exportadora de equipos, tecnología y servicios intensivos en conocimientos establecidas en la Agenda Minería: Plataforma de Futuro para Chile

Las brechas descritas en la subsección precedente han sido abordadas, a través de un plan de acción, en la **Agenda Minería: Una Plataforma de Futuro para Chile**.

En relación al desarrollo de una industria de proveedores intensivos en conocimiento, se proponen las siguientes acciones:

- Ampliar el número de empresas mineras participantes y potenciar el Programa de Proveedores de Clase Mundial (PPCM) o semejantes, identificando los desafíos para su escalamiento e implementando las acciones de cierre de brechas correspondientes.
- Diseñar un programa de atracción de grandes proveedores globales, con el propósito de que instalen capacidades, en colaboración con proveedores locales pertinentes, incorporándolos a cadenas globales de valor.
- Compromiso de mineras y sus respectivos proveedores para posibilitar esquemas

contractuales específicos a proyectos de innovación incremental y quiebres tecnológicos, a través de compartir información, riesgos y beneficios (incluye propiedad intelectual).

- Visibilizar al sector de proveedores, contando con una caracterización de su contribución a la economía y sus necesidades de desarrollo empresarial, en base a la mejor información disponible validada por terceros.
- Realizar un estudio comparado sobre el financiamiento en Chile y el mundo para la minería y los proveedores de Servicios, Tecnologías y Equipos Mineros (STEM), con el foco en lograr que Chile sea una plaza atractiva para financiar proyectos, emprendimientos y el desarrollo de tecnologías. Este estudio deberá proponer estrategias concretas en la formación de capital humano para el financiamiento, la modificación/ creación de regulaciones que mejoren las opciones de financiamiento privado y la atracción de inversionistas y expertos internacionales.
- Crear un programa de asesoría en levantamiento de capital para el desarrollo de estrategias de internacionalización de un conjunto de STEM chilenas de alto potencial.
- Revisar normativas de fondos de capital de riesgo actuales, de modo de atraer a inversionistas expertos a Chile para el aceleramiento y empaquetamiento de productos, tecnologías y empresas con base en Chile.
- Crear programas de financiamiento público acordes con las escalas y ciclos de desarrollo de las empresas STEM.

MINERÍA INTELIGENTE

Abordar los desafíos de la minería del cobre de Chile que han sido presentados a lo largo de este libro, requiere de la incorporación de tecnologías de la información y las comunicaciones con avanzadas capacidades de monitoreo, control, optimización y funcionamiento autónomo.

De acuerdo a Porter & Heppelmann (2014), estas cuatro capacidades (monitoreo, control, optimización y autonomía) constituyen un producto inteligente, donde cada una de éstas necesita de la precedente para poder desarrollarse.

Tecnologías de seguridad, almacenamiento, internet de las cosas, *big data*, *cloud computing*, redes de sensores, movilidad, y robótica son cada vez más cruciales para mejorar los factores productivos de las industrias al impactar en la competitividad, el valor agregado de productos y servicios, la excelencia operacional y la exportación.

Junto con lo anterior, es importante observar que los productos inteligentes dan paso al surgimiento de **servicios inteligentes** que, a partir del aprovechamiento de las capacidades de estos productos, cambian las dinámicas de interacción entre las empresas y de éstas con sus clientes, proveedores y el ecosistema en general. Por esta razón, el fenómeno de las **industrias inteligentes** ha sido denominado como “la cuarta revolución industrial”.

La redacción de esta sección estuvo a cargo de Tomás González y Sergio Burdiles, y contó con la colaboración del Programa Estratégico de Industrias Inteligentes. Se agradecen los comentarios de Juan Rada y Nelson Cubillos.

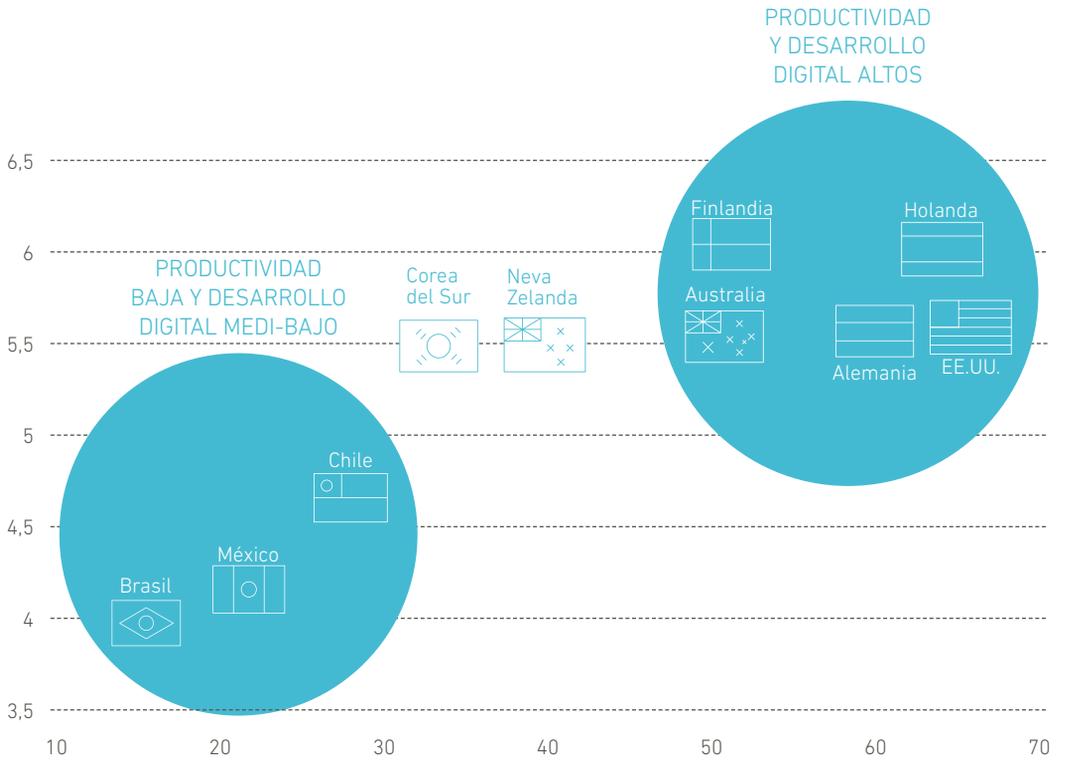
Es importante entender que la minería inteligente, y en general las industrias inteligentes, son una oportunidad para potenciar el desarrollo de las compañías mineras y de proveedores nacionales e internacionales especializados, de manera de responder a las necesidades de múltiples sectores en forma eficiente tanto en Chile como en el mundo.

