Beauchef MINERÍA

Revolución Tecnológica 4.0 y Capital Humano

Una Mirada desde la Minería

Autores: Patricio Meller y Bárbara Salinas

Serie de Estudios sobre Minería, Tecnología y Sociedad

fcfm FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS UNIVERSIDAD DE CHILE

Beauchef Minería

Es una iniciativa de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile. Su misión es ser un centro de pensamiento que cumpla funciones orientadoras y de apoyo a las políticas públicas en el ámbito minero. De esta forma, busca contribuir al aumento de la competitividad de la industria minera nacional, cooperar al fortalecimiento y articulación de su ecosistema de innovación y posicionar las actividades de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas en el ámbito nacional e internacional.

Como parte importante de su quehacer, Beauchef Minería organiza coloquios y estudios sobre temas de alto interés para la industria minera, los que dan cuenta de las actividades de I+D+i en minería de la Facultad.

Revolución Tecnológica 4.0 y Capital Humano
Una Mirada desde la Minería

Serie de Estudios sobre Tecnología, Minería y Sociedad

Miembros del Directorio:

Javier Ruiz del Solar
James McPhee
Willy Kracht
Patricio Meller
Alejandro Jofré
Fernando Ordóñez

Comité Editoria

Patricio Meller
Gabriela Novoa
Javier Ruiz del Solar
Bárbara Salinas

Colaboradores

Rodrigo Cortés
Luis Vargas
Alejandro Jofré
Álvaro Egaña
Alejandro Ehrenfeld
Paul Vallejos

contacto@beauchefmineria.cl

www.beauchefmineria.cl

Av. Beauchef 850, Santiago, Chile.

Marzo 2019

Contenido

Acrónimos 4

Listado de figuras 6

Listado de tablas 7

Listado de gráficos 8

Prólogo 9

Introducción 10

I. El Capital Humano Avanzado y la Revolución Tecnológica 4.0 12

1. Breve revisión del concepto capital humano 13
2. Rol del capital humano en el desarrollo económico 14
3. El capital humano y las revoluciones tecnológicas 16
4. La relación entre ciencia y tecnología (y entre universidad y empresa) 20
5. Desafíos del capital humano del futuro 25

II. Capital Humano en Chile 28

1. Ingenieros y doctores 30
2. Investigación y Desarrollo (I&D) 37
3. Becas 59
4. Profesionales en la minería chilena 66
5. Doctores y empresas productivas 72

III. Tendencias Tecnológicas Relevantes para la Minería Futura 75

1. Tendencias en minería 76

   Enfoque 1: Tendencias globales determinantes para el futuro de la minería *77*

   Enfoque 2: Programas colaborativos *104*

   Enfoque 3: Tendencias tecnológicas específicas de los procesos productivos *108*

2. El capital humano para la minería del futuro 116

Anexos 129

Referencias 138

Acrónimos

ACSTI	Advisory Council for Science Technology and Innovation
ALGES	Advanced Laboratory for Geostatistical Supercomputing
AMTC	Advanced Mining Technology Center
ANIP	Asociación Nacional de Investigadores de Postgrado
CCM	Consejo de Competencias Mineras
CEO	Chief Executive Officer
CIO	Centro Integrado de Operaciones
CNE	Comisión Nacional de Energía
CNP	Comisión Nacional de Productividad
CODELCO	Corporación Nacional del Cobre
CONICYT	Comisión Nacional de Investigación Científica y Tecnológica
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation
ERNC	Energías Renovables no Convencionales
FCFM	Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas
FONDECYT	Fondo Nacional de Desarrollo Científico y Tecnológico
FONDEF	Fondo de Fomento al Desarrollo Científico y Tecnológico
GMG	Global Mining Guidelines Group
IA	Inteligencia Artificial
IoT	Internet of Things
IPSFL	Instituciones privadas sin fines de lucro
ISI	Institute for Scientific Information
I&D	Investigación y Desarrollo
JCE	Jornadas Completas Equivalentes

KH	Capital humano
METS	Australian Mining Equipment, Technology and Services
MWCC	Marine Well Containment Company
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos
ONU	Organización de las Naciones Unidas
PAI	Programa de Atracción e Inserción de Capital Humano Avanzado
PD	Países desarrollados
PIA	Programa de Investigación Asociativa
PwC	PricewaterhouseCoopers
RRHH	Recursos humanos
RTCMA	Rio Tinto Centre for Mine Automation
TMC	Toneladas métricas de cobre
VAMOS	Viable Alternative Mine Operating System
WOS	Web of Science

Listado de figuras

Figura 1: Modelo de Matriz de I&D: El Cuadrante de Pasteur 22

Figura 2: Modelo Dual 23

Figura 3: Rezagos provocados por la transición tecnológica 26

Figura 4: Tendencias globales determinantes en la minería 77

Figura 5: Interrelación entre las tendencias globales determinantes en la minería 78

Figura 6: Datos utilizados por las empresas mineras 86

Figura 7: Beneficios del Big Data en la industria minera 89

Figura 8: Matriz energética global (% del total de la generación energética) 99

Figura 9: Ejemplos de tecnologías nuevas y emergentes a lo largo de la cadena de valor de la industria minera 109

Figura 10: Habilidades humanas v/s maquinas en el tiempo 117

Figura 11: Nuevos roles que surgen de la interacción de los roles tradicionales 118

Listado de tablas

Tabla 1: Titulados de Ingeniería y de Ingeniería de Minas en Chile (2007-2017) 30

Tabla 2: Doctores según área de estudio de su doctorado (2011 y 2014) 34

Tabla 3: N° de doctores en Australia, Canadá, Chile y Estados Unidos 35

Tabla 4: Fuentes de financiamiento y ejecución de I&D año 2016 (millones de pesos) 37

Tabla 5: Gasto en I&D ejecutado por empresas (2016) 38

Tabla 6: Personal dedicado a I&D, 2016 (Jornadas Completas Equivalentes (JCE)) 39

Tabla 7: Personal dedicado a I&D según nivel académico, 2016 (JCE) 39

Tabla 8: Personal dedicado a investigación en empresas y universidades, 2016 (JCE) 40

Tabla 9: Personal dedicado a investigación en empresas por sector, 2016 (JCE) 41

Tabla 10: N° de patentes y artículos en Chile 42

Tabla 11: Principales indicadores para Australia, Canadá, EE.UU y Chile 45

Tabla 12: Gasto privado por personal dedicado a I&D en el sector privado en Australia, Canadá y Chile 46

Tabla 13: Empresas consideradas para el gráfico 7 y 8 49

Tabla 14: N° de patentes y patentes por millón de habitantes para Chile y países referentes . 52

Tabla 15: N° de artículos en publicaciones científicas y técnicas y por millón de habitantes para Chile y países referentes (2016) 56

Tabla 16: Ayudas entregadas por Becas Chile (2008-2016) 59

Tabla 17: Becas otorgadas por CONICYT para magíster (2009-2017) 60

Tabla 18: Becas otorgadas por CONICYY para doctorado (2009-2017) 60

Tabla 19: Personal dedicado a I&D en empresas en Chile y países referentes 68

Tabla 20: Profesionales altamente cualificados en la industria minera australiana (2017) 70

Tabla 21: Tecnologías productivas y sus beneficios prácticos (Rio Tinto) 81

Tabla 22: Tasa de fatalidad para Chile, EE.UU. y Australia 94

Tabla 23: Capacidad instalada de energía solar y eólica en Chile (2012-2018) 98

Listado de gráficos

Gráfico 1: Doctores según área de conocimiento (2014) 31
Gráfico 2: Cantidad de doctores según ciudadanía (2011 y 2014) 32
Gráfico 3: Doctores empleados por sector (2014) 36
Gráfico 4: Gasto en I&D como porcentaje del PIB en países miembros OCDE (2016) 44
Gráfico 5: Investigadores en I&D por cada 1000 trabajadores 47
Gráfico 6: Investigadores en sector privado y universidades en países OCDE 48
Gráfico 7: Doctores en las gerencias y directorios de las más grandes empresas mundiales 50
Gráfico 8: Magísteres en las gerencias y directorios de las más grandes empresas mundiales 51
Gráfico 9: Patentes por millón de habitantes 53
Gráfico 10: Artículos por millón de habitantes 57
Gráfico 11: Patentes y artículos por millón de habitantes (2013-2017) 58
Gráfico 12: Becas de magíster otorgadas por área OCDE (2017) 61
Gráfico 13: Becas de doctorado otorgadas por área OCDE (2017) 62
Gráfico 14: Trabajadores según categoría 66
Gráfico 15: Trabajadores con educación superior por categoría 67

Prólogo

La Revolución Tecnológica 4.0, impulsada por la transformación digital, la automatización, la robótica, el IoT (Internet de las cosas), el *Big Data* y la inteligencia artificial, está impactando a todas las industrias a nivel mundial. Por una parte se espera que, al igual que revoluciones anteriores, esta permita mejorar nuestra calidad de vida. Pero por otra, existe preocupación por los acelerados cambios que se producirán y la posibilidad de que se generen grandes impactos negativos, como mayores cifras de desempleo o el incremento de la desigualdad entre los países y las industrias que sean capaces de aprovechar y capitalizar estas tecnologías y aquellos que no. Sin duda, existe preocupación en el mundo entero sobre cómo surfear esta mega ola tecnológica.

No cabe duda de que el capital humano es un elemento clave para enfrentar adecuadamente este proceso y, ciertamente, aquellos países e industrias que cuenten con profesionales entrenados en las nuevas tecnologías, podrán adaptarse de mejor forma al tsunami tecnológico que nos está inundando.

En este contexto, el presente estudio es de crucial importancia al identificar aspectos claves que deben ser abordados por Chile y su industria minera para ser parte de esta nueva era tecnológica. "Revolución Tecnológica 4.0 y Capital Humano: Una Mirada desde la Minería" aborda—de una manera clara y precisa—la brecha con los países desarrollados asociada al capital humano requerido para las múltiples innovaciones tecnológicas que están ocurriendo en el siglo XXI, presentando las falencias de Chile en esta materia. Asimismo, ofrece un acertado análisis sobre las tendencias tecnológicas relevantes para la minería futura, identificando desafíos de corto, mediano y largo plazo en el ámbito del capital humano.

Desde Beauchef Minería esperamos que este estudio sea un aporte a la discusión de estas materias en nuestro país, teniendo como principal objetivo, aportar al aumento de la competitividad de la industria minera nacional, cooperar con el fortalecimiento y articulación de su ecosistema de innovación y con planteamientos de temas estratégicos para el desarrollo del sector.

Javier Ruiz del Solar
Director Ejecutivo Beauchef Minería

Revolución Tecnológica 4.0 y Capital Humano
Una Mirada desde la Minería[1]

Autores: Patricio Meller & Bárbara Salinas

Introducción

A pesar de que Chile ha mejorado sus índices económicos y la calidad de vida de sus ciudadanos, aún existe una gran brecha con los países desarrollados asociada al capital humano requerido para las múltiples innovaciones tecnológicas que están ocurriendo en el siglo XXI. Esta es la problemática que motivó el desarrollo de este estudio y que ha generado una serie de preguntas que trataremos de abordar; sin embargo hay que tener presente que a veces las interrogantes son más relevantes que las respuestas.

Así surge la principal pregunta de este estudio, que es determinar cuál es el capital humano que aumentaría la probabilidad de que Chile se inserte en la Revolución Tecnológica. 4.0.

La forma de enfrentar el tópico del capital humano ha ido variando a medida que Chile avanza en términos económicos. Hace cien años nos preguntábamos cuándo Chile iba a ser un país desarrollado. Hoy en día el cuestionamiento está más relacionado con el método que usaremos para llegar a esta meta. Dada las características de nuestra economía, surge el planteamiento sobre si el cobre puede transformar a Chile en un país desarrollado. ¿Por qué el cobre? La respuesta es que Chile es chico en todo, menos en cobre. Si nos comparamos con China, un país que nos supera en prácticamente todos los índices económicos, en cobre es muy inferior a nosotros.

Otro concepto importante dentro de este estudio es que estamos viviendo una revolución tecnológica 4.0 basada en la transformación digital, la robótica, la nanotecnología, la bio-genética y

[1] Este estudio forma parte de las actividades desarrolladas por Beauchef Minería durante el año 2018. Los autores agradecen los comentarios y sugerencias recibidas de Javier Ruiz del Solar, Rodrigo Cortés, James McPhee, Alejandro Jofré, Luis Vargas, Álvaro Egaña, Alejandro Ehrenfeld y Paul Vallejos. Como es habitual, los autores son los únicos responsables por el contenido.

combinaciones entre estas cuatro tecnologías. Chile vio pasar las tres revoluciones tecnológicas anteriores: el motor a vapor en el siglo XVIII, la electricidad y petróleo en el siglo XIX y el computador del siglo XX. Esta nueva revolución la tenemos delante de nosotros y no podemos dejarla pasar. Pero ¿cómo se inserta Chile en la Revolución Tecnológica 4.0?

Existe una hipótesis que plantea que el mundo es plano, que la información y el conocimiento están disponibles en todas partes (Friedman 2005). Casi todos tienen celulares, cada celular tiene más capacidad de lo que tenía un computador cuando el ser humano llegó a la luna. En teoría, con este potencial tecnológico cualquiera podría inventar cualquier cosa en cualquier lugar. Sin embargo, si bien la información, el conocimiento y la tecnología están disponibles en todos lados, ¿por qué Chile no está en la frontera de la innovación?

Así surge la principal pregunta de este estudio, que es determinar cuál es el capital humano que aumentaría la probabilidad de que Chile se inserte en la Revolución Tecnológica 4.0. Para esto hemos propuesto dos supuestos claves: (1) necesitamos mayor número de doctores en ciencias y tecnología y (2) el cobre nos servirá como plataforma de innovación tecnológica.

Este estudio intenta responder a las interrogantes previamente mencionadas con el objetivo de poner este tema en la agenda y hacer un análisis que sea útil para el sector público, universidades, centros de investigación y empresas mineras.

I. El Capital Humano Avanzado y la Revolución Tecnológica 4.0

1. Breve revisión del concepto capital humano

Empíricamente, se observa que las personas obtienen diferentes niveles de remuneraciones. La explicación económica convencional plantea que los diferenciales de remuneraciones se deben a diferenciales de productividad, los cuales son generados por distintos niveles de conocimiento y de calificaciones. Estos niveles de calificaciones y conocimiento corresponden a diversas categorías de capital humano. El capital humano (KH) representa la educación, habilidades y aptitudes que posee una persona. Luego, según la teoría económica, si una persona quiere incrementar su nivel de ingreso entonces tiene que destinar tiempo y recursos para aumentar su capacidad productiva; esto implica invertir en su persona, lo que se ha denominado inversión en KH.

La terminología KH permite asociar y asimilar este concepto a la inversión en maquinaria. Es así como hay una gran cantidad de estudios dedicados al cálculo de la tasa de retorno de la educación escolar, técnica y universitaria. Afortunadamente, las tasas de retorno son elevadas y eso explica presumiblemente (!!!) el porqué los niños van a la escuela y los jóvenes ingresan a la universidad; están invirtiendo en KH cuya tasa de retorno es muy ventajosa. Para el cálculo de tasas de retorno de diversas carreras profesionales chilenas ver (Meller 2010).

En consecuencia, la educación se ha transformado en el principal mecanismo para abordar los problemas de distribución inequitativa del ingreso y movilidad social. Mayores niveles de educación vía inversión en KH generan mayores niveles de ingreso y mejor status social. Este enfoque (teoría del KH neoclásica) enfatiza implícitamente la responsabilidad y esfuerzo individual sobre los logros que una persona alcanza en su vida.

Pero la educación formal no es el único mecanismo para la adquisición de KH. La experiencia en el lugar de trabajo (denominada "aprender haciendo"), la interacción con otras personas, el entorno cultural y familiar y el conocimiento tácito adquirido contribuyen a incrementar el KH.

El capital humano no es una noción fija, es un concepto dinámico. Esto implica que puede aumentarse a través del tiempo. Pero puede suceder lo contrario; debido al poco uso se puede depreciar, y aún peor, puede tornarse obsoleto.

El KH ha superado la importancia conceptual inicial que se le había otorgado como relevante a nivel individual (1950 a 1990). En efecto, el KH constituye ahora un factor significativo para el desarrollo económico (a partir de 1990). Aún más, en este siglo XXI el KH se ha transformado en el componente fundamental para el éxito económico y social de todos los países. Los rápidos y diversos cambios tecno-

lógicos que están ocurriendo, la avalancha de información y conocimiento y la mutación contemporánea hacia un mundo digital requieren que toda la sociedad haga esta reconversión de KH. En breve, el KH constituye el factor esencial de la competitividad y del progreso de los países.

El capital humano no es solo crítico para la eficiencia productiva. Una sociedad con más y mejor capital humano va a tener un conjunto de instituciones que tendrían teóricamente mayor capacidad para resolver cívicamente los conflictos políticos, sociales y económicos.

2. Rol del capital humano en el desarrollo económico

Reiterando, el KH es un componente decisivo para la competitividad, el crecimiento, el desarrollo económico y para tener ciudadanos más informados que constituyan una sociedad más culta y elijan mejores gobernantes. Profesionales y trabajadores mejor preparados son necesarios para operar (y mantener) maquinarias y equipos sofisticados. La educación especializada y la investigación científica contribuyen a la incorporación del progreso científico y de las innovaciones tecnológicas. El KH docto es un factor determinante para la adopción de las nuevas tecnologías y nuevas innovaciones.

En el caso de los ingenieros hay dos tipos de habilidades que supuestamente proporciona la educación universitaria. (i) Capacidad técnica, i.e. destrezas para el manejo de la tecnología moderna. (ii) Habilidades generales, i.e. aptitudes para pensar independientemente, para trabajar en equipo, para resolver problemas, para ser creativo.

El KH tiene un efecto positivo adicional debido al grado de *complementariedad* que tiene con la tecnología (maquinaria) moderna. Esto implica que hay un gran impacto sobre la expansión de la producción de un país al incrementar *simultáneamente* el capital humano y la maquinaria. En otras palabras, aun cuando la tecnología moderna está disponible para todos los países, solo los que invierten más en capital físico (maquinaria, infraestructura) y en KH tendrían mayores tasas de crecimiento económico.

La cantidad de profesionales y técnicos locales influye sobre la velocidad de difusión y adopción de las nuevas tecnologías[2]; esto acelera el proceso de convergencia ("catch up") con el nivel de los países desarrollados (PD). Por otra parte, la existencia de un stock de KH importante atrae flujos de inversión extranjera, influyendo por esta otra vía sobre el crecimiento económico.

La globalización y los acelerados cambios tecnológicos han potenciado la relevancia de la innovación. La mayoría de las empresas de todos los países enfrentan presiones para

[2] Para un estudio empírico sobre el déficit de profesionales chilenos ver Meller & Rappoport (2003). En este estudio se señala que no basta con aumentar la cantidad de profesionales; importa mucho la calidad de estos profesionales, y a este respecto los indicadores de calidad (de los profesionales chilenos) es precaria.

implementar continuamente procesos de ajuste e innovación. En general, la revolución tecnológica, el incremento exponencial de la información y de la digitalización, hacen que el KH sea esencial para la incorporación de las nuevas tecnologías e innovaciones. El conocimiento y la comprensión de estos cambios valorizan el KH especializado; hay un "Premium" para este tipo de KH. Las universidades adquieren la responsabilidad de generar la oferta y tipo de KH que requieren las empresas. Adicionalmente, los investigadores académicos, dadas sus ventajas comparativas, debieran preocuparse e involucrarse en la problemática que afecta a las empresas en sus procesos de ajuste e innovación para mantener su competitividad. Esto puede requerir una mayor interacción entre los ejecutivos de las empresas y los académicos, lo cual crea un círculo virtuoso para ambos.