En esta línea, un estudio realizado por McKinsey & Company (2015), establece que la adopción de tecnologías inteligentes tendría un impacto económico potencial de US\$370.000 millones anuales para 2025 a nivel mundial, lo que corresponde a un 17% del costo base proyectado para la industria minera a nivel global para ese mismo año. Los mayores beneficios se concentran en los ámbitos de gestión de operaciones y en mantenimiento de los equipos.

La adopción de tecnologías inteligentes permitirá a la minería mejorar su productividad al reducir o eliminar diversas fuentes de incertidumbre. Por un lado se mejora la planificación y coordinación de actividades, con el fin de mitigar aquella incertidumbre causada por fuerzas externas y, por otro, se reduce la variabilidad propia de la operación (McKinsey & Company, 2015).

Complementariamente, diversos estudios (Kretschmer, 2012; VTT, 2013), muestran que el uso de estas soluciones tiene un impacto positivo en la productividad a nivel nacional. De hecho, como se muestra en la siguiente figura, existe una correlación entre la productividad laboral por hora trabajada y el nivel de desarrollo digital de los países.

FIGURA/23
 Productividad percápita
 versus desarrollo digital



Fuente: Programa Estratégico de Industrias Inteligentes de Corfo (2014)

Para que Chile pueda aprovechar plenamente las oportunidades de una minería inteligente, no sólo se necesita avanzar en el desarrollo de infraestructura digital, de tecnologías y manejo de datos, sino también se deben resolver desafíos asociados a gestión y coordinación de actores.

En el marco de los Programas Estratégicos de Especialización Inteligente, Corfo se encuentra impulsando el Programa Estratégico de Industrias Inteligentes, cuyo objetivo es "construir y mejorar aquellas capacidades competitivas, tecnológicas y de coordinación que permitan mantener una plataforma habilitante para la digitalización verticalizada de un conjunto de sectores productivos estratégicos", entre estos, la minería. Los aspectos que este Programa ha identificado para avanzar en la dirección antes descrita son los siguientes:

- Calidad y cobertura de la infraestructura digital.
- Desarrollo, adaptación y mejora de arquitectura y estándares internacionales para la interoperabilidad de las operaciones mineras.
- Nivel de especialización verticalizada del capital humano.
- Nivel de especialización verticalizada del sector digital.

En el caso específico de minería, el foco del programa estará puesto en mejorar las capacidades de interoperabilidad.

La Comisión Europea (2004) define interoperabilidad como la habilidad de los sistemas de tecnologías de la información y las comunicaciones, y de los procesos de negocio que estos habilitan, de intercambiar datos y de permitir que información y conocimiento

sean compartidos; lo que a su vez hace que las organizaciones y sistemas puedan trabajar de forma conjunta sin problemas, es decir, inter-operar.

En esta línea, el Programa Estratégico de Industrias Inteligentes formuló un proyecto orientado a crear una Organización Internacional de Estándares para la Interoperabilidad en Minería (SOMIN por sus siglas en inglés), cuyo objetivo es desarrollar, implementar y promover la adopción de estándares de clase mundial para la interoperabilidad de equipos y sistemas mineros.

Esta organización materializará su foco considerando los siguientes componentes:

1. Desarrollo de una propuesta de arquitectura de interoperabilidad minera. A través de este componente se busca liderar desde Chile el desarrollo de una arquitectura que agrupe e identifique las familias de estándares, la metodología a utilizar para su desarrollo y valide los elementos considerados en la arquitectura actual para la interoperabilidad en minería.
2. Capacidad de integración de proveedores y empresas mineras, cuyo objetivo es identificar

un modelo de evaluación de capacidades de integración y un mecanismo de evaluación para proveedores y compañías mineras.

3. Desarrollo, validación e implementación de estándares para interoperabilidad *plug & work*, que busca producir un conjunto de estándares, guías y herramientas de adopción y certificación de clase mundial para la interoperabilidad de procesos mineros actuales considerando operaciones manuales.
4. Desarrollo, validación e implementación de estándares para interoperabilidad *plug & work*, que busca producir un conjunto de estándares, guías y herramientas de adopción y certificación de clase mundial para la interoperabilidad de procesos mineros actuales y futuros, considerando operaciones telecomandadas semi-autónomas y autónomas.

Una parte importante de las soluciones y líneas de I+D identificadas en los núcleos traccionantes (capítulo 5) conllevan el desarrollo de tecnologías asociadas a una minería inteligente. Avanzar en esta dirección permitirá a la industria minera nacional abordar sus desafíos de corto, mediano y largo plazo.

$$dt^2 + \frac{1}{F} dr^2 + r^2 (N^2 dt + dd)^2$$

$$F = \frac{(r-r_1)(r-r_2)}{(r-r_3)}$$

$$\frac{B l^2 (x^2 - 1)}{2} - \sqrt{r^2 - c l^2 (x^2 - 1) + l^4 (x^2 - 1)^2 B^2}$$

$$r^2 - c l^2 (x^2 - 1) + l^4 (x^2 - 1)^2 B^2$$

$$\frac{c m}{2 n^2 l^2 x^2} \left[(x^2 - 1) B^2 - B g(m) r^2 - 2 c x^2 + 2 r^2 x^2 \right]$$

$$\frac{\sqrt{B^2 l^2 + 4 C_T}}{4 \pi l x}$$

$$\Delta M L - \Delta S = 0$$

$$(4c + 3r^2) (x)$$

$$S = 2\pi \sqrt{\frac{c}{6}} \left\{ \sqrt{\Delta c} \right.$$

$$N = \frac{\pi \sqrt{\frac{l^2}{6}}}{\dots}$$

$$S = 2\pi \sqrt{\frac{c}{12}}$$

$$N_T = \left[\frac{b l^2 (x^2)}{2 g} \right]$$

$$S = \frac{4 \pi l \sqrt{B^2 l^2 + 4 C_T}}{26}$$

$$F_T = \frac{1}{l^2 r^2}$$



07

PRIORIDADES
ESTRATÉGICAS
PARA LA
IMPLEMENTACIÓN
DEL ROADMAP

A partir de los desafíos identificados durante el proceso de construcción de la Hoja de Ruta, se definieron ocho prioridades estratégicas para abordar las problemáticas levantadas

A partir de los desafíos identificados durante el proceso de construcción de la Hoja de Ruta, se definieron ocho prioridades estratégicas para abordar las problemáticas levantadas. Para cada una de estas prioridades se conceptualizó un proyecto, con sus respectivos componentes y beneficios asociados. A continuación se describen dichas prioridades con sus respectivos proyectos.

MINERÍA SUBTERRÁNEA: DESARROLLO DE UNA MINERÍA PROFUNDA A GRAN ESCALA

Un desafío central para la sustentabilidad futura de la industria es mejorar los niveles de productividad de la minería subterránea para viabilizar el desarrollo futuro de una minería profunda a gran escala. Construir, gestionar y operar los grandes proyectos de minería subterránea constituye un desafío sin precedentes para la industria minera mundial, tanto por su complejidad como por los volúmenes de producción asociados. Las posibilidades asociadas a la mecanización, automatización, tele-operación y robotización permitirán transitar hacia una minería subterránea continua, con mayores niveles de seguridad (cero accidentes), productividad y menores costos de producción.

La redacción de este capítulo fue elaborado en base a los proyectos surgidos en la construcción del Roadmap Tecnológico de la Minería 2035, y a la priorización realizada por el Directorio Alta Ley.

TABLA/31

Minería subterránea: Desarrollo de una minería profunda a gran escala

PROYECTO
Diseño, desarrollo y validación de maquinaria para la minería subterránea a gran escala.

COMPONENTES
Remotización de equipos para las etapas de preparación y explotación de la mina subterránea.
Investigación y desarrollo en geociencias para la comprensión del macizo rocoso.
Desarrollo de equipos autónomos para las etapas de preparación y explotación de la mina subterránea.
Automatización y robotización.
Desarrollo de equipos eléctricos.

BENEFICIOS
Aumento de la seguridad y reducción de accidentes.
Posibilitar la explotación de minería profunda en gran escala.
Reducción de elementos contaminantes al interior de la mina.
Aumento de productividad.
Reducción del consumo de energía.

MEJORAR LA COMPETITIVIDAD DE LAS FUNDICIONES Y REFINERÍAS

Las fundiciones chilenas se sitúan en una posición desfavorable respecto de otros actores mundiales, lo cual se explica por bajos niveles de ingresos, altos costos (mano de obra y energía), bajas tasas de recuperaciones metalúrgicas y obsolescencia tecnológica de las operaciones. A ello se suma una nueva exigencia ambiental que obliga a las fundiciones, a partir de 2018, a capturar un mínimo de 95% de las emisiones que generan.

Este escenario obliga a las fundiciones y refinerías nacionales a mejorar su competitividad: eficiencia de sus procesos, mayores condiciones de seguridad para sus trabajadores, y disminución de su impacto medioambiental.

TABLA/32
Mejorar la competitividad de
las Fundiciones y Refinerías

PROYECTO
Programa de Innovación Tecnológica para la fundición y refinería.
COMPONENTES
Adaptación de tecnologías emergentes de conversión continua de metal blanco a las condiciones de las fundiciones nacionales.
Desarrollo de instrumentación y sistemas de control experto para el control operacional de hornos <i>bath smelting</i> .
Desarrollo y validación de modelos fenomenológicos para el uso de toberas de alta presión (TAP) en hornos <i>bath smelting</i> .
Validación a escala piloto-industria de tecnología de lecho empacado.
Validación a escala piloto-industria de tecnología de capa fundida.
Desarrollo de tecnologías de recuperación de metales de interés económico desde residuos generados del proceso de fundición y refinería.
Diseño y desarrollo de tecnologías para electro-refinar granallas de Cu blister (eliminando la etapa de refinado a fuego en la fundición) con uso de membranas sólidas.
Automatización, mecanización y robotización en refinerías de cobre.
Conceptualización y experimentación de tecnologías de limpieza de escorias pirometalúrgicas.

continúa en la siguiente página

COMPONENTES

Optimización de la distribución de arsénico en los hornos de fusión BBF para lograr mayor volatilización y disolución en la escoria.

Adaptación, validación y pilotaje de tecnologías extranjeras de bajo costo de capital y de operación para control de As, Sb y Bi.

BENEFICIOS

Mejorar el margen bruto.

Mayores ingresos por aumento de recuperación de cobre y otros metales.

Mejorar de la performance ambiental.

Aumentar de la seguridad y mejora de las condiciones laborales.

Desarrollar de proveedores de clase mundial especializados.

Desarrollar de capital humano avanzado y especializado.

RELAVES MINEROS: ENFRENTAR LA CRECIENTE ESCASEZ DE SUPERFICIE Y MINIMIZAR SU IMPACTO

Cada vez la industria minera deberá mover mayores cantidades de material para extraer cobre y otros elementos de valor. Con ello, el volumen de desechos que deben ser dispuestos, ya sea como material estéril o en la forma de relaves, seguirá aumentando en el futuro. Se estima que la producción de relaves podría casi duplicarse al año 2035: si hoy cada 36 horas se depositan en Chile relaves equivalentes a un Cerro Santa Lucía, dentro de 20 años lo haremos sólo en 21 horas. En este sentido, enfrentar la creciente escasez de superficie y competencia por territorio, asegurar la estabilidad de los depósitos, minimizar el impacto de las infiltraciones, promover la conversión de los relaves (pasivos) a un activo, y propiciar la inclusión y aceptación por parte de las comunidades se constituyen en desafíos centrales para la sustentabilidad futura de la industria minera.

TABLA/33

Relaves mineros: enfrentar la creciente escasez de superficie y minimizar su impacto

PROYECTO
Programa Tecnológico de Monitoreo de Relaves Mineros.
COMPONENTES
Desarrollar instrumentación para medición de parámetros de estabilidad.
Desarrollar modelos con actualización en línea para establecer un índice de estabilidad acordado y aceptado por la comunidad y autoridades.
Desarrollar instrumentación en línea para monitoreo y mediciones físico-químicas de las infiltraciones producidas por la operación de tranques.
Desarrollar redes, protocolos y ambientes para compartir información con las comunidades.
BENEFICIOS
Reducción de conflictos socio-ambientales.
Habilitación de proyectos mineros.
Identificación oportuna de potenciales factores de riesgo asociados a tranques de operación.
Desarrollo de proveedores especializados.