Por ejemplo, en el Advanced Mining Technology Center (AMTC) de la Universidad de Chile, un centro de investigación enfocado a desarrollar investigación multidisciplinaria para la minería, se han logrado avances tecnológicos importantes que han beneficiado a la industria, al país y a la universidad. Es un centro que responde directamente a las necesidades del sector y busca soluciones a problemas concretos que este presenta, por lo que existe una constante interacción entre ambas entidades con el fin de lograr soluciones beneficiosas para ambos. Esto queda de manifiesto en su fuente de financiamiento, la cual ha alcanzado un equilibrio esperado, compuesta por un tercio de fondos provenientes del Programa de Investigación Asociativa (PIA) de Centros Basales de CONICYT, un tercio de fondos concursables para Investigación y Desarrollo (I&D) y un tercio que procede directamente de la industria minera mediante contratos de I&D (más de $ 1.500 millones anuales).

La revolución tecnológica, el incremento exponencial de la información y de la digitalización, hacen que el KH sea esencial para la incorporación de las nuevas tecnologías e innovaciones.

3. El capital humano y las revoluciones tecnológicas

Las revoluciones (tecnológicas) industriales han sido los factores centrales para aumentar las tasas de crecimiento económico y el estándar de vida (de todos los países). Antes del siglo XVIII el crecimiento del ingreso/cápita de los países europeos era casi nulo. Desde 1800 hasta ahora el ingreso/cápita de los países OCDE ha aumentado 30 veces (i.e., un aumento del 3.000%).

La Primera Revolución Industrial (fines siglo XVIII-comienzos siglo XIX) está asociada a la máquina de vapor, la introducción del sistema productivo vía fábricas[3], el desarrollo del ferrocarril y el gran avance de la metalurgia. La Segunda Revolución Industrial (1870-1914) fue impulsada por el desarrollo de la electricidad (motores eléctricos y luz en la noche), motor de combustión interna (el automóvil[4] y las carreteras), las comunicaciones (telefonía, radio, películas), la química (petróleo, farmacéutica, plásticos), alcantarillado y gasfitería (agua potable en las casas). La Tercera Revolución Industrial (1950 hasta el comienzo del siglo XXI) está promovida por el computador, las tecnologías digitales, Internet, y la telefonía móvil (Gordon 2016).

Cada revolución industrial ha modificado sustantivamente la forma de vida de las personas y el proceso productivo de las empresas. Pero hay que tener en cuenta que cada revolución surge de la anterior; hay disrupción pero hay vinculación con el pasado. La tecnología digital no habría podido ser desplegada, acrecentada y difundida si no hubiera habido un notable desarrollo de la electricidad.

La Cuarta Revolución Industrial (la actual) es posible precisamente gracias al progreso de la tecnología digital. Ésta ha posibilitado avances en muy diversas áreas: biotecnología, nanotecnología, robótica, inteligencia artificial (IA), impresión 3D, etc.

Schwab (2016) plantea que la Cuarta Revolución Industrial es distinta a las revoluciones tecnológicas anteriores debido a tres elementos: (i) Velocidad – La tres revoluciones tecnológicas anteriores tienen una evolución de tipo lineal; en cambio la velocidad de la actual es exponencial. Esto se facilita por vivir en un mundo interconectado en que el tiempo de enlace es lo que demora un click. (ii) Cobertura y profundidad – Hay una combinación de múltiples tecnologías que están produciendo cambios paradigmáticos en los individuos, la sociedad, la economía y en la política. "No sólo está modificando el "qué" y el "cómo" hacemos las cosas; además, nos está modificando a nosotros mismos". (iii) Impacto Sistémico – Esta revolución tecnológica está transformando el mundo, los países, las personas y las sociedades; en breve, está rediseñando el mundo en el cual vivimos. Incluso "está cuestionando las ideas que tenemos respecto a que significa ser un ser humano".

[3] Adam Smith explica las ventajas del incipiente nuevo sistema productivo capitalista (en relación al sistema agrario-feudal) utilizando la "fábrica de alfileres".
[4] Ver el libro The Machine that changed the World

¿Están los líderes políticos, la academia y los CEO de las empresas, preparados para aprovechar el potencial vinculado a la Revolución 4.0?

El dilema central es la interrelación entre la Tecnología y la Sociedad. A este respecto, Schwab (2016) plantea que si bien la tecnología es exógena, las alternativas de la Sociedad no se restringen a la dicotomía "aceptarla y vivir con ella" o "rechazarla y vivir sin ella". La Revolución Industrial 4.0 está generando cambios tan dramáticos que nos induce a cuestionarnos "quienes somos y cómo vemos el mundo".

¿Están los líderes políticos, la academia y los CEO[5] de las empresas, preparados para aprovechar el potencial vinculado a la Revolución 4.0?

Las empresas productivas (y también las académicas) tendrán que integrar átomos y bits, i.e., tecnologías físicas y digitales para aumentar la eficiencia, crecer e innovar. Esto implica un cambio organizacional profundo; los CEO tienen que comprender qué hacen las diversas tecnologías y como insertarlas en sus operaciones y procesos. Según Deloitte (2017), muy pocos ejecutivos empresariales tienen claridad para invertir en las tecnologías modernas; implica salir de su zona familiar de confort por cuanto hay que adoptar nuevos modelos de negocios y enfrentar desafíos con impredecibles consecuencias. En efecto, las empresas pueden seguir diversas transformaciones tecnológicas con modelos de negocios y resultados económicos distintos. La alternativa del statu quo también es una alternativa, pero puede ser la peor, por cuanto la tecnología 4.0 va a ser el mayor diferenciador entre las empresas del futuro.

En los países desarrollados se reconoce la importancia del KH poseedor del conocimiento y del "*expertise*". Para las empresas productivas y las agencias de Gobierno constituye una prioridad maximizar la interacción con este tipo de KH especializado para analizar y sugerir alternativas ante el presente entorno tecnológico. Esto es coherente con la noción de que la tecnología 4.0 va a ser el factor generador de la mayor competitividad futura de las empresas productivas y de los países.

[5] CEO: Chief Executive Officer

En otras palabras, en los PD se ha recurrido al KH especializado que es quien tiene el conocimiento científico y tecnológico y que además es capaz de pensar "fuera de la caja" ("out of the box"). En este mundo global y competitivo se requiere creatividad para imaginar soluciones innovadoras ante disyuntivas complejas. Pero además, los PD apoyan a grupos y redes de KH específico con masa crítica que efectúe I&D y genere activos intangibles. Hay que tener claro que la innovación no es algo que ocurre por shocks repentinos de inspiración, sino que responde a un proceso largo de búsqueda, experimentación y aprendizaje.

Por otra parte, es la empresa productiva la que tiene que implementar las innovaciones y someterlas al test del mercado. Para aumentar la probabilidad de éxito se requiere que la empresa tenga "capabilidad"[6] tecnológica. La evidencia empírica muestra que las empresas productivas invierten poco en I&D. ¿Por qué las empresas latinoamericanas invierten poco en innovación? La falta de capabilidad (capacidad + habilidad) tecnológica es una variable crítica para explicar este fenómeno (Meller & Parodi 2016).

Kim (2000) define el término capabilidad tecnológica como "la habilidad de hacer uso efectivo del conocimiento tecnológico en los ámbitos de producción, ingeniería e innovación; esta capabilidad le permite a la firma usar, adaptar y cambiar la tecnología existente (...) permitiendo también crear nuevas tecnologías en respuesta a un ambiente económico cambiante". En otras palabras, capabilidad no sólo implica internalizar y usar tecnologías; es también tener las competencias para modificarla e innovar, i.e. mover la frontera tecnológica.

En breve, la empresa es la unidad fundamental de acumulación de capabilidad tecnológica y el aprendizaje tecnológico es el proceso a través del cual se adquiere esta capabilidad. Para esto sería conveniente que dentro de la empresa haya KH especializado.

Las empresas constituyen la unidad fundamental de actividad tecnológica y por lo tanto también son la unidad fundamental de acumulación de capabilidad. La visión convencional plantea que los centros de investigación y las universidades pueden generar I&D "ready to use". Sin embargo, para generar una transferencia tecnológica exitosa es necesario que las empresas tengan internamente el KH especializado para poner en funcionamiento esta nueva tecnología, i.e. "conocimiento profundo del proceso productivo" (Bell 2010). En síntesis, la compañía tiene que tener la capacidad de aprender y la capabilidad necesaria para incorporar y utilizar nuevas tecnologías.

[6] La palabra "capability" no tiene un equivalente en español. Capabilidad es capacidad más habilidad pero además implica potencial y *know how*.

El complejo entorno tecnológico actual genera gran incertidumbre. Esto se debe a un doble factor: (i) Es muy difícil estimar y anticipar cuáles serán las innovaciones tecnológicas más exitosas; (ii) es complicado y peliagudo precisar las características resultantes de las innovaciones tecnológicas. Sin embargo, a diferencia de la industria de los celulares que siguen una lógica de "*technology push*", donde las empresas innovan y muchas veces hasta crean necesidades en los consumidores, la industria minera tiende a ser "*demand driven*". Esto quiere decir que las empresas innovan para solucionar problemas que enfrentan en sus operaciones. Dada la escasez de yacimientos superficiales y las bajas leyes del mineral, las empresas mineras han tenido que explotar cada vez más profundo y remoto, enfrentándose a múltiples nuevos desafíos (seguridad de los trabajadores, costos más altos, leyes más bajas, escasez de agua, mayor dureza de roca, etc.) que deben ser resueltos a través de innovaciones tecnológicas.

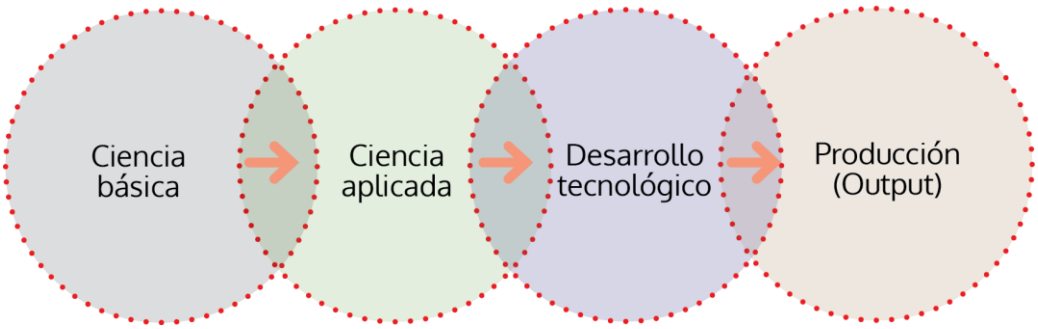
Un país puede incorporar distintas innovaciones tecnológicas, las que generarán diversas trayectorias; la trayectoria en cuestión va a depender de la estructura inicial de KH. Nuevas tecnologías con características inesperadas pueden influir negativamente sobre la acumulación de KH y esto puede conducir a un país a una trayectoria de bajo crecimiento. Para evitar lo anterior, se requiere que la estructura de capital humano tenga amplitud de conocimiento para que pueda percibir y descifrar cuales van a ser las innovaciones más exitosas (Asian Development Bank 2017).

4. La relación entre ciencia y tecnología (y entre universidad y empresa)

Vannevar Bush (1945) plantea el "modelo lineal" de relación entre la ciencia y la innovación tecnológica. Este modelo utiliza los siguientes supuestos fundamentales (Stokes 1997; Oliveira 2014): (a) Hay una dicotomía entre ciencia básica y ciencia aplicada. La ciencia básica tiene como propósito aumentar la comprensión de los fenómenos en un área específica. En cambio, la ciencia aplicada está focalizada en el uso (práctico) del conocimiento. (b) La ciencia básica está guiada por la curiosidad del investigador. (c) La ciencia básica constituye una condición necesaria de la innovación tecnológica, i.e., la ciencia básica es la precursora de la innovación.

En este modelo lineal las etapas son secuenciales; esto significa que cada una depende de la precedente. En breve, reiterando, la ciencia básica es un prerrequisito para la innovación tecnológica.

Este modelo lineal ha constituido la base conceptual para el tipo de políticas públicas vinculadas a las ciencias. En efecto, del modelo lineal se puede inferir lo siguiente (Romer 2005): (a) La ciencia básica genera un incremento del conocimiento que beneficia a toda la sociedad; no es posible que el científico pueda cobrar por la generación de este bien (o servicio). Este conocimiento es un bien público; en consecuencia, tiene que ser subsidiado por el Estado. (b) La generación de nuevas ideas es otro de los motivos para incentivar la ciencia básica. Para este efecto, es fundamental no imponerle restricciones de ningún tipo a los investigadores; que estos se guíen por su intuición y su inquietud. (c) Los científicos y los ingenieros constituyen el principal insumo para la generación de la ciencia básica e innovación tecnológica; en consecuencia, se debiera subsidiar la formación de estos especialistas.



Ha habido diversos cuestionamientos al modelo lineal (Stokes 1997; Rosenberg 1994; Romer 2005):

a) En muchos ejemplos se observa una causalidad inversa; la resolución de problemas concretos influencian la orientación de la ciencia. Por ejemplo, la máquina a vapor (tecnología inaugural de la 1ª Revolución Industrial) fue diseñada para la extracción del agua de las minas; esta es inventada antes del desarrollo de las leyes de la termodinámica. Como dice Rosenberg (1994), "la ciencia le debe más a la máquina a vapor que esta a la ciencia". Hoy hay muchos nuevos productos, procesos productivos y tecnologías cuyo desarrollo refutan la noción de que la ciencia básica es el prerrequisito de la innovación. Reiterando, muchos de los avances científicos son incentivados por las innovaciones tecnológicas.

b) La dicotomía central del modelo lineal "ciencia básica – ciencia aplicada" produce una tensión ficticia entre los objetivos de la investigación guiadas por la comprensión y el uso de la ciencia. El modelo lineal supone que estos son fenómenos separados (disjuntos) y realizados por distintos investigadores. En el quehacer de la ciencia se observa que no existe tal dicotomía; Luis Pasteur es un buen ejemplo. En efecto, los conceptos ciencia básica y ciencia aplicada no son opuestos. Investigaciones orientadas a resolver objetivos aplicados pueden tener un gran efecto en reordenar la estructura conceptual del tópico. El hecho de que la investigación tenga una naturaleza aplicada no implica que al mismo tiempo sea ciencia y ayude a incrementar el conocimiento.

La presunción de la dicotomía genera un sesgo negativo anti-ingenieril y una barrera para el desarrollo de la innovación (Narayanamurti et al. 2013). Como se vio previamente, las implicancias de política pública del modelo lineal justifican el apoyo estatal a la ciencia básica; en cambio la ciencia aplicada debe ser financiada por el sector privado y sometida al test del mercado. Los gobiernos de los países desarrollados se han dado cuenta que este enfoque perjudica el desarrollo de la innovación. Esto se debe a que muchos de los avances tecnológicos no dependen en absoluto del progreso de la ciencia; aún más, frecuentemente es el avance tecnológico el que sirve de inspiración para el avance de la ciencia (Rosenberg 1994).

c) Como resultado de lo anterior, ya a fines del siglo XX ,el gobierno de EE.UU. deja de creer que una gran inversión en ciencia básica cimentada en la curiosidad de los investigadores es condición necesaria para aumentar de la competitividad de la economía. No hay un mecanismo automático que vincula la ciencia pura con las innovaciones tecnológicas y la creación de nuevos productos rentables en el mercado (Stokes 1997). En breve, "todos saben que el modelo lineal de innovación está muerto" (Rosenberg 1994).

Stokes (1997) propone una modificación y extensión del modelo lineal, el modelo cuadrante de la investigación científica, que integra las motivaciones de la investigación basada en la comprensión y aumento del conocimiento con el uso y aplicación de la ciencia.

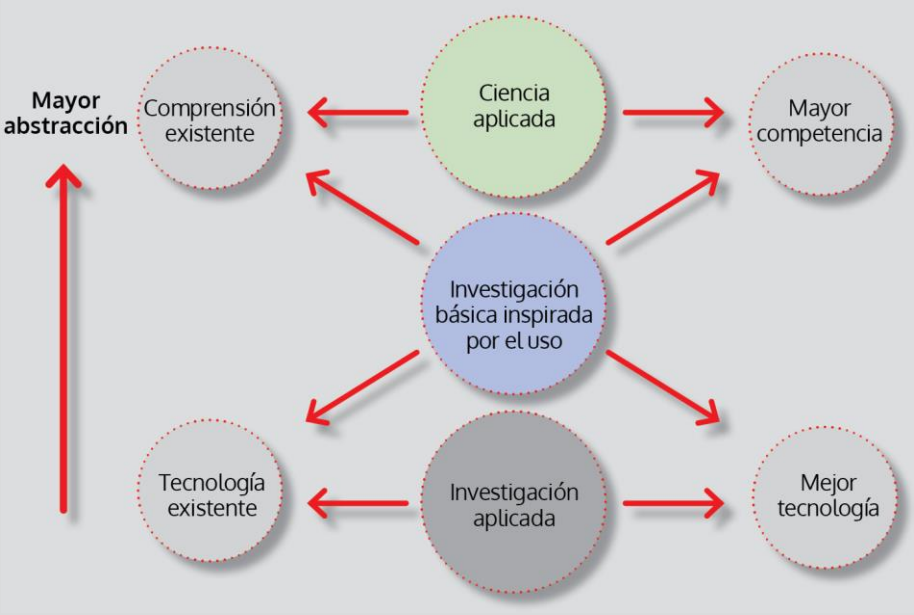
El cuadrado óptimo es el de Pasteur (Nor-Este) en el cual se fusionan la ciencia aplicada con la ciencia básica; la comprensión de los fenómenos con el propósito de resolver un problema específico. En economía es el caso de Keynes que inventa la teoría macroeconómica para resolver problemas económicos a nivel nacional de países en crisis.

El cuadrado Nor-Oeste, representado por Niels Bohr, corresponde a la ciencia básica (estructura del átomo y teoría cuántica) guiada por la curiosidad intelectual y sin ninguna intención de alguna aplicación. En el extremo opuesto (Sur-Este), identificado por Edison, la investigación está motivada por usos aplicados, sin ninguna pretensión de generar una comprensión de los fenómenos. El cuadrado Sur-Oeste está vacío en el artículo original (Stokes 1997), pero puede incluir a muchos investigadores que no les interesa ni una mayor comprensión ni una aplicación de una disciplina. Estos investigadores pueden producir artículos llamativos (o puzles) sobre tópicos irrelevantes o extensiones inútiles sobre teorías existentes que referees descuidados llegan a sugerir su publicación.

Figura 1: **Modelo de Matriz de I&D: El Cuadrante de Pasteur**

Fuente: Stokes (1997)

Figura 2: Modelo Dual



Fuente: Stokes (1997)

Una extensión dinámica del Modelo Cuadrante genera un Modelo Dual en el cual se vinculan trayectorias interactivas pero semi-autónomas de la comprensión científica y el *know how* tecnológico. La ciencia puede evolucionar hacia mayores niveles de comprensión independientemente de lo que sucede con la tecnología. Análogamente, la tecnología puede evolucionar por su parte, independientemente de la ciencia—vía modificaciones o rediseños ingenieriles. Pero adicionalmente puede haber influencias recíprocas bidireccionales e interdependientes ciencia-tecnología inspirada por la ciencia aplicada. Esto es lo que muestra este gráfico (figura 2) con los ejes Abstracción y Progreso (Stokes 1997).