MEJORA DE PRODUCTIVIDAD EN LA MINERÍA A CIELO ABIERTO: MOVIMIENTO DE GRANDES VOLÚMENES DE TIERRA A TRAVÉS DE LARGAS DISTANCIAS

Entre los años 2000 y 2013 la productividad de la industria minera, medida como Productividad Total de Factores (PTF), disminuyó en 20%. Esto se explica en gran parte por el deterioro de la calidad del recurso geológico. La antigüedad de las minas en Chile y su creciente profundidad han derivado en un aumento de la dureza del mineral, de las distancias de acarreo, y en una disminución de las leyes promedio del mineral. La necesidad de mover una mayor cantidad de lastre y de moler una mayor cantidad de mineral cada vez más duro tiene un efecto directo en el consumo de energía, con su consecuente efecto en el aumento de los costos y disminución de la productividad.

TABLA/34

Mejora de productividad en la minería a cielo abierto: movimiento de grandes volúmenes de material a través de largas distancias

PROYECTO

Desarrollar tecnologías para el movimientos de grandes tonelajes por largas distancias.

COMPONENTES

Desarrollar tecnologías que permitan procesos de transporte continuo.

Diseminar el uso de camiones autónomos que operen de forma continua.

Diseñar y desarrollar de correas subverticales de gran volumen.

Gestión de tronaduras para facilitar el transporte continuo.

BENEFICIOS

Reducción de costos y aumento de productividad.

Reducción de huella de carbono.

POTENCIAR EL DESARROLLO DE PROVEEDORES INTENSIVOS EN CONOCIMIENTO Y TECNOLOGÍA

La industria minera nacional se encuentra transitando hacia una nueva etapa, donde la incorporación de conocimiento, innovación y desarrollo tecnológico se convierten en fuentes significativas de ventajas competitivas. En este contexto, la consolidación de un sector de proveedores STEM (servicios, tecnologías y equipos mineros) constituye un aspecto habilitador para el desarrollo futuro de la minería chilena y, a su vez, ofrece una oportunidad única de desarrollo tecnológico, diversificación y sofisticación productiva, y desarrollo de una canasta exportadora de servicios, tecnologías y equipos para la minería mundial.

TABLA/35

Potenciar el desarrollo de proveedores intensivos en conocimiento y tecnología

PROYECTO
Programa de innovación abierta en la cadena de valor de la gran minería.
COMPONENTES
Transferencia de metodología de innovación abierta a nuevas operaciones mineras que no participan del Programa de Proveedores de Clase Mundial.
Adaptación y transferencia de metodología de innovación abierta a grandes empresas proveedoras de la minería.
Transferencia de metodología de innovación abierta a la mediana minería.
Implementación de un modelo de aceleración para empresas proveedoras con base tecnológica.
Implementación de un modelo de emprendimiento dinámico para la minería.
Implementación piloto de un modelo de innovación colaborativa (asociatividad horizontal) entre empresas proveedoras de la minería.
Formulación e implementación de una estrategia de exportación para proveedores de la minería.
Realización de rondas de financiamiento entre empresas proveedoras y fuentes de financiamiento públicas y privadas.
BENEFICIOS
Generación de capacidades de innovación tecnológica en el país.
Mejoras de eficiencia en los procesos mineros a partir de la introducción de innovaciones desarrolladas por proveedores.
Diversificación y aumento del nivel de exportaciones de servicios, tecnologías y equipos mineros.

POTENCIAR LA ACTIVIDAD DE EXPLORACIÓN EN CHILE

Chile posee actualmente el 29% de las reservas de cobre conocidas y ha acumulado conocimiento y expertise para su exploración y explotación. La tendencia prevaleciente y la proyección futura privilegia la inversión en proyectos existentes, vale decir, inversión en yacimientos *brownfield*, lo cual explica el notorio descenso de las leyes del mineral. Explorar yacimientos distintos a los actualmente existentes, y potenciar inversiones en proyectos *greenfield* es clave para mejorar la calidad de los recursos.

El desarrollo económico sostenible de la minería del cobre depende de una buena de gestión de los recursos naturales y la capacidad para explotarlos eficientemente. Hoy se observa un alto grado de concentración y bajo nivel de rotación de la propiedad minera, lo cual se traduce en un uso poco eficiente del recurso. Actualmente existe una serie de problemáticas que, de superarse, dinamizarían el desarrollo de la actividad exploratoria.

TABLA/36

Potenciar la actividad de exploración en Chile

PROYECTO

Incremento del número de agentes que realizan exploración en Chile.

COMPONENTES

Revisión de la normativa de acceso a la propiedad minera, ajustándolo a estándares internacionales con énfasis en nuevos actores.

Perfeccionar la información geocientífica precompetitiva pública a través de una base de datos integrada vía *online* con actualización permanente.

Desarrollar instrumentos de fomento y capital de riesgo para incentivar la actividad de exploración.

Modificar y adaptar a estándares internacionales la normativa sobre aranceles y plazos de explotación asociados a concesiones mineras asignadas.

Agilizar el proceso para la obtención de permisos de concesiones.

BENEFICIOS

Incremento de la probabilidad de encontrar nuevos yacimientos mineros con mayores leyes, aumentando la actividad minera, mejorando su productividad y costos, e incrementando su contribución al país.

HABILITAR EL DESARROLLO DE UNA MINERÍA INTELIGENTE

La adopción de tecnologías inteligentes le permitirá a la minería mejorar su productividad a través de una mejor planificación y coordinación de las actividades. Con ello se lograría mitigar posibles fuentes de incertidumbre y reducir la variabilidad propia de la operación minera. El establecimiento de estándares y procesos para la interoperabilidad, entendido como la habilidad de los sistemas de tecnologías de la información y las comunicaciones de intercambiar datos y permitir que se comparta información y conocimiento, es un elemento habilitador para el desarrollo de una minería inteligente.

TABLA/37

Habilitar el desarrollo de una minería inteligente

PROYECTO

Organización Internacional de Estándares para la Interoperabilidad en Minería.

COMPONENTES

Desarrollar un modelo conceptual de interoperabilidad minera.

Identificar y desarrollar estándares y guías de clase mundial para la integración y coordinación de operaciones.

Desarrollar y validar estándares para interoperabilidad *plug & work*.

Desarrollar y validar estándares para interoperabilidad minera en sistemas de telecomando, semi-autónomos y autónomos.

BENEFICIOS

Habilitar el desarrollo de una minería inteligente.

Generar capacidades locales para el monitoreo, mantenimiento y continuidad operacional de sistemas autónomos.

DESARROLLO DE CAPITAL HUMANO ESPECIALIZADO ACORDE A LOS REQUERIMIENTOS ACTUALES Y FUTUROS DE LA INDUSTRIA

El capital humano es un eje transversal que cruza gran parte de los desafíos actuales y futuros de la industria minera nacional, y constituye un elemento habilitador para materializar los futuros proyectos de inversión, mejorar la productividad de la industria e incorporar nuevas tecnologías a los procesos de la minería y sus proveedores. Avanzar hacia una minería innovadora depende, en gran medida, de la calidad y cantidad del capital humano disponible para ello.

Las condiciones de operación de la industria minera se han vuelto cada vez más exigentes, y la materialización de los proyectos futuros requerirá, entre otros aspectos, del desarrollo de nuevas tecnologías y de alinear la calidad de la formación del capital humano con los nuevos requerimientos de la industria.

TABLA/38
Desarrollo de capital humano
especializado acorde a los
requerimientos actuales y
futuros de la industria

PROYECTO

Centro de Transferencia para la formación técnica en la cadena de valor de la minería.

COMPONENTES

Prospección de tecnologías y mejores prácticas para la formación técnica en minería.

Actualizar el marco de cualificaciones y desarrollo de paquetes de entrenamiento.

Definir estándares de aprendizajes por nivel y especialidad e implementación en establecimientos de formación técnica en minería.

Identificar y evaluar tecnologías de aprendizaje para la formación técnica en minería.

Formular y ejecutar módulos de formación y capacitación en directivos, docentes e instructores.

Desarrollar un programa sectorial de prácticas laborales.

BENEFICIOS

Mejorar los niveles de productividad laboral.

Disminuir el gasto de capacitación de la industria en perfiles de entrada.

Mejorar la calidad de las trayectorias laborales de jóvenes que cursan especialidades en minería.

Mejorar las capacidades de absorción y uso de tecnologías utilizadas en la minería.

BIBLIOGRAFÍA

Amec Foster Wheeler. (2015). *Estado del arte y visión de futuro en fundiciones y refineras de cobre*. Reporte no publicado.

Austmine. (2013). *Australia's new driver for growth. Mining, equipment, technology and services*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.austmine.com.au/Portals/25/Content/Documents/Austmine%20Survey%20Highlights.pdf>

Australian Minerals Industry Association. (2004). *Copper Technology Roadmap 2004*. Australia: Amira International Ltd. Melbourne.

Australian Minerals Industry Association. (2006). *Copper Technology Roadmap 2006, A Strategic Overview*. Australia: Amira International Ltd. Melbourne.

Banco Mundial. (2016). *Crecimiento del PIB (% anual). Datos. bancomundial.org*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.KD.ZG>

Bernal, L., Dornbergeret, U., Torres, O., & Byrnes, E. (2009). *Technology Roadmapping Handbook*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de http://www.vgu.edu.vn/fileadmin/pictures/studies/MBA/Handbook_Roadmapping.pdf

Centro de Estudios del Cobre y la Minería (CESCO) & Fundación Chile. (2013). *Proveedores y minería: Desafíos para potenciar la Innovación de Alto Impacto*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.fch.cl/recurso/innovum/proveedores-y-mineria-desafios-para-potenciar-la-innovacion-de-alto-impacto/>

Código de Minería. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 21 de enero 1982. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=7227&idVersion=2010-11-22>

Collins, J. & Pincock, L. (2010). *Technology Development Roadmaps – A Systematic Approach to Maturing Needed Technologies*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de <https://indigitallibrary.inl.gov/sti/4591819.pdf>

Comisión Chilena del Cobre. (2006). *Estado actual y desafíos futuros para la exploración minera en Chile*. Santiago, Chile: Comisión Chilena del Cobre.

Comisión Chilena del Cobre. (2008). *Nueva Ley de Persona Competente: Posibles Medidas Complementarias para cerrar la brecha entre el sector minero y el Mercado Financiero Chileno*. Santiago, Chile: Comisión Chilena del Cobre, Dirección de Estudios.

Comisión Chilena del Cobre. (2009). *Estudio prospectivo de emisiones de gases de efecto invernadero de la minería del cobre en Chile*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.cochilco.cl/descargas/estudios/tematico/sustentabilidad/Prospectivo_GEI.pdf

Comisión Chilena del Cobre. (2011). *Propiedad Minera y competitividad Minera de Chile*. Santiago, Chile: Documento no publicado

Comisión Chilena del Cobre. (2013). *Actualización de la información sobre las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a la minería del cobre al año 2012*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.cochilco.cl/descargas/estudios/informes/energia/Actualizacion-info-emisiones-gases-invernadero_2012.pdf

Comisión Chilena del Cobre. (2014). *Consumo de agua en la minería del cobre al año 2014*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: [http://www.cochilco.cl/Archivos/destacados/20150622165330_Informe%20consumo%20agua%2004-15%20\(rev%20F\).pdf](http://www.cochilco.cl/Archivos/destacados/20150622165330_Informe%20consumo%20agua%2004-15%20(rev%20F).pdf)

Comisión Chilena del Cobre. (2014a). *Productividad en la Industria Minera en Chile*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.cochilco.cl/descargas/estudios/tematico/productividad/Informe_de_productividad_en_mineria_VF.pdf

Comisión Chilena del Cobre. (2014b). *Actualización de la información sobre emisiones de gases de efecto invernadero directos en la minería del cobre al año 2013*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.cochilco.cl/descargas/estudios/informes/energia/Informe_GEI_2014_vf.pdf

Comisión Chilena del Cobre. (2014c). *Proyección del consumo de electricidad en la minería del cobre 2014 - 2025*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.cochilco.cl/descargas/estudios/informes/energia/proyeccion_consumo_electricidad_2014-2015.pdf

Comisión Chilena del Cobre. (2014d). *Inversión en la minería chilena - Cartera de proyectos 2014 -2023*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.cochilco.cl/descargas/estudios/tematico/inversion/Inversion_en_la_mineria_chilena-Cartera_de_proyectos.pdf

Comisión Chilena del Cobre. (2014e). *Identificación de insumos críticos para el desarrollo de la minería en Chile*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.cochilco.cl/descargas/estudios/informes/Insumos%20Cr%C3%ADticos/Estudio_de_Insumos_Criticos_en_la_Mineria_Chilena_VF.pdf

Comisión Chilena del Cobre. (2015). *Proyección del consumo de agua en la minería del cobre al 2026*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.cochilco.cl/Archivos/destacados/20151110124039_Proyecci%C3%B3n%20de%20consumo%20de%20agua%202015%20al%202026.pdf

Comisión Chilena del Cobre. (2015a). *Producción Minera*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.cochilco.cl/estadisticas/produccion.asp>