A pesar de la existencia del Cuadrante de Pasteur y del Modelo Dual, el "Modelo Lineal" de relación entre la ciencia básica y la innovación tecnológica "no está muerto". Lo que ha cambiado es el foco del debate. Nadie cuestiona el importante rol de la ciencia en la historia del ser humano y en la sociedad moderna. La ciencia ha cambiado la forma como vivimos, nuestra comprensión del mundo, lo que pensamos y lo que creemos. En breve, la ciencia ha demostrado que es "el mecanismo supremo para incrementar el conocimiento, para explicar los fenómenos existentes, para resolver problemas (simples y complejos) y para ayudar a satisfacer las necesidades humanas" (Rull 2014; Caraça et al. 2009). Hay que preservar el financiamiento público de la ciencia básica.

¿Quién define el tipo de tópicos qué investigan los científicos? Hay dos posturas opuestas:

a) El output de la investigación científica tiene un valor intrínseco en sí; genera un avance e incremento del conocimiento. Prevalece la autonomía (o soberanía) y curiosidad del investigador; es él quien define libremente el foco y orientación de su indagación. En este enfoque el científico no tiene ninguna restricción sobre aplicaciones o uso de los resultados de su investigación. A este respecto la evidencia empírica muestra que funciona el "Principio del Serendipity"; hay descubrimientos fortuitos y aplicaciones posteriores totalmente desvinculadas de la motivación inicial del investigador. Luego, no es posible anticipar cuales podrían ser aplicaciones posibles de los resultados de una investigación en ciencia básica (Oliveira 2014). Un ejemplo clásico es el descubrimiento del láser (1960) que fue realizado como un experimento exclusivamente científico para demostrar una de las conclusiones de Einstein del año 1917. En ese momento el láser fue considerado algo inútil: "un invento en busca de algún uso".

b) Investigación científica con una misión específica ("Misión oriented research"). Los países tienen una serie de desafíos y problemas graves vinculados a pobreza, salud, inequidad, medio ambiente, crecimiento económico, competitividad, innovación. Los recursos públicos son escasos y el financiamiento de la ciencia básica compite con estos otros usos. La investigación científica con una misión específica responde a la necesidad de resolver estos desafíos críticos. En este caso, los recursos públicos para financiar ciencia básica tienen asignada o definida una temática precisa. El investigador tiene la disyuntiva de postular a dichos fondos públicos o abstenerse. ¿Cómo se financiaría la investigación en ciencia básica que no esté incluida en la "misión"?

Una solución salomónica consistiría en asignar recursos a ambos tipo de investigación; esto es lo que aplica CONICYT con los programas FONDEF y FONDECYT.

5. Desafíos del capital humano del futuro

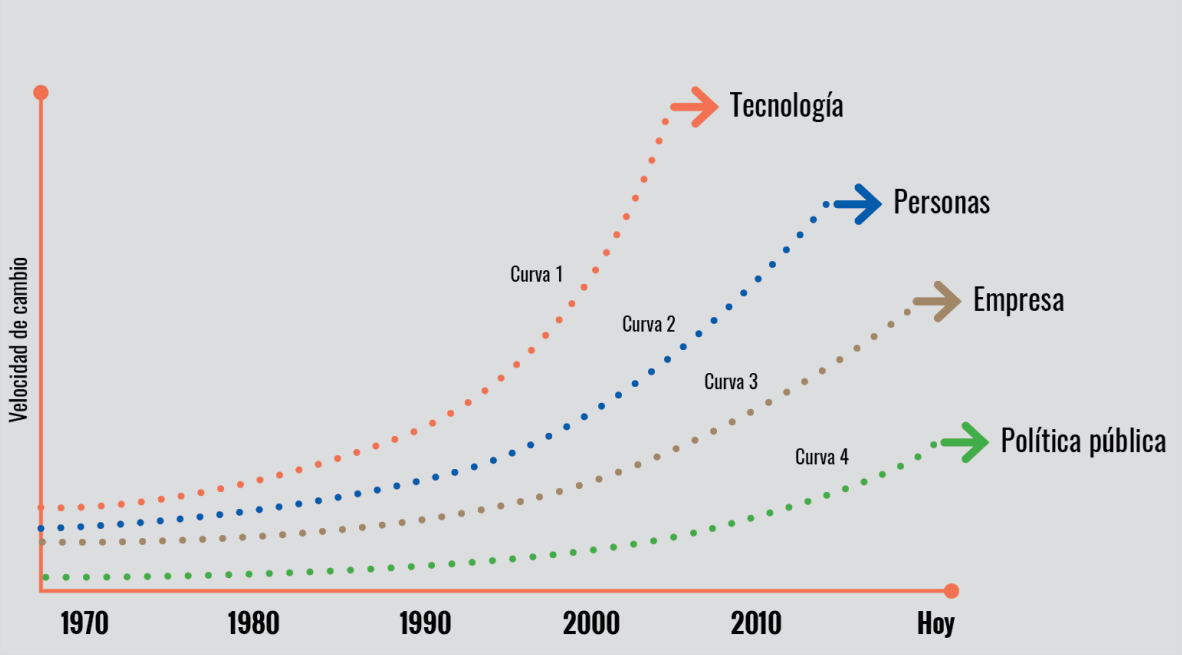
A pesar de que existe consenso de que el KH es fundamental para el desarrollo económico, es importante también determinar qué tipo de KH necesitaremos según los nuevos avances tecnológicos que redefinirán los procesos productivos. ¿Necesitaremos profesionales cada vez más especialistas en un sector específico o serán más apreciados los profesionales con un amplio conocimiento general? ¿Qué tipo de habilidades técnicas y blandas deberán poseer? Estas interrogantes reflejan la incertidumbre que tenemos respecto a cómo serán los procesos productivos, y por ende, los trabajadores que se necesitarán para llevar a cabo estas labores.

Si anteriormente la industria utilizaba los avances tecnológicos para promover el negocio, hoy en día la estrategia será enfocarse en cambiar el negocio para aprovechar las ventajas que nos entrega la tecnología. Las organizaciones que sean capaces de reconocer y anticipar este cambio poseerán una gran ventaja en el mercado.

La IA y la automatización también han ganado su espacio en el mercado, al punto que se estima que la primera podría generar un aumento del 14% en el PIB global para el 2030 (PriceWaterhouseCoopers 2017). Sin embargo, hay un reconocimiento de que estos equipos requieren supervisión humana para desempeñarse de forma eficaz. Las empresas de alta tecnología tienen miles de personas observando constantemente, capacitándose y mejorando sus algoritmos. Es decir, más que reemplazar a los humanos, la utilización de nuevas tecnologías está cambiando las habilidades y los requerimientos que la fuerza de trabajo necesita para poder aprovechar esta transformación tecnológica (Deloitte 2018). Esto no solo hará que redefinamos los puestos de trabajo, sino que repensemos sus bases y organización para determinar nuevas formas de combinar máquinas y humanos y así alcanzar los mayores niveles de eficiencia posible en cada etapa del proceso productivo.

La función de los recursos humanos es fundamental para poder acortar esta brecha. Esto se puede apreciar en la figura 3. En este gráfico, la curva 1 refleja el cambio exponencial del avance tecnológico que estamos experimentando. Como se puede ver, en el comienzo de la década de los 2000 la tecnología alcanzó un nivel extraordinario, el cual fue imposible de asimilar por parte de las personas (curva 2), empresas (curva 3) y las políticas públicas (curva 4). Es más, se estima que las personas tardaron cerca de 15 años en disminuir el rezago existente, y aunque son relativamente rápidos al adoptar nuevas innovaciones tecnológicas, hasta el día de hoy no han sido capaces de alcanzar el ritmo de este cambio. En la práctica, eso se aprecia en la cantidad de tareas que las personas han empezado a realizar a través de sus aparatos electrónicos y lo presente que está la tecnología en la vida de los ciudadanos.

Figura 3: Rezagos provocados por la transición tecnológica



Fuente: Deloitte (2017)

A diferencia de las personas, la curva 3 nos muestra que las empresas son más lentas aún en el proceso de adaptación, ya que la planificación empresarial, la estructura, el diseño de los puestos de trabajo, la definición de metas y las tareas administrativas fueron previamente establecidas, por lo que la adaptación es más lenta. Como se ve en el gráfico, han pasado casi 20 años del boom del avance tecnológico y a pesar de que las empresas han tenido un avance importante y sostenido, no han sido capaces de dar ese salto.

Finalmente, con una capacidad de ajuste mucho más lenta, se encuentran las políticas públicas, como el salario mínimo, impuestos, desempleo, comercio exterior, educación, etc. que experimentan una adaptación mucho más retrasada. Tienen un rezago estimado de 10 años respecto a las empresas y 20 años a los individuos. Su adaptación a la tecnología es muy lenta y tiene un rezago de casi 30 años con los avances tecnológicos.

Este gráfico es clave para comprender la evolución que experimentará el KH. Los departamentos de recursos humanos, las universidades y el Estado enfrentan un gran desafío a la hora de reducir estas brechas; hay que ayudar a los ejecutivos de las empresas a adaptarse a los cambios tecnológicos, impulsar a la gente a habituarse a los nuevos modelos de trabajo y a las empresas a adaptarse a los cambios que ocurren en la sociedad.

A pesar de que no podemos asegurar cuál va a ser el escenario tecnológico en los próximos años, es importante estar pendientes de lo que está ocurriendo en países más desarrollados y tratar de adoptar las nuevas tecnologías sin tenerle miedo a los cambios, porque se impondrán de todas maneras en el futuro. Un estudio hecho por el Word Economic Forum concluyó que el ranking de habilidades que se necesitarán en la próxima década estará liderado por el pensamiento crítico, la creatividad y el manejo de equipos y personas. Esto es para la comprensión y adaptación de tecnologías modernas y también para generar innovaciones. A pesar de que la adquisición de habilidades digitales se ha vuelto un prerrequisito para el éxito de los individuos, la industria y los países, la discusión debiese centrarse también en la importancia de cultivar habilidades blandas o "humanas" para poder ser mejores en lo que los computadores no pueden ser (Muro et al. 2017). Por ende, esta nueva era tecnológica nos exige ser capaces de pensar de forma multidisciplinaria, conectar ideas y construir la información, ya que estas "competencias globales" formarán nuestro mundo y la forma en que trabajamos y compartimos (OECD 2017).

En resumen, la tecnología está cambiando las habilidades que requerirán los trabajadores y profesionales para poder entrar al mercado laboral en un futuro no muy lejano (Muro et al. 2017). Es difícil anticipar los conocimientos técnicos que van a requerir con toda la incertidumbre que tenemos respecto a las tecnologías que van a prevalecer en el futuro. Por esto, es importante que los profesionales desarrollen habilidades digitales, de análisis de datos y computación al mismo tiempo que habilidades blandas, como la flexibilidad, la creatividad, la coordinación y liderazgo de equipos de personas y la capacidad de adaptarse a nuevos escenarios. Formar profesionales multidisciplinarios que sean capaces de conectar diferentes áreas y así encontrar soluciones a problemas complejos y desconocidos e innovar de forma más natural. La importancia de las habilidades blandas en este proceso de transformación tecnológica se debe a que los computadores no pueden simular interacciones humanas de forma eficiente, ya que esta capacidad la ha ido generando el ser humano a través de miles de años (Deming 2017). Estas habilidades personales, las cuales no pueden ser sustituidas por la automatización, son las que deben potenciarse para que puedan complementar el trabajo de la tecnología (Autor 2015).

II. Capital Humano en Chile

Los ingenieros y doctores en ciencias son esenciales para insertarse en la Revolución Industrial 4.0 y así aportar con su conocimiento. Una combinación de sistemas ciberfísicos, el Internet of Things (IoT), cloud computing y la inteligencia artificial, entre otros, permiten que la "industria inteligente" sea una realidad hoy en día. A pesar de que muchas empresas han sido reacias a aceptar estos cambios y no han sido capaces de atraer profesionales capacitados para liderar esta transformación de forma fructífera, algunas han decidido adoptar estos sistemas integrados a sus procesos productivos e invertir en el capital humano necesario para llevar a cabo esta transición.

Los ingenieros y doctores en ciencias son esenciales para insertarse en la Revolución Industrial 4.0 y así aportar con su conocimiento.

La velocidad exponencial con la que ocurren los cambios tecnológicos y la importancia de la información, automatización y digitalización en este nuevo escenario requiere una participación activa de profesionales capaces de innovar, adaptarse y tomar decisiones en situaciones complejas y cambiantes. Por ello, la presencia de ingenieros y doctores en ciencias es fundamental para adaptarse y ser líderes en la Revolución Industrial 4.0.

Para determinar si Chile está cumpliendo con estas expectativa, revisamos el KH existente en el país a nivel de profesionales y postgrado en carreras de Ingeniería y Tecnología. Además, se examina la información vinculada a I&D y becas otorgadas por el Estado. Cuando sea pertinente, estos datos también serán comparados con países relevantes para este estudio. En primer lugar, seleccionamos a Estados Unidos, Canadá y Australia, principalmente por su calidad de países mineros y sus avances en innovación tecnológica. A continuación, se agregan Alemania, Suecia, Finlandia, Corea y Japón por ser países industrializados y desarrolladores de tecnología.

1. Ingenieros y doctores

La ingeniería es una disciplina muy valorada en Chile. Dada su alta empleabilidad y mayores remuneraciones, la carrera ingeniería está dentro de las que tiene más titulados anualmente. Su auge se puede ver en la siguiente tabla (tabla 1), que muestran la evolución de los titulados de ingeniería e ingeniería de minas para el periodo 2007-2017 (Ministerio de Educación 2017). En un periodo de 11 años, se sumaron más de 61.000 ingenieros al mercado laboral chileno, de los cuales 2.684 se especializaron en el área de minería.

Cabe destacar el notorio incremento de ingenieros de minas. Mientras el total de titulados de ingeniería se duplica en el periodo, los ingenieros de minas aumentan en un 1000%. En el año 2014, el director del departamento de Ingeniería de Minas de la Universidad de Chile, Xavier Emery (2014), ya argumentaba que existiría un exceso de oferta de ingenieros de minas en el corto plazo, debido principalmente al aumento de instituciones que imparten la carrera. Según Emery, la falta de regulación académica será la responsable de que se generen profesionales con un nivel de preparación insuficiente, los que tendrán dificultades para encontrar trabajo o terminarán ejerciendo como técnicos. Esto perjudicaría también a los graduados de instituciones más prestigiosas, que a pesar de que sí encontrarán trabajo, verán disminuido sus salarios debido al aumento de la oferta de profesionales.

Tabla 1: Titulados de Ingeniería y de Ingeniería de Minas en Chile (2007-2017)*

Año	Titulados Ingeniería	Titulados Ingeniería de Minas
2007	4.068	56
2008	4.040	82
2009	4.902	116
2010	4.490	89
2011	4.549	120
2012	5.203	164
2013	5.981	303
2014	6.344	368
2015	6.937	347
2016	7.148	461
2017	7.704	578
Total	**61.366**	**2.684**

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Ministerio de Educación (2018)

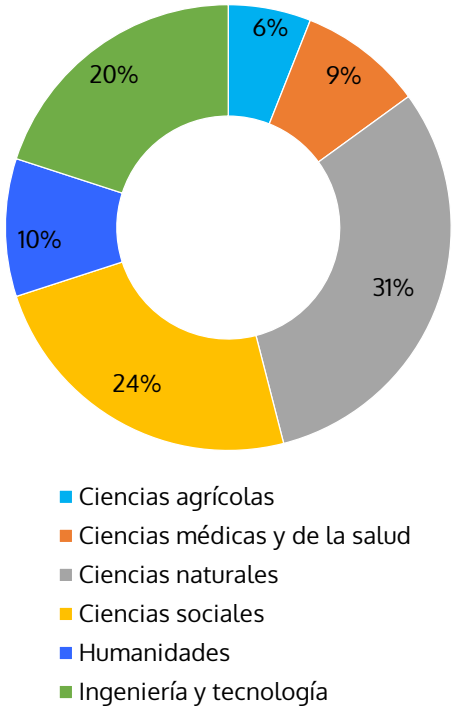
* Para la elaboración de esta tabla se consideraron solo los Ingenieros Civiles.

¿A qué se debe esta gran expansión de ingenieros de minas? ¿Es algo generado por la demanda de las compañías mineras? En el año 2007 había 4 universidades que impartían esta especialidad, con un total de 56 estudiantes graduados. En el 2017 hay 12 universidades que la imparten, con 578 estudiantes graduados[7]. La evidencia muestra que los ingenieros de minas son los que tienen los mayores ingresos; esto hace atractivo su estudio. Pero cuando muchas universidades aumentan diez veces la oferta de vacantes, cabe preguntarse cuál es la tasa de desempleo existente.

Según el *"Estudio de Sueldos de Ingenieros 2017"* hecho por la consultora Conexión Ingenieros (2016), Ingeniería en Ejecución en Minas lidera el ranking de las carreras con mayor tasa de desempleo (18,6%). Por otro lado, en un estudio realizado por un portal online de búsqueda de trabajo que compara la cantidad de avisos y postulaciones del sitio y publica un ranking con las carreras profesionales con más saturación, Geología ocupa el 4to lugar e Ingeniería en Minas y Metalurgia el 7mo (Emol 2017). Estas cifras sugieren que habría una saturación del mercado laboral minero, independiente del tipo de profesional.

Veamos ahora las cifras sobre doctores en ciencia e ingeniería. Según el último estudio hecho por el Ministerio de Economía, Fomento y Turismo (2016), en Chile hay 10.592 doctores, de los cuales 1.604 (15%) pertenecen al área de ingeniería y tecnología y 3.764 (35,5%) a las ciencias naturales (gráfico 1). A pesar de que este número es bastante inferior en relación a otros países de la OCDE, hay que destacar que ha experimentado una mejoría. Si lo comparamos con el año 2011, donde en Chile había 7.670 doctores hay un aumento de un 38% al año 2014.

Gráfico 1: Doctores según área de conocimiento (2014)*



Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2016)

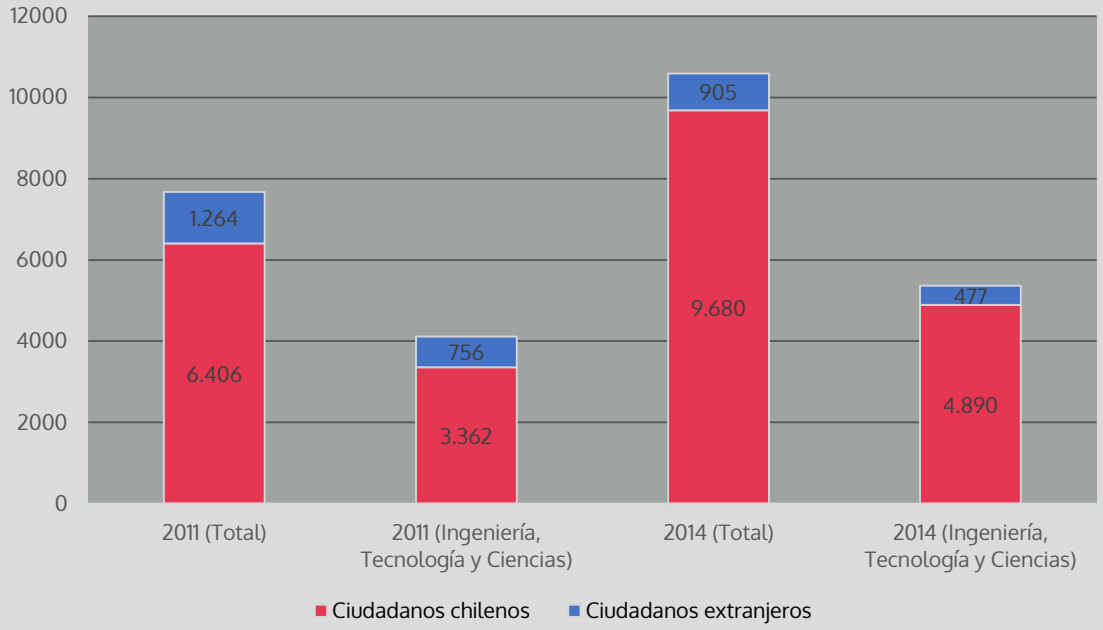
* Las cifras de este gráfico difieren con las entregadas por la encuesta del ministerio, ya que la clasificación de la OCDE considera como ciencias naturales algunas áreas que en Chile son impartidas por las facultades de ingeniería. En la tabla 2 se detallan las áreas que cambiamos de clasificación y en el Anexo 2 se puede encontrar el detalle de las subáreas mencionadas.

[7] Tabla con información de las Universidades que imparten esta carrera se encuentra en el Anexo 1.

En el año 2011, de los 7.670 doctores con residencia en Chile, 6.406 eran ciudadanos chilenos y 1.264 extranjeros (gráfico 2). Además, 4.110 trabajaban en las áreas de Ingeniería y Tecnología y Ciencias Naturales. De estos, 3.362 son ciudadanos chilenos y 756 extranjeros. Para el año 2014, se aprecia un importante incremento, con 5.367 doctores dedicados a estas áreas, donde 4.890 son ciudadanos chilenos.

Del total de doctores ciudadanos chilenos en el 2011, 2.230 habían realizado sus estudios en Chile y 4.176 en el extranjero. En el año 2014 hay un notorio cambio en la proporción de grados obtenidos localmente en relación al 2011, ya que, de los 9.680 chilenos, 4.313 recibieron su grado de doctor en alguna universidad chilena y 5.368 en una universidad extranjera. Se puede apreciar un claro aumento de profesionales que obtuvieron su grado de doctor en una universidad nacional, casi duplicándose entre el año 2011 y 2014. A pesar de que hay un incremento también en los grados otorgados por universidades extranjeras, este aumento no es comparable con el que se obtuvo a nivel local. Esto significa que las posibilidades de doctorarse dentro de Chile han aumentado considerablemente y también las posibilidades de financiamiento.

Gráfico 2: Cantidad de doctores según ciudadanía (2011 y 2014)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2015); Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2016).

Ahora veamos la cantidad de doctores especializados en cada sub-área (tabla 2). Estos datos reflejan el número de doctores que realizaron su doctorado en cada una de estas áreas, lo cual no significa que posteriormente no puedan trabajar en otros rubros. Disciplinas como "Ciencias Biológicas"; "Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Información" y "Ciencias Químicas", presentan un crecimiento mayor al promedio.

Por otro lado, cabe destacar que existen áreas consideradas fundamentales para el desarrollo tecnológico que carecen de doctores especializados (destacadas en negrita y señalizados con una flecha en la tabla 2). En particular, llama la atención la deficiencia de doctores graduados en el área de computación, dado que es esencial para la productividad, crecimiento económico e innovación tecnológica. Temas como data science, inteligencia artificial, IoT, Cloud Computing, etc. no solo han ayudado a que las empresas sean más productivas, sino que también han sido un gran aporte en áreas como la salud e incluso para predecir catástrofes ambientales (The New Yorker 2013; Yang et al. 2015). Por otro lado, Ingeniería ambiental y biotecnología ambiental presentan solo 50 doctores graduados cada uno; cifra muy baja considerando que el cambio climático y la escasez de recursos naturales irán empeorando cada vez más y son problemáticas que impactan a los países y el bienestar de sus ciudadanos. Cabe destacar también que no hay doctores graduados en el área de nanotecnología (año 2014). A pesar de que hay físicos que hacen investigación en esta área, esto indica que en Chile esta será una especialidad marginal en el futuro inmediato.

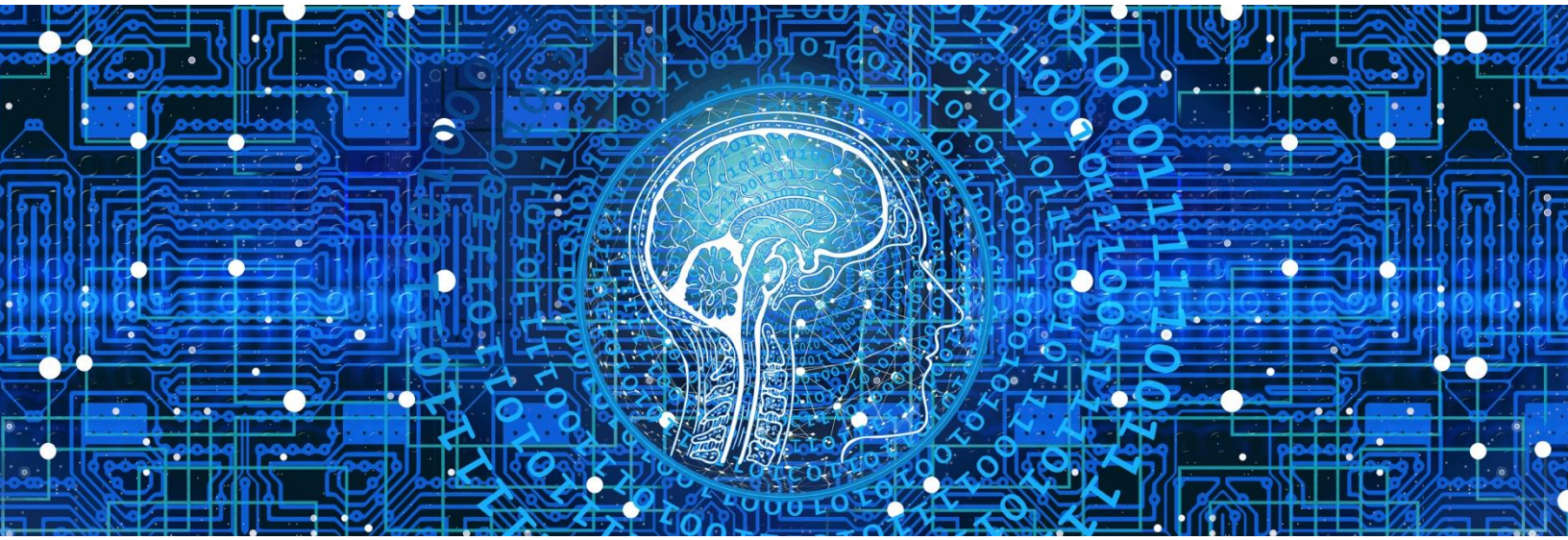


Tabla 2: Doctores según área de estudio de su doctorado (2011 y 2014)

Área OCDE	2011	2014
Ciencias Naturales	**2.370**	**3.236**
Matemáticas	302	349
Ciencias Físicas	439	449
Ciencias Químicas	595	713
Ciencias Biológicas	944	1.582
Otras Ciencias Naturales	90	143
Ingeniería y Tecnología	**1.749**	**2.132**
Ingeniería Civil	155	200
Ingeniería Eléctrica, Electrónica, Información	383	506
Ingeniería Mecánica	118	57
Ingeniería Química	143	143
Ingeniería de Materiales	108	143
Ingeniería Médica	**14**	**29**
Ingeniería Ambiental	**56**	**50**
Biotecnología Ambiental	**21**	**50**
Biotecnología Industrial	42	64
Nanotecnología	**3**	**0**
Computación y Ciencias de la Información*	**14**	**36**
Ciencias de la Tierra y Medioambiente*	428	492
Otras ingenierías y tecnologías (Alimentos, bebidas, etc.)	264	364
Ciencias Médicas y de la Salud	**622**	**991**
Ciencias Agrícolas	**498**	**663**
Ciencias Sociales	**1.663**	**2.481**
Humanidades	**768**	**1.091**
TOTAL	**7.670**	**10.592**

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2015); Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2016)

* Estas disciplinas estás clasificada en el área de Ciencias Naturales por la OCDE, pero para este estudio la agregamos a Ingeniería y Tecnología porque Computación, Geología, Geociencias, Mineralogía, Geoquímica y Geofísica suelen estar dentro de las facultades de Ingeniería en nuestro país.

Algunos países desarrollados, como Estados Unidos, Canadá y Australia, tienen entre 10 y 20 veces el número relativo de doctores que existe en Chile.

A continuación, compararemos la cantidad de doctores residentes en Chile con lo observado en países relevantes: Canadá, Australia y Estados Unidos. Estos países fueron escogidos debido a la gran importancia que tiene la minería en sus economías y que además son países desarrollados que han logrado impulsar una industria tecnológica en este rubro.

Algunos países desarrollados, como Estados Unidos, Canadá y Australia, tienen entre 10 y 20 veces el número relativo de doctores que existe en Chile. Por cada millón de habitantes, Chile cuenta con 596 doctores, mientras que Estados Unidos cuenta con 12.633, Australia con 6.046 y Canadá con 5.300 (tabla 3).

Tabla 3: N° de doctores en Australia, Canadá, Chile y Estados Unidos

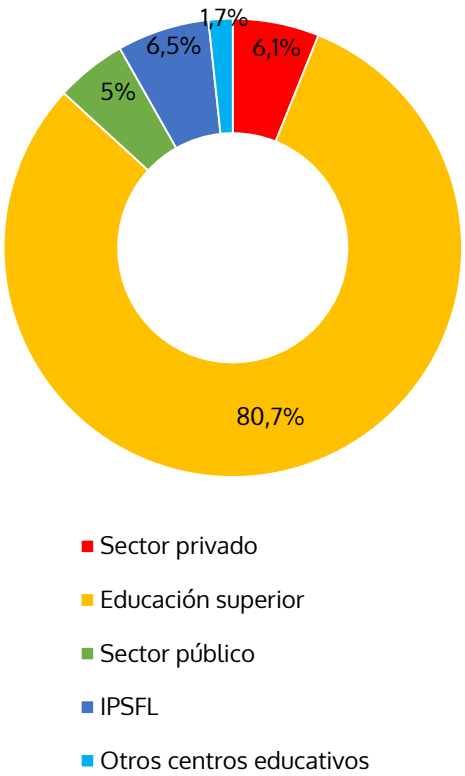
País	Doctores (total)	Doctores por millón de habitantes
Chile (2014)	10.592	596
Canadá (2011)	208.480	6.046
Australia (2011)	118.396	5.300
Estados Unidos (2017)	4.096.000	12.633

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Statistics Canada (2011); U.S. Census Bureau 2017; Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2016); Group of Eight (2013).

Si analizamos los graduados de programas de doctorado por año, también se puede apreciar una gran brecha respecto a estos países. Chile posee 31 graduados por cada millón de habitantes, mientras que Australia, el que más tiene, llega a los 270, seguido de Estados Unidos con 243 y Canadá con 170 (Anexo 3). En las carreras de ciencias e ingeniería la brecha es similar, Chile posee cerca de 18 graduados por cada millón de habitantes, mientras que Australia 106, Canadá 95 y Estados Unidos 82[8].

[8] Estas cifras sobre-estiman el número de doctores debido al gran número de extranjeros en los programas de doctorado. Por cuanto, hay muchos estudiantes que retornarán a sus respectivos países.

Gráfico 3: Doctores empleados por sector (2014)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2016).

¿Dónde trabajan los doctores en Chile? Un serio problema que enfrentan los doctores en Chile es que las empresas productivas no los están contratando. Según una encuesta del Ministerio de Economía, un 81% de los doctores trabajan en las universidades, mientras que solo un 6% en el sector privado (gráfico 3).

La baja participación de doctores en el sector productivo y sector público nos hace replantearnos las políticas que está impulsando Chile para aumentar el capital humano. ¿Es coherente seguir otorgando becas para los doctores si el sector productivo chileno no los contrata? ¿Qué políticas de reinserción hay para poder acoger a los nuevos doctores que llegarán en los próximos años? ¿Tiene sentido invertir en capital humano avanzado si el gasto en I&D en Chile es extremadamente insuficiente?

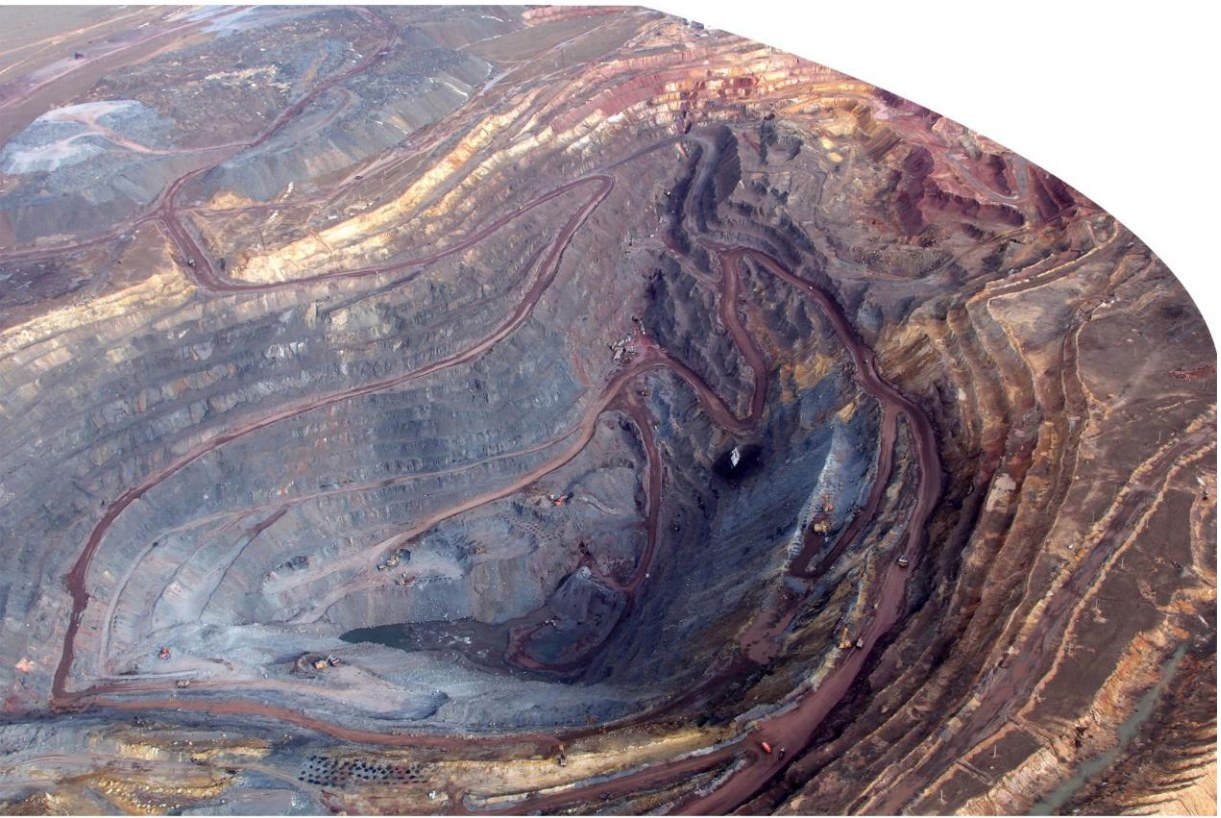


Tabla 4: Fuentes de financiamiento y ejecución de I&D año 2016 (millones de pesos)

Sector de Ejecución	Estado	Educación Superior	IPSFL	Empresas	Internacional	Total	Participación Ejecución
Estado	78.101	5	0	1.492	1.148	**80.746**	**13%**
Ed. Superior	153.632	87.784	1.148	7.455	6.669	**256.688**	**42%**
IPSFL	25.546	430	7.831	3.577	2.415	**39.799**	**6%**
Empresas	27.524	99	92	207.341	1.187	**236.243**	**39%**
Total	**284.803**	**88.318**	**9.071**	**219.865**	**11.419**	**613.476**	**100%**
Participación del gasto	**46,4%**	**14,4%**	**1,5%**	**35,8%**	**1,9%**	**100%**	

Fuente: Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2018)

2. Investigación y Desarrollo (I&D)

El I&D es un pilar fundamental para el bienestar económico de un país. Los esfuerzos que un país hace en I&D—sea público o privado—tienen una gran relevancia a la hora de impulsar avances tecnológicos y mejorar la productividad local.

Según el Ministerio de Economía, Fomento y Turismo (2018), Chile invirtió $613.476 millones el año 2016 en I&D, lo que representa un 0,37% del PIB[9]. Este es un resultado insuficiente en comparación con otros países de la OCDE, donde Chile ocupa el último lugar (OECD 2016).

Otra desventaja es la poca participación del sector privado en esta área. En la tabla 4 se puede ver el detalle de las fuentes de financiamiento y el sector de ejecución, donde el Estado chileno figura como el mayor financiador de I&D con un 46% del total del gasto, seguido por las empresas (36%), la educación superior (14%), aportes internacionales (3%) y las instituciones privadas sin fines de lucro (IPSFL) (1%).

[9] En el año 2016 el gasto en I&D experimentó una caída real del 3,27% respecto al 2015. Sin embargo, este descenso se debe principalmente a un cambio metodológico recomendado por la OCDE. Es más, si aislamos esta modificación, el gasto en I&D aumentó un 8% en términos reales con respecto al periodo anterior.

Sin embargo, el escenario es bastante distinto en el caso de la ejecución de los proyectos, donde la educación superior es la que tiene la mayor participación, la cual está mayoritariamente financiada por el Estado (60%). En segundo lugar, se encuentran las empresas con el 39%, seguida del Estado (13%) y las IPSFL (6%). Cabe destacar el reducido aporte de las empresas a las universidades—solo $7.455 millones—considerando que muchas veces son las que se ven más beneficiadas con el desarrollo de innovación y nuevas tecnologías (Santelices & Lund 2013).

Al revisar el gasto en I&D que realizan las empresas según el área de actividad económica, vemos que el sector "explotación de minas y canteras" es el que más realiza gasto en I&D, alcanzando los $36.816 millones y representando un 15,6% del total del gasto en I&D del sector empresarial chileno (tabla 5). Sin embargo, como el gasto en I&D es extremadamente bajo, el hecho de que resalte la minería en comparación a otras industrias no quiere decir que el esfuerzo realizado sea suficiente, considerando sobre todo la magnitud de esta industria a nivel nacional.

Tabla 5: Gasto en I&D ejecutado por empresas (2016)

Actividad Económica	Gasto I&D ($MM)	Participación (%)
Agricultura, Ganadería, Caza, Silvicultura, Pesca y actividades de servicios conexas	28.842	12,2%
Explotación de minas y canteras	**36.816**	**15,6%**
Manufactura	36.626	15,5%
Elaboración de productos alimenticios	16.586	7%
Fabricación de sustancias y productos químicos	17.440	7,4%
Comercio al por mayor	20.559	8,7%
Desarrollo de sistemas informáticos	11.357	4,8%
Actividades financieras y de seguros	9.837	4,2%
Actividades de arquitectura e ingeniería	11.797	5%
Investigación científica y desarrollo	29.315	12,4%
Otras actividades	17.068	7,1%
Total	**236.243**	**100%**

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2018)

En Chile, el personal dedicado a I&D se concentra mayoritariamente en la educación superior (tabla 6). De la totalidad de estos trabajadores, más de la mitad corresponde a investigadores (8.992 de 16.632) y la mayoría también se encuentran trabajando en este sector (4.360). Existen solo 2.655 investigadores trabajando en el sector empresarial, lo cual es un número muy bajo en comparación a otros países.

En particular, si analizamos el nivel de titulación que tienen estos profesionales, se observa que la mayoría de las personas que poseen doctorado y magíster ejercen en la educación superior (tabla 7). Esta encuesta coincide con los datos obtenidos por la Encuesta Trayectoria Profesionales con Grado de Doctor, corroborando la poca participación de estos profesionales en el sector privado (solo 235 doctores).