Comisión Chilena del Cobre. (2015b). *Caracterización de los costos de la gran minería del cobre*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.cochilco.cl/descargas/estudios/tematico/productividad/Informe_caracterizacion_de_los_costos.pdf

Comisión Chilena del Cobre. (2015c). *Proyección del consumo de electricidad en la minería del cobre 2015 - 2026*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.cochilco.cl/Archivos/destacados/20151110124039_Proyecci%C3%B3n%20de%20consumo%20de%20agua%202015%20al%202026.pdf

Comisión Chilena del Cobre. (2015d). *Proyección del consumo de agua en la minería del cobre al 2026*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.cochilco.cl/Archivos/destacados/20151110124039_Proyecci%C3%B3n%20de%20consumo%20de%20agua%202015%20al%202026.pdf

Comisión Chilena del Cobre. (2015e). *Chile en el mercado de los concentrados de cobre*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.cochilco.cl/archivos/presentaciones/20151130104137_2015%2011%2026%20Chile%20en%20el%20mercado%20de%20concentrados%20de%20cobre.%20J%20Cantallopts.pdf

- Comisión Chilena del Cobre. (2015f). *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1995 - 2014*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.cochilco.cl/descargas/estadisticas/anuarios/Anuario2015web.pdf>
- Comisión Chilena del Cobre. (2015g). *Exportaciones Mineras*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.cochilco.cl/estadisticas/exportaciones.asp>
- Comisión Chilena del Cobre. (2015h). *Análisis del mercado de insumos críticos en la minería del cobre*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.mch.cl/wp-content/uploads/sites/4/2015/09/Estudio-Insumos-Cr%C3%ADticos.pdf>
- Comisión Europea. (2004). *European Interoperability Framework for pan-European eGovernment Services*. Luxemburgo: Office for Official Publications of the European Communities. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://ec.europa.eu/idabc/servlets/Docd552.pdf?id=19529>
- Comisión Minería y Desarrollo de Chile (2014). *Minería: Una Plataforma de Futuro para Chile*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de http://www.mch.cl/wp-content/uploads/sites/4/2014/12/Mineria-Una_Plataforma_de_Futuro_para_Chile.pdf
- Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica. (2016). *Becas Conicyt. Programa de Formación de Capital Humano Avanzado*. Conicyt.cl. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.conicyt.cl/becas-conicyt/>
- Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation. (2014). *El Futuro de la Minería en Chile*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.csiro.au/es-CL/Research/Mining-manufacturing/CSIRO-Chile/Future-of-Mining>
- Consejo de Competencias Mineras. (2014). *Fuerza Laboral de la Gran Minería Chilena 2014-2023*. Santiago, Chile: Consejo Minero. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.consejominero.cl/wp-content/uploads/2015/04/EFLM-2014-2023.pdf>
- Consejo de Innovación para el Desarrollo. (2014). *Minería y Desarrollo Sostenible de Chile. Hacia una Visión Compartida. Una Minería virtuosa, sostenible e inclusiva*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.mch.cl/wp-content/uploads/sites/4/2014/06/Propuesta-minera.pdf>
- Consejo Minero. (2014). *Recursos Humanos y Productividad en la Minería*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.consejominero.cl/wp-content/uploads/2014/11/Recursos-Humanos-y-Productividad-Hrmining-2014.pdf>
- Consejo Minero. (2016). *Minería en Cifras*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de <http://www.consejominero.cl/wp-content/uploads/2016/01/Enero.pdf>
- Consejo Nacional de Innovación para la Competitividad. (2009). *Orientaciones sobre institucionalidad para el desarrollo del Capital Humano Avanzado*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://biblioteca.cnic.cl/media/users/3/181868/files/18813/OrientacionesDesarrolloCapitalHumanoAvanzado.pdf>
- Corporación Nacional del Cobre de Chile. (2008). *Diccionario Minero. CodelcoEduca.cl*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: https://www.codelcoeduca.cl/glosario/glosario_o.asp
- CRC Mining. (2014). *Maintainer of the Future, How the evolution of technology and asset management will change the training and role of the modern maintainer*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.crcmining.com.au/wp-content/uploads/2013/02/CRCMining-Maintainer-of-the-Future-White-Paper.pdf>
- Crespi, G., Fernández-Arias, E. & Stein, E. (2014). *¿Cómo repensar el desarrollo productivo? Políticas e instituciones sólidas para la transformación económica*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/6634/%C2%BFC%C3%B3mo%20repensar%20el%20desarrollo%20productivo%3f%20Pol%C3%ADticas%20e%20instituciones%20s%C3%B3lidas%20para%20la%20transformaci%C3%B3n%20econ%C3%B3mica.pdf?sequence=1>
- CRU Group. (2015). *Proyecciones del mercado de concentrado de cobre. ¿Qué le espera a la oferta?* Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.cochilco.cl/archivos/presentaciones/20151130104218_Proyecciones%20y%20Desaf%C3%ADos%20de%20los%20Mercados%20de%20Fundici%C3%B3n.%20Cru.pdf
- Decreto N° 28 (2013). *Establece norma de emisión para fundiciones de cobre y fuentes emisoras de arsénico*. Diario oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 12 de diciembre de 2013. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=1057059&idParte>

Department of Mineral Resources of South Africa. (2014). *Taking SA Mining to 2030 through Resourceful Collaboration. A Technology Innovation Roadmap for the South African Minerals Industry*. Johannesburgo, Sudáfrica: Mintek.

Ellen MacArthur Foundation. (2015). *Circular Economy System Diagram*. [EllenMacArthurFoundation.org](http://www.ellenmacarthurfoundation.org). Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy/interactive-diagram>

Empresa Nacional de Minería (Enami). (2015). *Enami y la mediana minería*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.sonami.cl/files/presentaciones/1624/04.-%20ENAMI%20Y%20LA%20MEDIANA%20MINERIA.pdf>

European Network of Mining Regions. (2006). *Towards a Roadmap for European Mining Regions*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.interreg4c.eu/uploads/media/pdf/5_ENMR_Roadmap.pdf

Flynn, V. (2016). *Airbnb for cars and Canada's food waste fight: 10 circular businesses in the Davos spotlight*. *TheGuardian.com*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.theguardian.com/sustainable-business/2016/jan/20/circular-economy-award-finalists-davos-airbnb-for-cars-canada-food-waste>

Fuentes, J.E. (2010) *How can a market consultant add value to the development of a project*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.comisionminera.cl/documentacion/category/21-taller-fondos-de-inversion-minera-30-ago-2010?download=350:3-how-can-a-market-consultant-add-value-to-a-the-development-of-a-project-juan-esteban-fuentes>

Fundación Chile. (2014). *Estudio de Caracterización 2014. Proveedores de la Minería Chilena*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.fch.cl/wp-content/uploads/2015/03/Estudio-de-Characterizacion-de-Proveedores-de-la-mineria-2014.pdf>

Fundación Chile. (2015). *Reporte de Exportaciones 2010 – 2014. Proveedores de la Minería Chilena*. Recuperado el 1 de febrero de 2016 de: <http://www.fch.cl/recursos/innovum/proveedores-de-la-mineria-chilena-report-de-exportaciones-2010-2014-2/>

Fundación Chile & Cochilco. (2013). *Minería en Chile: Impacto en Regiones y Desafíos para su Desarrollo*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.cochilco.cl/descargas/estadisticas/libro/Libro_Mineria_en_Chile_Impacto_en_Regiones_y_Desafios_para_su_Desarrollo.pdf

García, M. y Bray, O. (1997). *Fundamentals of Technology Roadmapping*. Recuperado el 1 de febrero de 2016 de: <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/1997/970665.pdf>

Generadoras de Chile. (2014). *Sector Generación Eléctrica. Capacidad instalada*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://generadoras.cl/generacion-electrica/sector-generacion-electrica/>

Industry Canada. (2007). *Technology Roadmapping in Canada: A Development Guide*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: [https://www.ic.gc.ca/eic/site/trm-crt.nsf/vwapj/development-developpement_eng.pdf/\\$file/development-developpement_eng.pdf](https://www.ic.gc.ca/eic/site/trm-crt.nsf/vwapj/development-developpement_eng.pdf/$file/development-developpement_eng.pdf)

Iniciativa Scenario Planning. (2014). *Una minería sostenible en la Zona Central de Chile: Escenarios al 2035*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.sonami.cl/files/presentaciones/1566/01.-%20Iniciativa%20Scenario%20Planning.pdf>

Jara Donoso, J. (2007). *Exploración de minerales en Chile: análisis y desafíos futuros*. Santiago, Chile: Pontificia Universidad Católica de Chile.

JRI. (2015). *Líneas de Desarrollo I+D+i en Disposición de Relaves Mineros*. Santiago, Chile: Centro de Investigación JRI Ingeniería. Reporte no publicado.

Krebs, R. (2014) *Minería chilena mantiene alza en costos de producción y aumenta brecha con competidores*. *Leadersandmining.com*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://leadersandmining.com/article/mineria-chilena-mantiene-alza-en-costos-de-produccion-y-aumenta-brecha-con-competidores.html>

Kretschmer, T. (2012). *Information and Communication Technologies and Productivity Growth: A Survey of the Literature*. *OECD Digital Economy Papers, No. 195*. OECD Publishing, Paris. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.oecd-ilibrary.org/science-and-technology/information-and-communication-technologies-and-productivity-growth_5k9bh3jllgs7-en

- Lagos, G. (2014). *Incertidumbre en las evaluaciones ambientales*. *El Mercurio*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.gustavolagos.cl/uploads/1/2/4/2/12428079/clase_ejecutiva_2014-08_-_columna_el_mercurio_-_incertidumbre_evaluaciones_ambientales_g.lagos.pdf
- Lagos, G., Peters, D., & Jara, J.J. (2015). *Potencialidades y Desafíos para la Minería del Cobre Chileno a 2035*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.gustavolagos.cl/uploads/1/2/4/2/12428079/potencialidades_y_desaf%C3%ADos_de_la_miner%C3%ADa_chilena_del_cobre_a_2035_v22__6-7-15.pdf
- León Ross, M. J. (2012). *Acceso a terrenos para la minería: análisis del sistema de concesión y administración de propiedades mineras en Chile*. Santiago, Chile: Universidad Católica de Chile.
- Ley N° 18097 Ley Orgánica Constitucional de Concesiones Mineras. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile, 21 de enero 1982. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.leychile.cl/Navegar?idNorma=29522>
- Lillo, B. (2008). *Subterra*. Mono Azul.
- McKinsey & Company. (2015). *How digital innovation can improve mining productivity*. *McKinsey.com*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.mckinsey.com/industries/metals-and-mining/our-insights/how-digital-innovation-can-improve-mining-productivity>
- Meller, P. (2013). *La viga maestra y el sueldo de Chile*. UQBAR.
- Meller, P. (2015). *El déficit de innovación en Chile: ¿qué hacer?* Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.cieplan.org/biblioteca/detalle.tpl?id=359>
- Meller, P. & Gana, J. (2015). *El desarrollo de proveedores mineros en Australia: implicancias para Chile*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://cieplan.cl/media/publicaciones/archivos/378/El_desarrollo_de_proveedores_mineros_en_Australia_Implicancias_para_Chile.pdf
- Ministerio de Economía. (2015). *Resultados Preliminares IV Encuesta Nacional sobre Gasto y Personal en I+D*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.economia.gob.cl/wp-content/uploads/2015/01/Presentaci%C3%B3n-I-D-2013p_prensa.pdf
- Ministerio de Economía. (2015a). *Encuesta trayectoria de profesionales con grado de doctor residentes en Chile*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.economia.gob.cl/wp-content/uploads/2015/01/Presentaci%C3%B3n-principales-resultados-CDH.pdf>
- Moscoso, C. & Contreras, E. (2005). *Marco institucional y trabas al financiamiento de la exploración y mediana minería en Chile*. Santiago, Chile: Proyecto Fondef 1087 Atacama Resource Capital.
- Naciones Unidas. (2011). *How to attract and benefit from FDI in Mining: Lessons from Canada and Chile*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://unctad.org/en/Docs/diaepcb2010d11_en.pdf
- National Mining Association. (1998). *Mining Industry Roadmap for Crosscutting Technologies*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/ccroadmap.pdf>
- National Mining Association. (2000). *Mineral Processing Technology Roadmap*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/mptroadmap.pdf>
- National Mining Association. (2002). *Exploration and Mining Technology Roadmap*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://energy.gov/sites/prod/files/2013/11/f4/emroadmap.pdf>
- Neruda, P. (2005). *Odas elementales*. Pehuén.
- Parra, A. (2011). *Construcción de una función de costos operacionales para producción de cobre*. Tesis de maestría no publicada, Universidad de Chile, Santiago, Chile.
- Phaal, R., Farrukh, C., & Probert, D. (2001). *T-Plan: The fast-start to technology roadmapping. Planning your route to success*. Institute for Manufacturing (IfM), Universidad de Cambridge, Cambridge, Inglaterra.
- Phaal, R. & Probert, D. (2009). *Technology roadmapping: facilitating collaborative research strategy*. Institute for Manufacturing (IfM), Universidad de Cambridge, Cambridge, Inglaterra.
- Porter, M. E. & Heppelmann, J. E. (2014). *How Smart, Connected Products Are Transforming Competition*. Harvard Business Review. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <https://hbr.org/2014/11/how-smart-connected-products-are-transforming-competition/ar/1>

Programa Estratégico de Industrias Inteligentes de CORFO. (2014). *Programa Estratégico Nacional. Industrias Inteligentes*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.agendaproductividad.cl/wp-content/uploads/sites/22/2014/10/Programa-Estrat%C3%A9gico-Nacional-Industrias-Inteligentes.pdf>

Sachs, J. D., & Warner, A. M. (1995). *Natural resource abundance and economic growth* (No. w5398). National Bureau of Economic Research.