Tabla 6: Personal dedicado a I&D, 2016 (Jornadas Completas Equivalentes (JCE)*)

Unidad Declarante	Investigadores	Técnicos y Personal de Apoyo	Otro Personal de Apoyo	Total
Ed. Superior	4.360	3.006	695	**8.061**
Empresas	2.655	1.352	943	**4.950**
Estado	1.296	490	437	**2.223**
IPSFL	681	555	162	**1.398**
Total	**8.992**	**5.403**	**2.237**	**16.632**

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2018)

* Se trabaja con Jornadas Completas Equivalentes porque muchos empleados que se dedican a I&D realizan otras actividades también dentro de sus horarios laborales.

Tabla 7: Personal dedicado a I&D según nivel académico, 2016 (JCE)

Unidad Declarante	Doctorados	Magíster	Profesional y/o Licenciatura	Otros	Total
Ed. Superior	2.851	1.223	2.950	592	**8.061**
Empresas	235	435	2.426	992	**4.950**
Estado	208	334	865	420	**2.223**
IPSFL	293	205	702	120	**1.398**
Total	**3.587**	**2.197**	**5.943**	**2.124**	**16.632**

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2018)

Tabla 8: Personal dedicado a investigación en empresas y universidades, 2016 (JCE)

	% Respecto al total de la categoría		% Respecto al total de investigadores	
	Empresas	Universidades	Empresas	Universidades
Doctores	6,5%	79,5%	8,9%	65,4%
Magíster	19,8%	55,7%	16,4%	28,1%
Profesionales y Licenciados	40,8%	49,6%	--	--

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2018)

La tabla 8 sintetiza los datos presentados en la tabla 6 y 7. Solo el 6,5% de los doctores dedicados a I&D trabajan en empresas lo que, sin duda, afecta el desarrollo de innovación tecnológica. A pesar de que los magíster experimentan una menor concentración, sigue habiendo una gran brecha; las universidades contratan el 55,7% y el sector privado el 19,8%. En el caso de profesionales y licenciados la distribución es más pareja, con un 49,6% en las universidades y un 40,8% en el sector privado.

Del total de investigadores contratados por las empresas, el 8,9% son doctores y el 16,4% magíster. En las universidades un 65,4% son doctores y un 28,1% magíster.

Esto afecta el desarrollo de innovación tecnológica, ya que la investigación está mayormente liderada por las universidades, cuyos intereses pueden diferir de los de la industria privada. A este respecto, conviene señalar que el mecanismo lógico de generación de innovación es que las universidades hagan I&D y que la innovación, la transferencia y el escalamiento se lleve a cabo en empresas. Las universidades solo pueden llegar a prototipos y patentes, los encargados de tomarlos y transformarlos en productos y sistemas son las empresas[10].

Solo el 6,5% de los doctores dedicados a I&D trabajan en empresas lo que, sin duda, afecta el desarrollo de innovación tecnológica.

[10] Este planteamiento ha sido sugerido por Javier Ruiz del Solar, director ejecutivo de Beauchef Minería.

Considerando la importancia de la minería en la economía nacional, parecería lógico que las empresas mineras prioricen el desarrollo de I&D a través de un incremento en la inversión y contratación de personal especializado. No obstante, a diferencia de otros países mineros que sí han entendido la importancia de esto, Chile aún obtiene resultados insuficientes. Es cierto que la contratación de personal dedicado a I&D en Chile es baja en todos los sectores, sin embargo, el sector minero presenta cifras incluso más desalentadoras. Del total de los 2.655 trabajadores dedicados a I&D en las empresas privadas, solo 85 se concentran en el sector minero (tabla 9), lo que equivale al 3,2% del total. Esta cifra es extremadamente insuficiente comparada con otros sectores relevantes para la economía nacional, como la Agricultura, Forestal y Pesca, que posee 339 personas dedicadas al I&D (12,8%).

Tabla 9: Personal dedicado a investigación en empresas por sector, 2016 (JCE)

Sector	Investigadores
Agricultura, Forestal y Pesca	339
Minería	**85**
Manufactura	723
Electricidad, Gas, Aire Acondicionado y Suministro de Agua; Alcantarillado, Tratamiento de Residuos y Descontaminación	24
Construcción	15
Servicios	1.469
Total	2.655

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OECD.stat.

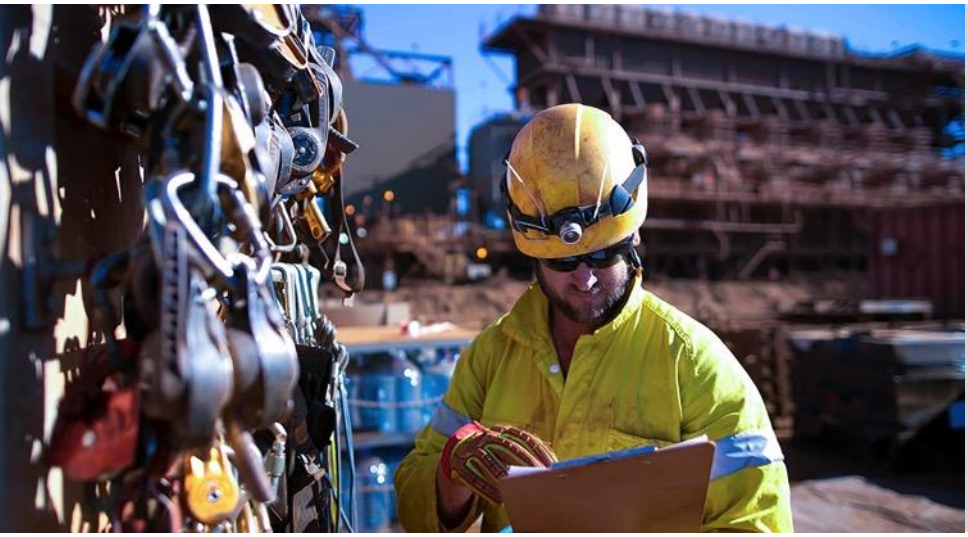


Tabla 10: N° de patentes y artículos en Chile*

N° Patentes (IP5)	Patentes por Millón de Habitantes	Artículos	Artículos por Millón de Habitantes
69	4	6.746	377

Fuente: OECD.Stat y World Bank

* Corresponde a artículos científicos y de ingeniería publicados en los siguientes campos: física, biología, química, matemática, medicina clínica, investigación biomédica, ingeniería y tecnología, y ciencias de la tierra y el espacio. Se consideran los clasificados por el Institute for Scientific Information's Science Citation Index (SCI) y el Social Sciences Citation Index (SSCI).

¿Qué hacen los investigadores en Chile? En nuestro país existe una clara inclinación a publicar artículos antes que patentes (tabla 10). Esto ocurre principalmente por el sistema de promoción universitario y por los incentivos que generan los concursos de financiamiento del Estado para investigación, los que le dan mucha importancia al número de artículos publicados[11].

Hay académicos que plantean que el sistema de promoción universitario está fundamentalmente basado en la publicación de artículos (revista WOS ISI) y que muchos de estos no tienen gran relevancia para el sector privado. Estos criterios podrían estar provocando el efecto contrario que se quiere lograr; incrementar la brecha de separación entre la universidad y las empresas productivas.

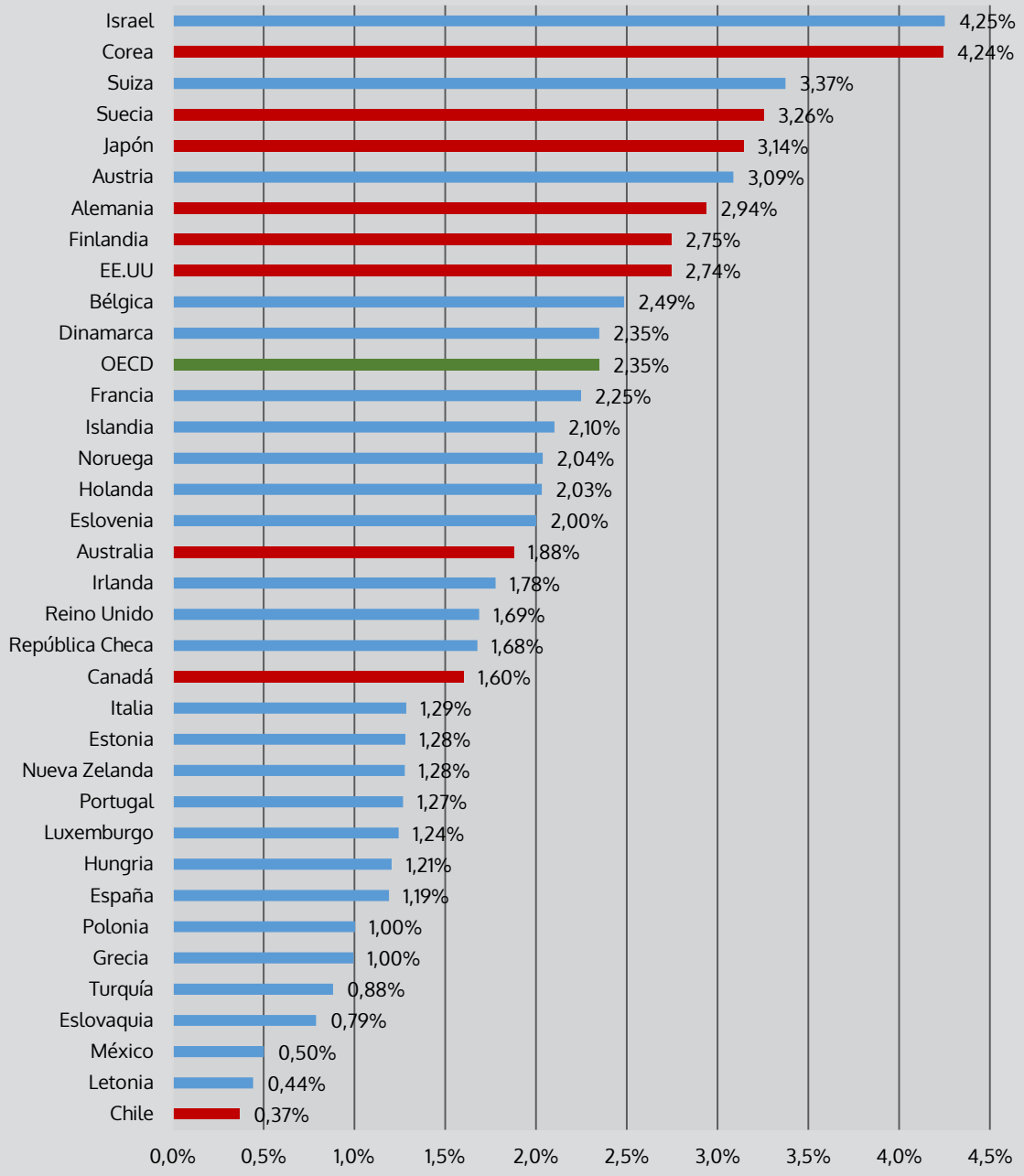
[11] Un profesor de la FCFM de la Universidad de Chile nos comentó que esto genera incentivos perversos, dado que para tener más publicaciones a veces dividen un proyecto en varios mini proyectos y así poder obtener más fondos.

Comparando las cifras de I&D de países relevantes: Australia, Canadá, Estados Unidos, Corea, Suecia, Finlandia y Japón con las de Chile se observa:

En primer lugar, a pesar de que Alemania y Japón no son países mineros, consideramos que es importante considerarlos, dado a que han logrado grandes avances tecnológicos y poseen industrias de innovación líderes a nivel mundial. En segundo lugar, Finlandia y Suecia son países que solían basar su economía en la extracción de recursos naturales y han logrado desarrollar una industria tecnológica exportadora a nivel global.

El esfuerzo que hace Chile en I&D es insuficiente en comparación a los países referentes. Chile, con un gasto en I&D equivalente al 0,37% del PIB, está último en la lista de los países de la OCDE, y muy por debajo del promedio (gráfico 4). En rojo se pueden ver los países relevantes, los que se encuentran mucho mejor posicionados que Chile. Corea es el que lidera la lista, el cual se encuentra por encima del promedio (2,35%) y destina un 4,24% del PIB a I&D. En segundo lugar está Suecia, con 3,26%, seguido de Japón con 3,14%, Alemania con 2,94%, Finlandia con 2,75%, EE.UU. con 2,74%, Australia con 1,88% y finalmente Canadá con un 1,6% del PIB.

Gráfico 4: Gasto en I&D como porcentaje del PIB en países miembros OCDE (2016)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OECD data.

En la tabla 11, podemos encontrar los principales indicadores de I&D para Australia, Canadá, Estados Unidos y Chile. A partir de esto, podemos apreciar el bajo desempeño que está teniendo nuestro país. Respecto a cómo se distribuye el gasto en I&D en los diferentes sectores, podemos ver que Chile tiene una baja participación del sector privado en el financiamiento de I&D, alcanzando solo un 35,8%. Con respecto a Canadá, la diferencia no es tan impresionante, ya que en este país las empresas privadas aportan un 40% del gasto total de I&D.

Por otro lado, en Australia y Estados Unidos el sector privado hace importantes esfuerzos, financiando el 61,9% y el 62,3% del gasto total de I&D respectivamente.

En el caso de Chile se aprecia una alta participación de las instituciones de educación superior en el gasto total de I&D. Esto se debe probablemente al poco apoyo que reciben del sector privado, ya que de la totalidad de recursos destinados a I&D que ejecutan las Universidades en Chile, solo un 3,4% viene de este sector (tabla 8).

Tabla 11: Principales indicadores para Australia, Canadá, EE.UU y Chile

Indicador	Australia	Canadá	EE.UU.*	Chile
Gasto en I&D (% del PIB)	1,9%	1,6%	2,74%	0,37%
Gasto privado en I&D (% I&D total)	61,9%	40,6%	62,3%	35,8%
Gasto educación superior en I&D (% I&D total)	0,1%	11,6%	3,7%	14,4%
Gasto público en I&D (% I&D total)	34,6%	33%	25,1%	46,4%
Gasto privado sin fines de lucro en I&D (% I&D total)	1,8%	4,2%	3,8%	1,5%
Gasto internacional en I&D (% I&D total)	1,6%	10,7%	5,2%	1,9%
Número de investigadores	92.649	163.180	-	8.993
Investigadores por cada 1000 trabajadores	9	8,8	9,1	1
Investigadores en sector privado	27.721	93.150	-	2.655
Investigadores en sector público	8.285	9.100	-	1.296
Investigadores en educación superior	53.592	60.270	-	4.360
Investigadores en sector PSFL	3.051	660	-	681

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OECD.data y Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2018).

* En la base de datos de la OCDE no estaba disponible la información estadística para algunos indicadores EE.UU.

En la siguiente tabla (tabla 12), se detalla el gasto privado en I&D por cada 1000 trabajadores dedicados a I&D en el sector privado (en JCE). Chile, con 71 millones, está muy por debajo de Australia, el cual gasta 220 millones dólares por cada 1000 trabajadores de I&D en el sector privado. La diferencia con Canadá no es tan notoria, país que solo llega a los 82 millones.

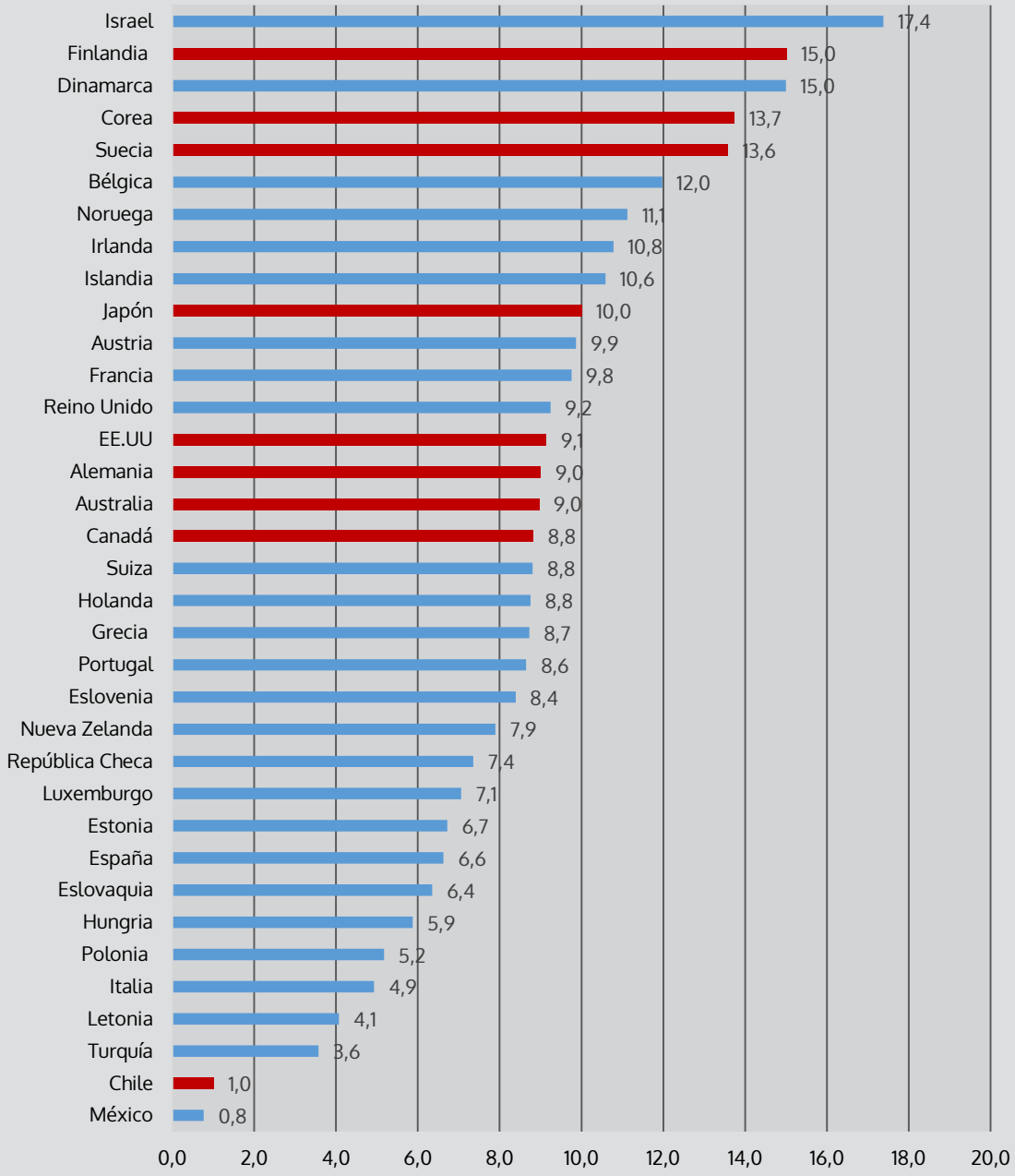
Tabla 12: Gasto privado por personal dedicado a I&D* en el sector privado en Australia, Canadá y Chile

Indicador	Australia	Canadá	Chile
Gasto Privado en I&D (En millones de US$)	11.845	12.378	325
Trabajadores en Sector Privado	58.886	138.620	4.582
Gasto Privado en I&D por cada 1000 trabajadores (En millones de US$)	220	82	71

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OECD data.
* Se trabaja con jornadas completas equivalentes.