Schaller, R. R. (2004). *Technological innovation in the semiconductor industry: a case study of the International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS)*. Disertación doctoral, George Mason University, Fairfax, Virginia, Estados Unidos.

Scott-Kemmis, D. (2012). *Resource-Based Industry Development: Strategies for the Development of Mining Equipment, Technology and Services Suppliers in Australia*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: https://www.researchgate.net/publication/282854555_Resource-Based_Industry_Development_Strategies_for_the_Development_of_Mining_Equipment_Technology_and_Services_Suppliers_in_Australia

Servicio de Información de Educación Superior. (2013). *Educación Superior. Base de Datos. Centros de Estudios*. mineduc.cl Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.mifuturo.cl/index.php/academicos-einvestigadores>

Servicio Geológico de Estados Unidos. (1996). *USGS Mineral Commodity Summaries 1995*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/coppemcs96.pdf>

Servicio Geológico de Estados Unidos. (2002). *USGS Mineral Commodity Summaries 2001*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/index.html#mcs>

Servicio Geológico de Estados Unidos. (2006). *USGS Mineral Commodity Summaries 2005*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/index.html#mcs>

Servicio Geológico de Estados Unidos. (2015). *USGS Mineral Commodity Summaries 2014*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/index.html#mcs>

Servicio Geológico de Estados Unidos. (2016). *USGS Mineral Commodity Summaries 2015*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://minerals.usgs.gov/minerals/pubs/commodity/copper/index.html#mcs>

Servicio Nacional de Geología y Minería. (1995). *Anuario de la Minería de Chile*. Santiago, Chile: Cochilco.

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2005). *Anuario de la Minería de Chile*. Santiago, Chile: Cochilco.

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2008). *Manual de Evaluación de Riesgos de Faenas Mineras Abandonadas o Paralizadas (FMA/P)*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.sernageomin.cl/pdf/material/MANUALDEEVALUACIONRIESGOSFMAP.pdf>

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2013). *Guía de Buenas Prácticas Ambientales para la Pequeña Minería*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/ambiente/construccion_operacion_tranques.pdf

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2014). *Anuario de la Minería de Chile*. Santiago, Chile: Cochilco. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/estadisticas/anuario/anuario2014.pdf>

Servicio Nacional de Geología y Minería. (2015). *Catastro de depósito de relaves*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.sernageomin.cl/pdf/mineria/seguridad/estudios/Catastro-depositos-relave-de-Chile-julio2015.pdf>

Sevilla, M. P. (2012). *Educación Técnica Profesional en Chile*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://portales.mineduc.cl/usuarios/mineduc/doc/201204241130130.DiagnOsticoEducacionTPCentrodeEstudiosMINEDUC.pdf>

SNL Metals & Mining. (2015). *Exploration budget 2015*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: www.snl.com

Sociedad de Fomento Fabril. (2015). *Inversiones catastradas caen 9,1% y proyectos detenidos aumentan a más de US\$90 mil millones. Observatorio de la Inversión*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://app.sofofa.cl/indicadores/CPI/Informe/Observatorio13.pdf>

Solorza, C. (2015). *Pdte. Corte Suprema: 'No existe ningún proyecto de inversión paralizado por orden de los tribunales'*. Pulso.cl. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.pulso.cl/noticia/economia/economia/2015/11/7-74623-9-pdte-corte-suprema-no-existe-ningun-proyecto-de-inversion-paralizado-por-orden.shtml>

Superintendencia del Medio Ambiente. (2013). *Cuenta Pública 2013*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.sma.gob.cl/index.php/noticias/notas/24-gestion-sma/356-cuenta-publica-2013>

Superintendencia del Medio Ambiente. (2014). *Cuenta Pública 2014*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.sma.gob.cl/index.php/cuenta-publica-2014>

Tulcanza, E. (2014). *Guías Internacionales en la Estimación de Recursos y Reservas Mineras*. En seminario *Prácticas Internacionales para la Estimación de Recursos y Reservas Mineras*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.comisionminera.cl/documentacion/category/60-seminario-practicas-internacionales-para-la-estimacion-de-recursos-y-reservas-mineras-7-may-2014?download=420:2-guias-internacionales-est-r-y-r-e-tulcanza-crirsco>

VTT. (2013). *Productivity leap with IoT: Visions of the Internet of Things with a special focus on global asset management and smart lighting*. Oulu, Finlandia: VTT Technical Research Centre of Finland. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.vtt.fi/inf/pdf/visions/2013/V3.pdf>

Willyard, C.H. & McClees, C.W. (1987). Motorola's technology roadmap process. *Research Management*, sep. – oct.

Wood Mackenzie. (2015). *What's next for copper in the wake of the super cycle?* Reporte no publicado.

World Economic Forum. (2014a). *Global Energy Architecture Performance Index Report 2015*. Ginebra, Suiza: World Economic Forum. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www3.weforum.org/docs/WEF_GlobalEnergyArchitecture_2015.pdf

World Economic Forum. (2014b). *Global Energy Architecture Performance Index 2015: Methodological Addendum*. Ginebra, Suiza: World Economic Forum. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: http://www3.weforum.org/docs/WEF_GlobalEnergyArchitecturePerformance_Index_2015.pdf

World Information Service on Energy. (2016). *WISE Uranium Project*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.wise-uranium.org/>

Zauschquevich, A. & Sutulov, A. (1975). *Antecedentes históricos de la producción de cobre en Chile*. Recuperado el 1 de febrero de 2016, de: <http://www.memoriachilena.cl/archivos2/pdfs/MC0000027.pdf>

ISBN: 978-956-8200-30-5



9 789568 200305