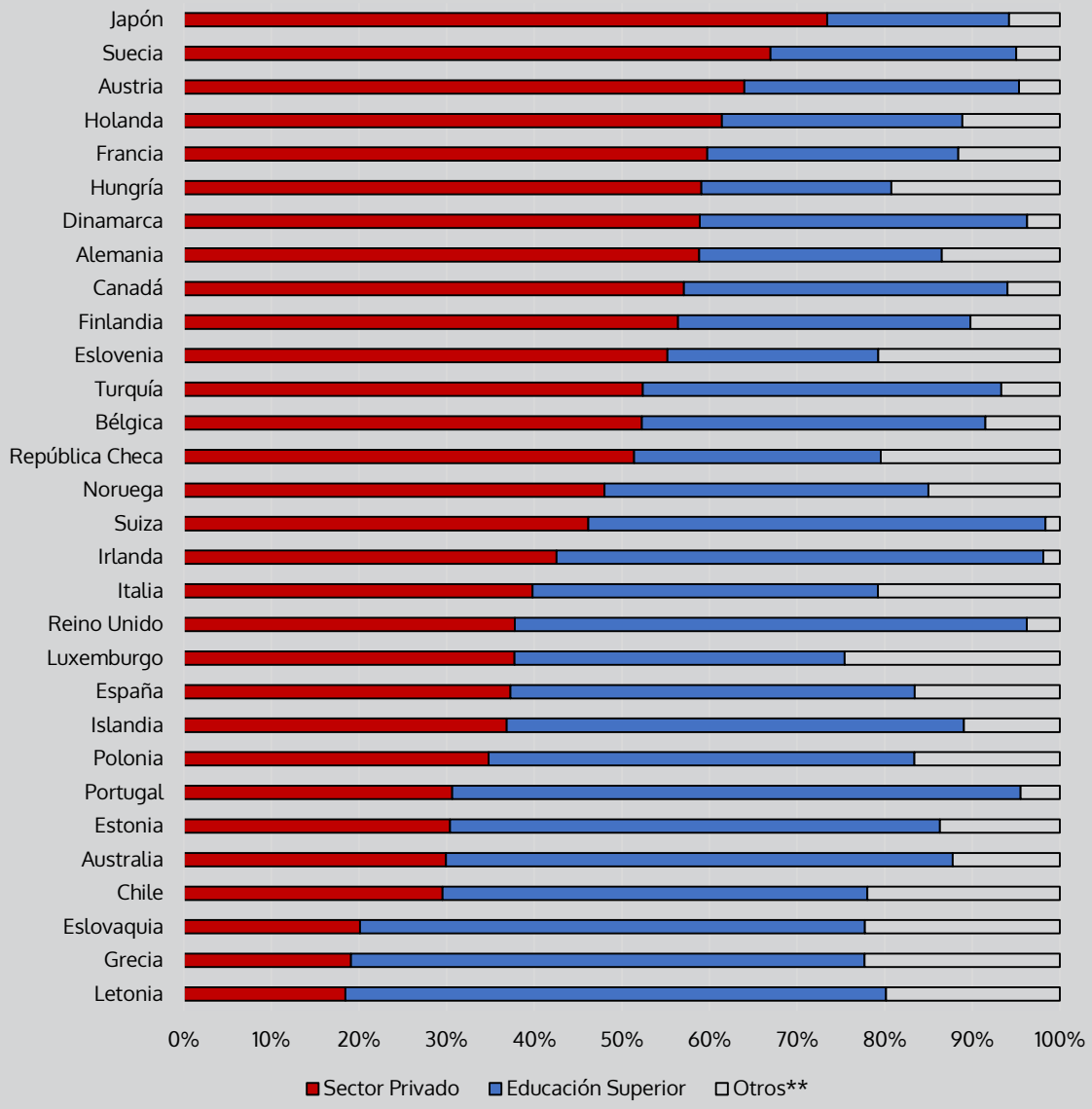
En cuanto a la cantidad de investigadores dedicado a I&D, Chile también está muy lejos de sus pares de la OCDE y también de los países referentes (gráfico 5). Chile posee solo 1 investigador por cada 1000 habitantes, mientras que Finlandia tiene 15, Suecia 13,6, Corea 13,7, Japón 10, Estados Unidos 9,1, Australia 9 y Canadá 8,8. De todos los países de la OCDE, Chile es el penúltimo de la lista, superando solo a México que tiene 0,8 investigadores por cada 1000 habitantes. Esto refuerza el poco interés que hay en Chile para desarrollar investigación, sobre todo en el sector privado. Es fundamental que se genere investigación que resuelva problemas específicos locales de la minería chilena, que no se está investigando ni en el extranjero ni en Chile. Esto mejoraría la eficiencia del proceso productivo y, por ende, haría que la industria minera mejore su competitividad a nivel global.

Gráfico 5: Investigadores en I&D por cada 1000 trabajadores



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OECD data.

Gráfico 6: Investigadores en sector privado y universidad en países OCDE (2016)*



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OECD data
* Datos del 2016 o último dato disponible

En el gráfico 6 se muestra la proporción de investigadores trabajando en el sector privado y en las universidades para países de la OCDE. En general, la diferencia entre Chile y los países referentes es muy significativa (con excepción de Australia), demostrando una vez más el esfuerzo insuficiente que hace el sector privado chileno por impulsar I&D.

Los doctores son importantes para el desarrollo de innovación e investigación. Por ejemplo, en Alemania, país líder en innovación y producción de patentes, los doctores son altamente demandados por la industria privada (Couston & Pignatel 2018). Con la intención de comparar la situación de Chile con el resto de los países, se armó una base de datos con el grado académico de los directores y gerentes de las empresas líderes de cada país. Se eligieron organizaciones que lideran los rankings de ingresos organizacionales y además se seleccionaron firmas de diferentes rubros. Una vez obtenidos los perfiles académicos de estos trabajadores, se determinó el número de profesionales con grado de doctor y magíster de cada organización. El listado de las compañías seleccionadas se puede encontrar en la tabla 13.

Tabla 13: Empresas consideradas para el gráfico 7 y 8

Chile	EE.UU.	Japón	Alemania	Canadá	Corea	Australia
Antofagasta Minerals	Amazon	Toyota	Allianz SE	Barrick	Hanwha	BHP
Cencosud	Apple		Bayer	Brookfield	Posco	Rio Tinto
Ceulosa Arauco	General Motors		BMW	Power Corporation	Samsung	Wesfarmers
Copec	Google		Daimler Chrysler			
LATAM	Walmart		Deutsche Post			
Falabella			Deutsche Telekom			
			E ON			
			SAP			
			Siemens			

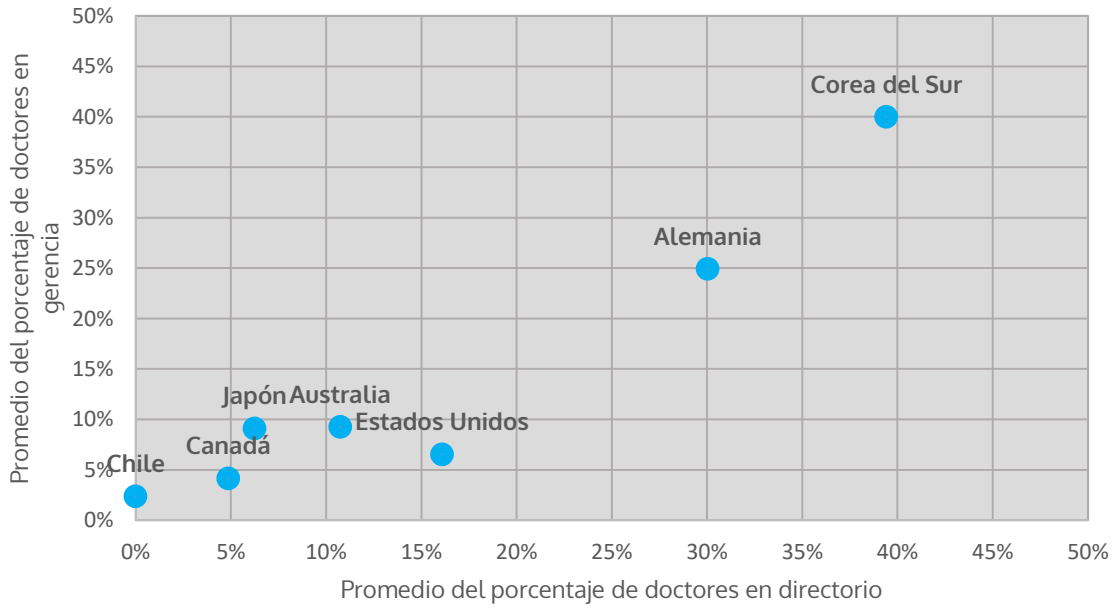
Fuente: Elaboración propia.

En países desarrollados hay doctores en cargos gerenciales y también en directorios de empresas; en cambio en Chile solo se registran casos aislados.

En el gráfico 7 se muestra el promedio del porcentaje de doctores dentro de los cargos gerenciales y directivos para cada país. Nuevamente, Corea sobresale en relación al resto, donde cerca de un 40% de los gerentes y los miembros del directorio son doctores. Es más, en el caso de Samsung, los cuatro gerentes generales que lideran la empresa son doctores. En Alemania, el 30% del directorio y el 25% de los cargos gerenciales son ocupados por doctores, cifras que coinciden con lo que se ha presentado en otros estudios (Couston & Pignatel 2018; Cyranoski et al. 2011).

Chile está muy lejos, donde un 0% de los directores y solo un 3% de los gerentes son doctores. En síntesis, en países desarrollados hay doctores en cargos gerenciales y también en directorios de empresas; en cambio en Chile solo se registran casos aislados. La falta de doctores en estos cargos puede ser perjudicial para el desarrollo de innovación y tecnología local. Existe evidencia empírica que muestra que las empresas cuyos CEO son doctores tienen un 24% mayor de patentamiento y un nivel de citas un 46% mayor que las empresas cuyos CEOs no son doctores (He 2014).

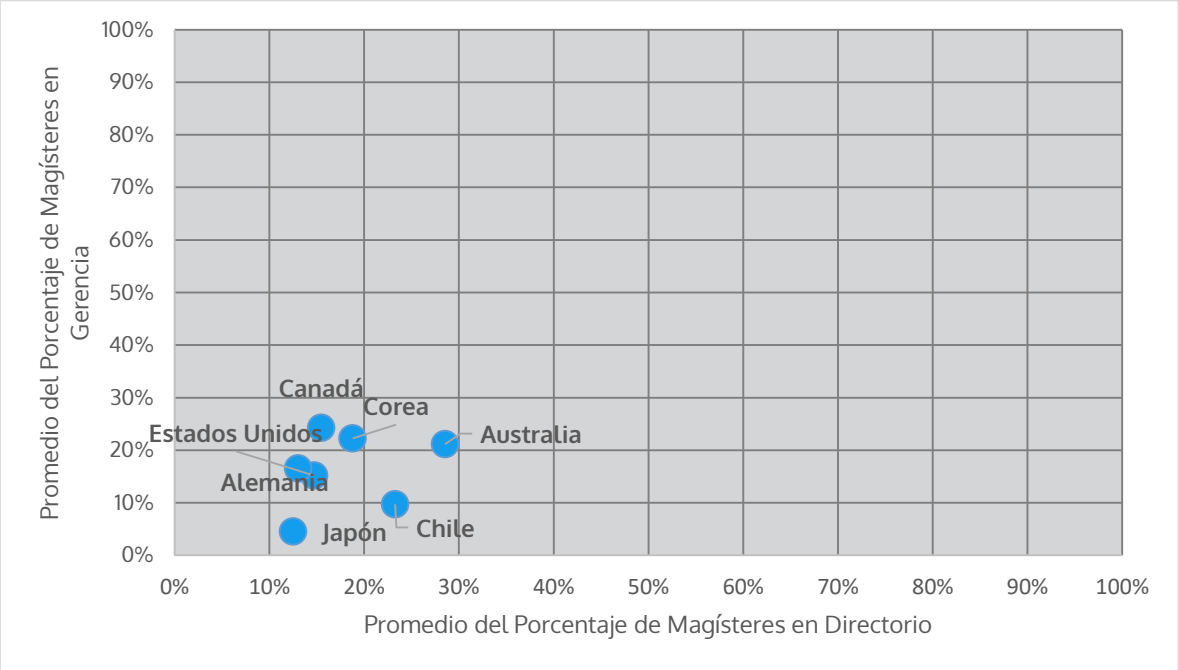
Gráfico 7: Doctores en las gerencias y directorios de las más grandes empresas mundiales – 24 de países desarrollados y 6 de Chile



Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de los sitios web de las empresas consideradas, Linkedin y Bloomberg.

El gráfico 8 muestra el porcentaje de profesionales con grado de magíster presentes en directorios y gerencias. Se aprecia que Chile es el segundo que posee más directores con este grado académico dentro de los países seleccionados. Probablemente, esto se debe a que personas con magíster ocupan los cargos que en otros países serían otorgados a doctores. En el caso de los directores, Chile es el segundo que menos porcentaje de doctores tiene en los cargos gerenciales.

Gráfico 8: Magísteres en las gerencias y directorios de las más grandes empresas mundiales – 24 de países desarrollados y 6 de Chile



Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos de las páginas web de las empresas, Linkedin y Bloomberg.

Para Australia y Canadá se eligieron empresas mineras para poder hacer una comparación con el caso chileno. En el caso de Rio Tinto en Australia, de los 12 ejecutivos, dos son doctores y seis poseen un título de magíster. En Canadá, Barrick Gold tiene su directiva compuesta por un doctor, ocho magísteres y cuatro titulados. En Antofagasta Minerals, la empresa minera privada más grande de Chile, de los diez profesionales que conformar su grupo gerencial, no hay ningún doctor, sin embargo, un 50% posee grado de magíster.

En resumen, podemos deducir que para que Chile pueda desarrollar tecnología, mejorar su productividad, y aumentar su PIB, es fundamental invertir en I&D y desarrollar políticas que incentiven a las empresas a invertir en innovación y contratar KH especializado.

Veamos ahora lo que sucede con la inscripción de patentes y la publicación de artículos. En Chile, la producción de patentes es casi inexistente en comparación con los países relevantes para este estudio. Chile, que ocupa el último lugar de la lista, inscribió solo 4 patentes por millones de habitantes el año 2013, mientras que Japón, el líder de esta clasificación, supera enormemente al resto de los países con 470 patentes por millón de habitantes (tabla 14 y gráfico 9*)*. Alemania también tiene un muy buen resultado, alcanzando las 292 patentes. Estados Unidos, Canadá y Australia tienen relativamente menos patentes que los países recién mencionados, pero superan con creces a Chile.

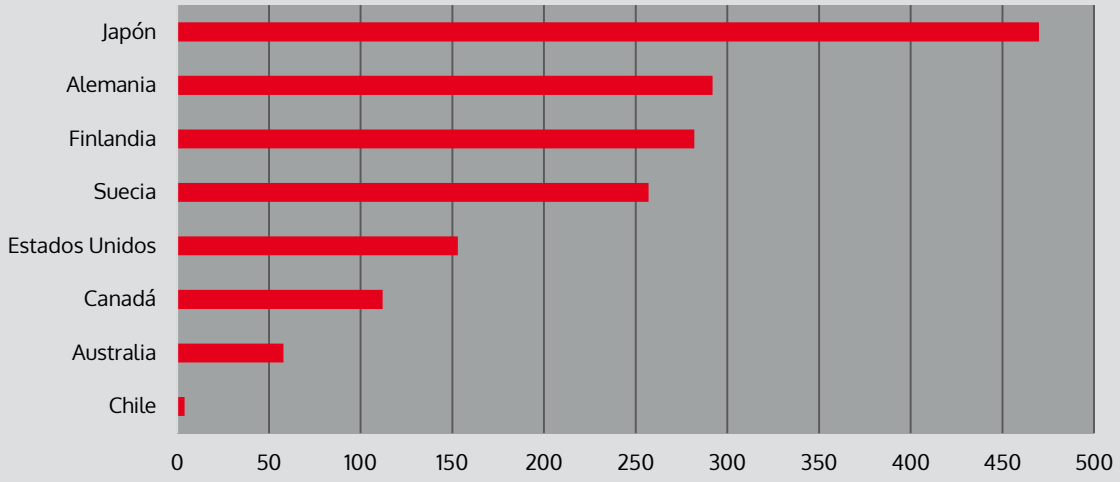
Este resultado tiene concordancia con lo que vimos anteriormente en la tabla 10, donde se muestra una inclinación de los profesionales chilenos a enfocarse más en la publicación en revistas académicas que en la generación de patentes.

Tabla 14: N° de patentes y patentes por Millón de habitantes para Chile y países referentes (2013)

País	N° Patentes (IP5)	Patentes por millón de habitantes
Chile	69	4
Japón	59.848	470
Alemania	23.575	292
Finlandia	1.532	282
Suecia	2.465	257
Estados Unidos	48.418	153
Canadá	3.918	112
Australia	1.341	58

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OECD (2013b)

Gráfico 9: Patentes por millón de habitantes



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de OECD (2013b)

En Chile existen numerosas trabas y pocos incentivos a patentar. Rodrigo Cortés, gerente del departamento de transferencia tecnológica del AMTC, comenta que en Chile el proceso es caro, engorroso y mucho más lento que en otros países. En promedio, se necesitan tres años para poder inscribir una patente, mientras que en Estados Unidos tarda solo uno. Según Cortés, el escaso número de patentes en Chile se debe a lo siguiente:

1. **Lentitud en el proceso:** Patentar en Chile es algo relativamente nuevo. Las oficinas que apoyan la generación de patentes dentro de las universidades no tienen más de 10 años, por lo que hace muy poco no habían profesionales capacitados en el tema, i.e. abogados especialistas en propiedad intelectual. A pesar de que se han hecho esfuerzos y se ha acelerado el proceso (antes se demoraba hasta 5 o 6 años) y hay más expertos en el tema, esto no ha sido suficiente y aún seguimos estando en desventaja respecto a otros países.

2. **Costos altos:** dado que las patentes son de carácter local, para proteger una innovación en otros países se debe patentar en cada uno de ellos. En el caso de la minería, cada vez que se quiere patentar un proyecto se deben considerar también los países que poseen industria minera, lo que hace que el proceso sea mucho más costoso. Si se considera que en promedio una patente cuesta entre 5.000 a 6.000 dólares, el patentar en varios países incrementa considerablemente el costo.

3. **Pocos incentivos a patentar:** los incentivos para los académicos están puestos en las publicaciones en revistas científicas

(revista WOS ISI). El problema de esto es que no se puede haber publicado ni presentado nada sobre la invención previo a la solicitud de la patente. Esto se debe a que cuando uno publica o hace una presentación en una conferencia esto ya pasa a ser conocimiento público, por lo tanto, las patentes interfieren en las publicaciones. En ocurre en todos los países, la diferencia es que en algunos se puede hacer una solicitud provisoria que habilita al investigador a presentar en una conferencia o publicar sobre la innovación. Muchas patentes a nivel mundial ocupan publicaciones que fueron desarrolladas en Chile; las empresas privadas toman provecho de este conocimiento público para generar patentes.

4. **Una patente no garantiza un beneficio económico:** si una patente no se transforma en un producto comercializable o se logra licenciar para que otra empresa haga uso de esta, no existirá un beneficio económico. En este caso, para el investigador es más conveniente publicar, dado que inscribir una patente es costoso y luego de 20 años quedará en el dominio público y podrá ser aprovechada por otros sin pagar los derechos. Además, si el investigador se equivoca y no inscribe la patente en un mercado donde pudiese ser importante, en ese país la podrán usar sin ninguna restricción. Por esto, en algunos casos, patentar puede no ser la mejor opción, ya que es una forma de revelar todos los detalles del proyecto. Es importante también tener el respaldo legal para poder protegerse si una empresa copia la patente sin permiso. En este caso habría que seguir una demanda judicial y las universidades no siempre tienen los recursos para optar por esta vía.

5. **Falta de un ecosistema de desarrollo tecnológico:** Si un país no invierte en I&D y no tiene desarrollo tecnológico es difícil que existan patentes. Habrá desarrollo de conocimiento, pero no necesariamente de patentes. Por ejemplo, si un investigador descubre un nuevo método que permita extraer más cobre, para que pueda patentarse primero necesita demostrar que funciona. Esto es costoso, debido a que se necesitan hacer numerosas pruebas en laboratorio y terreno e invertir en I&D. Entonces, muchas veces los investigadores prefieren ahorrarse esta etapa y publicar sus invenciones, perdiendo todas las posibilidades de patentar.

6. **Pocos incentivos económicos para las universidades:** Debido al poco desarrollo tecnológico que existe en Chile, de las innovaciones que se patentan, muy pocas reciben finalmente financiamiento para transformarse en algo más que un prototipo. En minería es incluso peor si consideramos que la industria tiende a importar la tecnología y prácticamente no desarrollan innovación local. Dado que las universidades reciben un royalty cuando logran licenciar una patente, la falta de un ecosistema de innovación no permite que la universidad reciba recursos suficientes para incentivar la creación de nuevas patentes.

En síntesis, el procedimiento de inscripción de patentes no es muy diferente en Chile en comparación con otros países, lo que cambia es la eficiencia con la que se desarrolla el procedimiento. Considerando que una patente dura 20 años, tener que esperar tres años para inscribirla es demasiado. El número acotado de profesionales capacitados para llevar a cabo el proceso de inscripción de patentes hace que se vayan acumulando los proyectos de innovación que se tienen que revisar y que sea todo mucho más lento. Además, una vez inscrita puede tomar tiempo conseguir una licencia y que se obtengan beneficios económicos.

Otra diferencia es la urgencia que se le da al tema, ya que en Chile no es prioridad el patentar. Si Chile decidiera priorizar la generación de patentes a través de la inversión en I&D y la agilización del proceso de inscripción (se podría tomar como ejemplo la norma estadounidense) sería mucho más rápido y eficiente.

Para finalizar, Cortés menciona que es importante tener en consideración que un aumento del número de patentes no necesariamente generará más transferencia tecnológica. Se pueden crear políticas públicas para incentivar la creación de patentes, pero si esto no va en la línea correcta puede resultar en un incremento en el número de patentes pero sin un impacto real en el desarrollo de innovación local. Lo mismo ocurre con las publicaciones, que a través de diferentes mecanismos se ha aumentado el número, pero esto no necesariamente se refleja en un aumento del conocimiento. Dada la falta de un ecosistema de innovación en Chile, si las patentes se inscriben y luego no se transforman en un producto comercializable esto representa una pérdida de recursos.

En cuanto a las publicaciones en revistas científicas, la diferencia entre Chile y los otros países no es tan extrema (tabla 15 y gráfico 10), lo cual corrobora el argumento presentado anteriormente respecto a los incentivos que existen en Chile para desarrollar investigación.

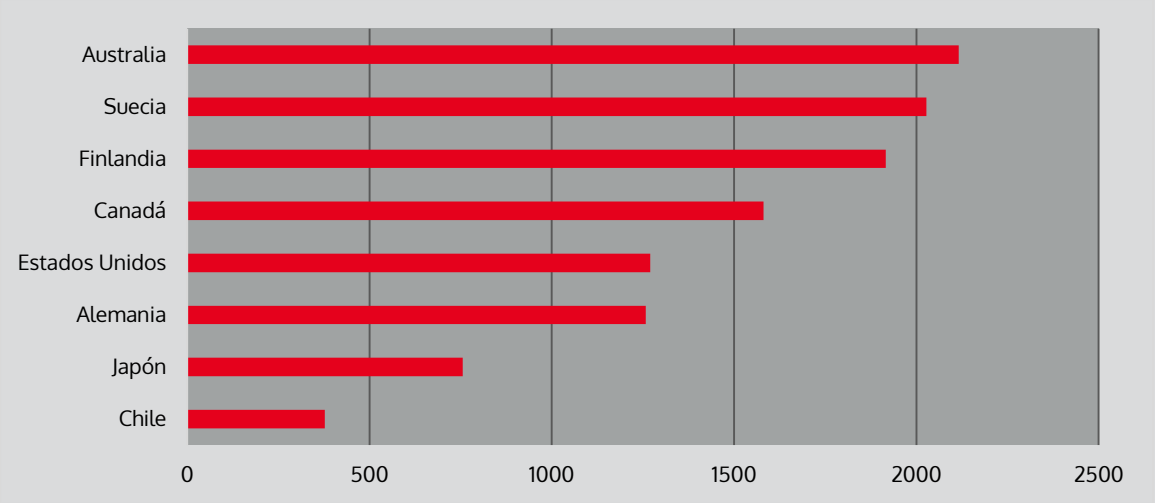
Llama la atención la posición de Japón, que se encuentra por debajo de los otros países. Estos resultados van en la misma línea que las conclusiones obtenidas por un estudio realizado por Kim & Lee (2015), donde comparan los países latinoamericanos con los asiáticos, tratando de responder el porqué estos últimos lograron tasas de crecimiento económico mucho más aceleradas. Después de analizar los datos, concluyen que no es el conocimiento científico, sino que el tecnológico el que realmente importa para el crecimiento económico; la generación de conocimiento científico no necesariamente llevará a un país a la producción de conocimiento tecnológico. Concluyen que este último es determinado por los esfuerzos en I&D, los que tienden a estar más ausentes en América Latina.

Tabla 15: N° de artículos en publicaciones científicas y técnicas y por millón de habitantes para Chile y países referentes (2016)

País	N° de Artículos	Artículos por millón de habitantes
Chile	6.746	377
Australia	51.068	2.116
Suecia	19.937	2.027
Finlandia	10.545	1.916
Canadá	57.356	1.581
Estados Unidos	408.985	1.270
Alemania	103.122	1.258
Japón	96.536	756

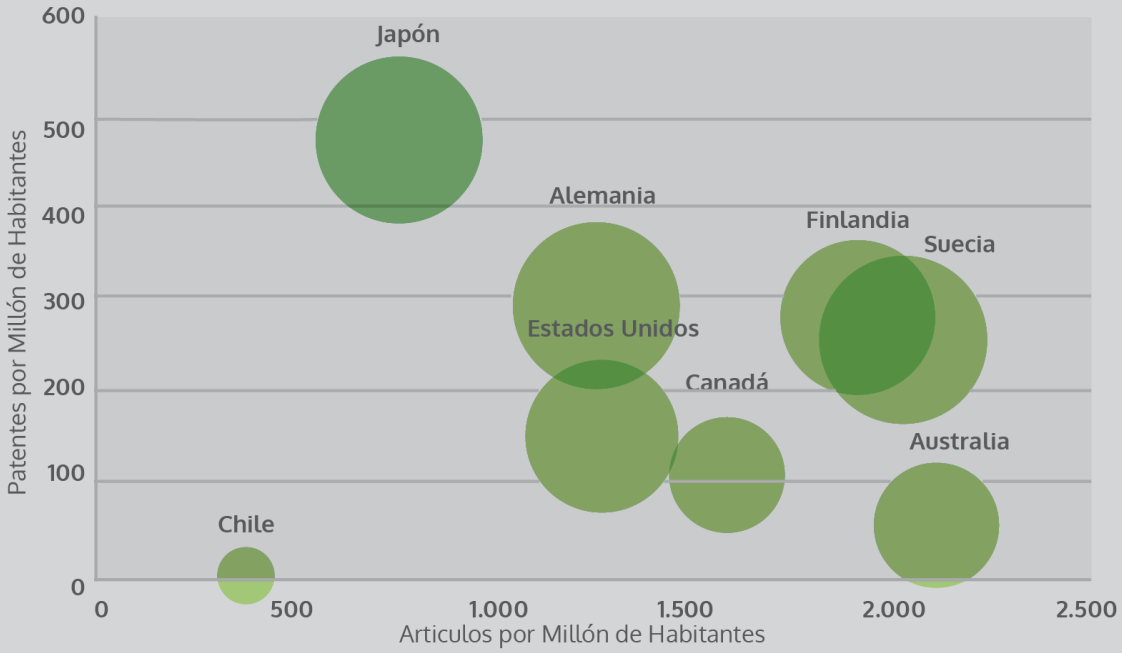
Fuente: Elaboración propia a partir de datos de World Bank y UN (2017)

Gráfico 10: Artículos por millón de habitantes



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de World Bank (2013) y UN (2017)

Gráfico 11: Patentes y artículos por millón de habitantes (2013-2017)*
Tamaño de los círculos corresponde al gasto en I&D como porcentaje del PIB



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de World Bank (2013), OECD.stat y ONU (2017).
* Los datos correspondientes al número de artículos son del año 2013, mientras que los de las patentes del año 2017.

En el gráfico 11 se presenta la relación entre patentes y publicación de artículos para los diferentes países. El tamaño de la burbuja está determinado por el porcentaje del PIB destinado a I&D. Como se puede apreciar, existe una relación importante entre el gasto en I&D y los otros dos índices, aunque en algunos países exista una preferencia por uno o por el otro. Japón tiene una notoria inclinación hacia las patentes, mientras Australia a la publicación de artículos. Independiente de la preferencia, podría inferirse que la inversión en I&D es necesaria para mejorar estos índices.

En síntesis, los esfuerzos de Chile para impulsar I&D son insuficientes; tanto el sector público como el privado están muy lejos de alcanzar a los países de la OCDE. De igual forma, al comparar con países mineros relevantes y países líderes en tecnología, vemos que la brecha sigue siendo importante. Esto es muy preocupante si queremos seguir siendo competitivos en general y en minería en particular. La industria del cobre podría ser una oportunidad para alcanzar el desarrollo si se aplican los incentivos adecuados, para lograr utilizar la bendición de recursos naturales que nos entrega nuestra geografía como una plataforma para la generación de innovación y desarrollo tecnológico (Meller & Gana 2015).

3. Becas

Veamos ahora las becas de magíster y doctorado concedidas por el Estado. Gran parte de su aumento se debe a la iniciativa Beca Presidente de la República entre 1981 y 2008, para luego ser modificada y rebautizada como Becas Chile. Se calcula que el primer sistema de becas ayudó a más de 2.700 profesionales a seguir con estudios de postgrado en el extranjero y más de 1.000 en instituciones nacionales durante el periodo que estuvo vigente (Márquez & Heyl Ch. 2010). Esta cifra ha sido ampliamente superada por Becas Chile, la cual ha entregado cerca de 40.000 subvenciones entre el año 2008 y 2016 (tabla 16). Estas cifras corresponden a la totalidad de ayudas económicas entregadas por esta iniciativa, considerando también programas de pasantías, apoyos a tesis doctorales, publicaciones de revistas científicas, CONICYT-Alma, etc.

En los datos entregados por la Primera y Segunda Encuesta del Ministerio de Economía, de la totalidad de doctores residentes en Chile en el 2014, la mayoría había obtenido el financiamiento gracias a las becas otorgadas por el Estado (45%) (Anexo 4), mientras que el resto lo obtuvo a través de diferentes medios: becas otorgadas por la institución donde estudió (10,4%), crédito (11%), beca o subsidio del país de destino (12,7%), ahorros personales (6,7%), etc. Hay una baja participación del sector empresarial, alcanzando solo un 0,6% (Ministerio de Economía Fomento y Turismo 2016).

Tabla 16: Ayudas entregadas por Becas Chile (2008-2016)

Año	Adjudicaciones
2008	4.738
2009	4.350
2010	4.199
2011	5.011
2012	4.830
2013	4.503
2014	4.263
2015	4.115
2016	3.915
Total	39.924

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de CONICYT (2018)

Tabla 17: Becas otorgadas por CONICYT para magíster (2009-2017)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Total
Nacional	100	135	284	323	387	323	244	250	251	**2.297**
Extranjero	777	325	472	397	439	408	390	377	358	**3.943**
Total	**877**	**460**	**756**	**720**	**826**	**731**	**634**	**627**	**609**	**6.240**

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de www.conicyt.cl

Tabla 18: Becas otorgadas por CONICYY para doctorado (2009-2017)

	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	Total
Nacional	500	478	591	593	456	596	740	735	735	**5.424**
Extranjero	539	439	298	309	357	351	362	360	360	**3.375**
Total	**1.039**	**486**	**889**	**902**	**813**	**947**	**1.102**	**1.095**	**1.095**	**8.368**

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de www.conicyt.cl

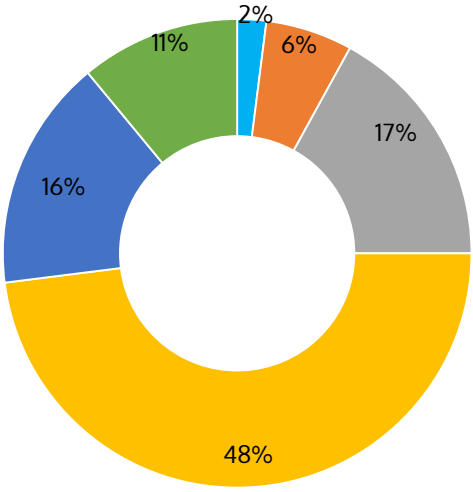
La tabla 17 y la tabla 18 muestran la cantidad de becas otorgadas[12], tanto para magíster como para doctorado, entre el año 2009[13] y el 2017. De estos datos se puede desprender que el Estado ha puesto mayor énfasis en promover estudios de doctorado que de magíster (8.368 becas de doctorado versus 6.240 de magíster). En el caso de los magíster se incentivan los estudios en universidades extranjeras (3.943 versus 2.297), mientras que en los doctorados ocurre lo contrario (5.424 becas para universidad nacionales versus 3.375 para el extranjero).

[12] Esto no representa la totalidad de las becas otorgadas por Becas Chile. Esta iniciativa además entrega becas para extranjeros, magíster para profesionales de la educación, pasantías en el área de la salud, etc.
[13] A pesar de que el sistema comenzó a regir el año 2008, no se encontraron datos para dicho año.

Sin duda, el Estado ha hecho esfuerzos para aumentar la cantidad de becas en relación a lo que se hacía con el sistema anterior. Sin embargo, este dato no es el único factor relevante a la hora de evaluar la eficiencia de esta inversión, sino que también debemos examinar las áreas de estudio a las que se están destinando estos recursos.

En el año 2017, las becas de magíster—tanto para instituciones nacionales como en el extranjero—se concentraron mayoritariamente en el área de las Ciencias Sociales[14], con un 48% del total (gráfico 12). En segundo lugar, la disciplina que más recibió financiamiento fue Ciencias Naturales con un 17%, seguido de Humanidades (16%), Ingeniería y Tecnología (11%), Ciencias Médicas y de Salud (6%) y finalmente Ciencias Agrícolas (2%).

Gráfico 12: Becas de magíster otorgadas por área OCDE (2017)



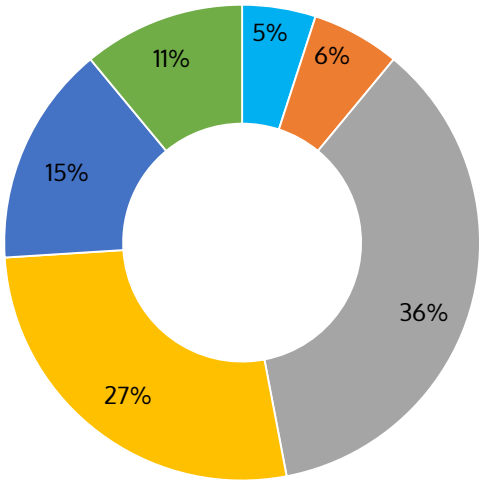
- Ciencias agrícolas
- Ciencias médicas y de la salud
- Ciencias naturales
- Ciencias sociales
- Humanidades
- Ingeniería y tecnología

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de www.conicyt.cl

[14] Las áreas de conocimiento utilizadas por CONICYT son las definidas en el Manual de Frascati (OECD 2015), informe desarrollado por la OCDE para impulsar un lenguaje común global a la hora de hacer estadística en temas de I&D.

A pesar de que la distribución de los doctorados es un poco más homogénea, sigue habiendo una inconsistencia. La mayor cantidad de becas es otorgadas a las Ciencias Naturales (35%), seguido de Ciencias Sociales (27%), Humanidades (15%), Ingeniería y Tecnología (11%) y finalmente se encuentra Ciencias Médicas (6%) y Ciencias Agrícolas (5%) (gráfico 13). Las Ciencias Sociales reciben 3 veces más becas de doctorado y 4.5 veces más becas de magíster que las Ingenierías. Esta repartición parece inconsistente con las necesidades del país. La ingeniería y la minería son rubros muy importantes en la economía local; este último representa un 10% del PIB y más de un 50% de las exportaciones, por lo que debería ser prioritario formar profesionales que desarrollen innovación en esta área.

Gráfico 13: Becas de doctorado otorgadas por área OCDE (2017)



- Ciencias agrícolas
- Ciencias médicas y de la salud
- Ciencias naturales
- Ciencias sociales
- Humanidades
- Ingeniería y tecnología

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de www.conicyt.cl

Las Ciencias Sociales reciben 3 veces más becas de doctorado y 4.5 veces más becas de magíster que las Ingenierías. Esta repartición parece inconsistente con las necesidades del país.

En resumen, a pesar de que Becas Chile ha significado un aumento sustancial en la cantidad de becas otorgadas, es cuestionable la distribución porcentual de las áreas promovidas. Ya se están viendo los resultados negativos de esto. La Asociación Nacional de Investigadores de Postgrado (ANIP) realizó una encuesta a 752 investigadores e investigadoras en ciencia que obtuvieron financiamiento del Estado para realizar su especialización (ANIP 2018). De esta muestra, 540 son doctores, de los cuales un 12,9% están desempleados y un 2,5% inactivos. Otro dato interesante es que un 15% ha sentido discriminación en el trabajo por estar sobrecalificado. Adicionalmente, cerca del 37,1% de los doctores trabajan con contrato indefinido y un 13% a honorarios sin contrato.

A pesar de que esta encuesta no utilizó una muestra aleatoria (se hizo a través de internet de forma abierta), ayuda a entender las dificultades que enfrentan los doctores al volver a Chile. Este fenómeno podría incluso empeorar en los próximos años, dado que la oferta de doctores aumentará mientras que la demanda probablemente crecerá muy poco. Las universidades tienen un límite de vacantes y recursos para desarrollar investigación, mientras que la industria no ha mostrado mucho interés en contratar KH especializado para liderar sus procesos productivos.

CONICYT (2017) definió en el año 2017 tres áreas prioritarias para las becas de magíster: recursos hídricos, resilencia ante desastres de origen natural y transformación digital. A pesar de que es un avance, es insuficiente, ya que este proyecto considera un máximo de 75 becas para estas áreas, lo cual representa solo un 12% de las becas que fueron otorgadas el 2017 para magíster. Adicionalmente, no se consideran disciplinas claves para impulsar el desarrollo de tecnologías acordes a la Revolución 4.0, como la robótica, la nanotecnología, etc. Además, tampoco se toman en cuenta áreas relacionadas al medio ambiente, lo cual es preocupante considerando las escaseces de recursos y los riesgos de seguridad en sus suministros, además del cambio climático donde los ingenieros y científicos son fundamentales para generar innovaciones que disminuyan estos impactos (Academia de Ingeniería de Chile 2018).

En realidad, no hay una definición respecto de cuáles serían las áreas prioritarias supuestamente vinculadas a promover el desarrollo futuro de Chile, ni tampoco vinculadas a la Revolución 4.0. El gobierno debiera hacer un estudio y definir cuál es el estado actual de la investigación en Chile y las posibilidades de innovación y crecimiento de cada área de conocimiento y a partir de eso desarrollar una estrategia basada en lo que se quiere lograr como país. Mauricio Sáez, director de la ANIP, considera que "no hay una planificación de cuántas personas doctoradas necesita Chile, cuántas estamos generando, y cuántas de las que se necesitan realmente se pueden emplear en investigación" (ANIP 2016).

A pesar de que desde el año 2009 Conicyt posee un Programa de Atracción e Inserción de Capital Humano Avanzado (PAI), la cobertura de este programa es insuficiente. En un informe del Banco Mundial & la OECD (2011), se critica especialmente la política de atracción y reinserción de graduados que tiene Chile; que se basa en un método de castigo para el que no regresa en vez de premiar la vuelta al país y apoyarlos en la búsqueda de oportunidades laborales.

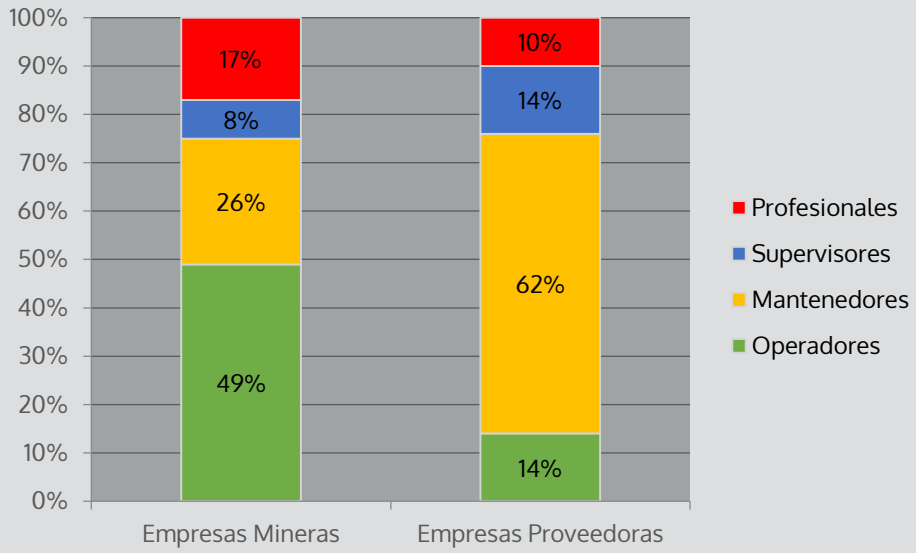
"No hay una planificación de cuántas personas doctoradas necesita Chile, cuántas estamos generando, y cuántas de las que se necesitan realmente se pueden emplear en investigación" (ANIP 2016).

Esta problemática está también relacionada con la baja participación en I&D que tiene el sector privado en Chile. Muchas empresas privadas tienen una carencia importante de KH especializado y muchas veces no poseen un departamento o unidad dedicada a I&D, lo que genera una falta de conocimiento respecto a los avances científicos que se desarrollan, y por ende, una baja incorporación a sus procesos (Santelices & Lund 2013). Al no tener cultura de I&D y no considerarlo relevante en el desarrollo productivo, tampoco lo es el contratar KH especializado para que desarrolle y mejore estas iniciativas.

Por otro lado, las universidades cumplen un rol importante en el proceso de inserción laboral y debiesen apoyar a sus graduados. Por ejemplo, la Universidad de la Frontera incorporó un programa de inserción de sus doctores a industrias estratégicas, al mismo tiempo que enfocó sus programas académicos en desarrollar habilidades que son requeridas para el sector industrial, como formación de negocios, valorización de tecnologías y propiedad intelectual, entre otras (El Mercurio 2018).

Es importante destacar que, a diferencia de los otros países, Chile posee un solo mecanismo para acceder a las becas del Estado. En el caso de Canadá, por ejemplo, existen numerosas vías para obtener financiamiento, tanto en instituciones nacionales como en el extranjero. Cada beca tiene prioridades y procedimientos diferentes, lo que les permite enfocarse en distintas necesidades y realidades del país. A pesar de que también tienen una beca pública para financiar estudios de magíster que selecciona 2.500 estudiantes por año y se destina a todas las áreas de conocimiento, poseen además becas específicas para graduados de carrera de ingeniería y tecnología (Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada 2018). Igualmente, tienen convenios especiales con diferentes países, donde se entrega el financiamiento de forma conjunta y así el Estado define qué países y qué universidades podrían entregar un apoyo más relevante de acuerdo a las necesidades locales.

Gráfico 14: Trabajadores según categoría



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Consejo de Competencias Mineras (2017)

4. Profesionales en la minería chilena

De acuerdo a los datos de Cochilco (2016), en el año 2016 la fuerza laboral minera del país alcanzaba los 218.160 trabajadores. Dado que no existe el detalle de las características del personal minero a nivel nacional, utilizaremos un estudio que se realizó sobre la gran minería del cobre. Según este reporte publicado por el Consejo Minero (2017a), en la gran minería chilena existen 42.900 trabajadores[15]. De este total, un 17% son profesionales, un 8% supervisores, un 26% mantenedores y un 49% operadores (gráfico 14).

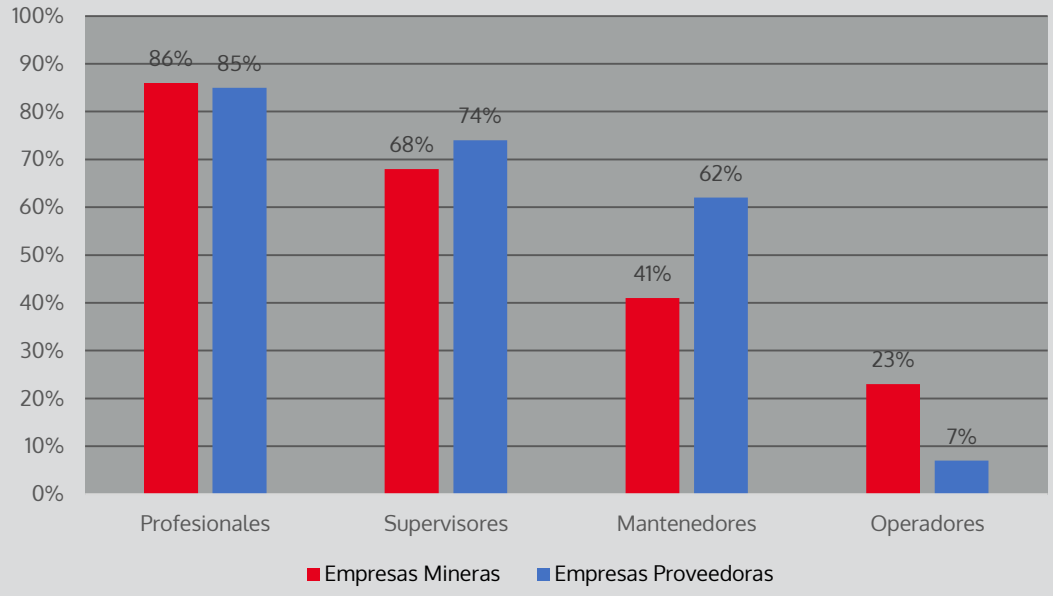
Este mismo informe entrega datos para las empresas proveedoras de la minería, sin embargo, para este estudio se consideraron solo 14.518 trabajadores, lo que corresponde al 27% del total de proveedores de la industria minera en Chile. En este caso, utilizaremos esta muestra para evaluar el escenario total, estimando que el 10% de los trabajadores son profesionales, el 14% supervisores, el 62% mantenedores y el 14% operadores.

[15] Para este estudio, se utilizó la información entregada por 13 empresas mineras (37 faenas productivas). Los datos corresponden al 100% de la gran minería chilena.

Dentro de estas categorías, el 86% de los profesionales de las empresas mineras cuenta con estudios superiores, los que pueden ser técnicos de nivel superior o profesionales con o sin licenciatura (gráfico 15). En el caso de los supervisores, el 68% posee algún grado de educación superior, mientras que en los mantenedores el 41% y en los operadores el 23%.

En el caso de las empresas proveedoras el escenario es un poco distinto. En el caso de los profesionales, no hay mucha diferencia, ya que el 85% posee algún grado de educación superior. En los supervisores la brecha tampoco es tan notoria, pero algo superior que en el caso de las empresas mineras, alcanzando un 74%. Sin embargo, en el caso de los mantenedores y operadores el resultado es muy distinto, con 62% y 23% de profesionales con educación superior respectivamente.

Gráfico 15: Trabajadores con educación superior por categoría



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Consejo de Competencias Mineras (2017).

En la minería de Australia y Canadá existe una dotación de investigadores por millón de toneladas métricas de cobre (TMC) hasta 80 veces mayor que la registrada en Chile.

Como ya se mencionó anteriormente, Chile es un país con resultados insuficientes en los índices de I&D. Además, el sector privado ha demostrado escaso interés en contratar personal capacitado para esto. En Chile, solo 4.950 trabajadores se dedican al I&D en el sector privado, de los cuales un poco más del 50% son investigadores (tabla 19).

En el sector minero, del total de trabajadores dedicados a I&D, solo 249 se concentran en la industria minera (5%), mientras que del total de investigadores, solo 85 han sido contratados por este sector (3%).

Esto es muy bajo en comparación con otros países mineros. En el caso de Australia, por ejemplo, existen 70.467 trabajadores dedicados a I&D en el sector privado, de los cuales 3.668 ejercen en el sector minero. De los 33.016 investigadores que contratan las empresas de este país, 1.194 se concentran en la industria minera.

Para hacer una comparación más pertinente, el número de investigadores se ha normalizado por millones de toneladas métricas de cobre producidas por cada país. Nuevamente, existe una enorme brecha entre Chile y los países referentes. En la minería de Australia y Canadá existe una dotación de investigadores por millón de toneladas métricas de cobre (TMC) hasta 80 veces mayor que la registrada en Chile.

Tabla 19: Personal dedicado a I&D en empresas en Chile y países referentes - total de investigadores y sector minero (2016)*

País	Total Personal I&D	Investigadores	Personal I&D en Minería	Investigadores en Minería	Investigadores / Millón de TMC
Chile	4.950	2.655	249	85	15
Australia	70.467	33.016	3.668	1.194	1.200
Canadá	149.690	91.734	1.333	665	950

Fuente: Elaboración propia a partir de OECD.stat

* Datos corresponden al año 2016 o último año disponible.

Veamos más en detalle lo que sucede con la minería australiana, ya que es muy similar a la chilena: la contribución económica de la minería en este país alcanza el 15% del PIB—considerando las empresas mineras y los METS[16]—, un 50% de sus exportaciones (Minerals Council of Australia 2017) y posee 218.400 trabajadores (Australian Bureau of Statistics 2017). Sin embargo, existe una diferencia en el nivel de educación que tienen los trabajadores de ambos países. En Australia, de la totalidad de trabajadores de la industria minera, 11.100 poseen un título de magíster o doctorado, 2.100 un certificado de graduación y 38.000 un grado de licenciatura. Esto quiere decir que, de todos los trabajadores del sector minero, un 23% tiene títulos universitarios o superiores. Además, si consideramos otros diplomas que pueden ser obtenidos después de cursar la enseñanza secundaria, un 55% posee un grado académico relativamente alto. Por otro lado, un 71% posee algún título o formación cursada posterior a la educación escolar.

En el caso de Chile podemos ver que de los 57.418 trabajadores considerados en el estudio recién analizado (empleos directos e indirectos), un 46% accedió a la educación superior (ya sea técnico de nivel superior o profesionales con o sin licenciatura). Sin embargo, hay que tener en consideración que estos datos corresponden solo a la gran minería del cobre, por lo que a nivel nacional esta proporción podría ser mucho menor, dado que las pequeñas empresas tienden a tener más dificultades para atraer personal capacitado debido a los altos salarios que ofrece la gran minería y mejores perspectivas de desarrollo profesional (Comisión Nacional de Productividad (CNP) 2017).

[16] METS: Australian Mining, Equipment, Technology and Services.

A continuación, la tabla 20 muestra el detalle de los profesionales altamente cualificados según su área de trabajo en Australia. En las empresas mineras australianas el profesional predominante es el ingeniero de minas, alcanzando 8.019 contratados de forma directa y 2.057 de forma indirecta. En el caso de los empleados indirectos, los profesionales más demandados son los científicos medioambientales (7.977). Esto refleja la importancia que le da el país a los temas de sustentabilidad y medioambiente, a tal punto que los profesionales dedicados a esta área han pasado a ser los terceros más demandados si consideramos los empleos directos e indirectos, con un total de 9.945 profesionales contratados (en primer lugar está Ingeniería Industrial y Mecánica con 10.195 y en segundo lugar Ingeniería de Minas con 10.075).

La industria minera australiana contrata más Geólogos, Geofísicos, Metalurgistas, Físicos, Ingenieros de Minas y Gerentes de Producción que cualquier otra industria (Minerals Council of Australia 2018). Además, como se puede ver en la tabla 20, en la parte del ranking de la industria, el sector minero es el que contrata más Científicos Ambientales, Ingenieros Químicos y de Materiales, Ingenieros Industriales y Mecánicos.

Tabla 20: Profesionales altamente cualificados en la industria minera australiana (2017)

	Empleados Directamente	Empleados Indirectamente	Ranking de la Industria*
Ingenieros Químicos y de Materiales	722	1.230	3
Científicos Ambientales	1.968	7.977	3
Geólogos y Geofísicos	4.773	2.390	1
Ingenieros Industriales y Mecánicos	2.372	7.823	3
Metalurgistas y Físicos	900	1.638	1
Ingenieros de Minas	8.019	2.057	1
Gerentes de Producción Minera	7.424	-	1
Topógrafos y Científicos Espaciales	866	-	5

Fuente: Elaboración propia a partir de Minerals Council of Australia (2018).

* Se refiere al lugar que tiene la industria minera en cuanto a contratación de profesionales en comparación a los otros sectores productivos.

Las capacitaciones dentro de la empresa minera son muy importantes, al igual que en cualquier sector productivo. Un informe del Consejo de Competencias Mineras (CCM) (2017) calculó que en Chile tenemos 31,1 horas promedio de capacitaciones por trabajador al año[17] con una inversión promedio de $231.320 por individuo. Si consideramos solo los trabajadores que realmente participan en la capacitación, el costo promedio disminuye a $126.228 por empleado.

En Australia, las capacitaciones realizadas por la industria minera en el año 2011 y 2012 tuvieron un presupuesto de 1.15 billones de dólares australianos; casi un 98% fue financiado por la industria privada y solo un 2% provino de subsidios gubernamentales (Australian Mining 2013). Para poder compararlo con los datos chilenos tenemos que intentar estimar el gasto de un año; asumiremos que el gasto fue el mismo cada año. Es decir, si estimamos que el gasto anual para el año 2012 fue de 575 millones de dólares australianos y que a esa fecha existían alrededor de 202.000 trabajadores en la industria minera, podemos estimar que el gasto por trabajador fue de 2.846 dólares.

En pesos chilenos, esta cifra corresponde a $1.379.761. Es decir, en Australia se gasta 6 veces más en capacitación por trabajador que en Chile. Además, cabe destacar que el estudio realizado por el CCM considera solo la gran minería chilena, por lo que si consideráramos el total del sector nacional el gasto sería probablemente menor, ya que la pequeña y mediana minería posee menos recursos y eventualmente su presupuesto para capacitaciones debiese ser menor. Hay que tener en consideración que es probable que los costos promedio de capacitación sean más elevados en Australia que en Chile y que la calidad sea mayor.

[17] Se consideró el año 2016 para el estudio.

5. Doctores y empresas productivas

La evidencia empírica muestra que: (i) Las empresas chilenas contratan muy pocos doctores; menos del 6% trabaja en las empresas. (ii) El mayor porcentaje de la I+D que generan innovaciones aplicadas la efectúan personas que no tienen doctorados.

¿Por qué las empresas chilenas contratan pocos doctores? Veamos previamente la pregunta inversa. ¿Por qué las empresas debieran contratar doctores?

Vivimos en el siglo del "conocimiento y la innovación". Hay una retroalimentación interactiva recíproca entre ambos. El KH especializado, primordialmente el más avanzado, los doctores, son los que poseen el conocimiento acumulado más especializado. El flujo de estos doctores hacia las empresas va a facilitar que estas puedan insertarse en la economía del conocimiento y de la innovación. Dada las características de los doctores, los desarrollos tecnológicos y las innovaciones van a tener el sesgo hacia el uso intensivo de KH especializado; esto incrementará la productividad de la fuerza de trabajo de la empresa, aumentando así su competitividad. Este ha sido uno de los principios fundamentales de la "Estrategia Irlandesa para la Ciencia, Tecnología e Innovación" (Advisory Council for Science Technology and Innovation (ACSTI) 2009).

La OCDE generaliza esto señalando que "el capital humano especializado en ciencia y tecnología es la base para el crecimiento basado en la innovación". En efecto, en "la nueva economía donde el conocimiento es la fuente principal del crecimiento económico, el capital humano es tan importante como el capital financiero" (Auriol 2010).

A nivel microeconómico, Zimm (2018) plantea que las empresas no debieran contratar doctores por motivos altruistas, sino que porque "son muy inteligentes, apasionados por lo que hacen y con "motor propio" (autónomos)". Además, existen varias competencias específicas que poseen los doctores que debieran ser atractivas y útiles para las empresas: facultades para la resolución de problemas complejos, habilidades para la investigación, capacidad de identificar y definir problemas, acostumbrados a la incertidumbre, generadores de información y difusores del conocimiento (Hankel 2017; Couston & Pignatel 2018; Advisory Council for Science Technology and Innovation 2009). Adicionalmente, los doctores son los que tienen "el conocimiento donde está el conocimiento" (ACSTI 2009) y la comprensión para saber cuál es el conocimiento relevante.

Los doctores no sólo sirven para hacer investigación; también pueden ser buenos líderes y tomadores de decisión. Para que las empresas se puedan insertar en la Revolución Tecnológica 4.0 es fundamental que los gerentes y directores (de empresas) comprendan y valoren la importancia de las nuevas tecnologías y de la innovación; es decir, que implementen el desarrollo del conocimiento como política empresarial.

Un estudio empírico realizado por (He 2014) con un panel de 1500 empresas (del Standard & Poor) para 7.403 CEO (período 1992-2004) muestra lo siguiente: (a) Las empresas cuyos CEO son doctores tienen un 24% mayor de patentamiento que las empresas cuyos CEO no son doctores; este es un indicador que mide el nivel de innovación de una empresa. (b) Las patentes de las empresas cuyos CEO son doctores tienen un nivel de citas que es un 46% mayor que las patentes las empresas cuyos CEO no son doctores; este indicador es considerado como una buena medida de la calidad de la patente. En resumen, las empresas cuyos CEO son doctores son más innovadoras (patentan más) y generan innovaciones de mayor calidad que las empresas cuyos CEO no son doctores.

En otras palabras, los doctores aumentan la cantidad y calidad de la innovación cuando tienen cargos gerenciales en las empresas; son más sensibles al bajo nivel de innovación que los gerentes que no tienen doctorado.

Dado lo descrito previamente entonces ¿por qué las empresas chilenas no contratan doctores? Los CEO, Directores y reclutadores (gerentes de RRHH y "headhunters") ¿sólo seleccionan a personas similares a ellos – sin doctorado?

Veamos cual es la visión desde la empresa respecto de los doctores (Couston & Pignatel 2018; Benito & Romera 2013; Fixari & Pallez 2005):

a) Las empresas contratan personas que sean capaces de adaptarse rápidamente al quehacer de la empresa, involucrarse en la problemática coyuntural y generar ideas y propuestas en el corto plazo.
b) Las empresas creen que no es tan importante innovar, por cuanto es menos costoso y menos riesgoso importar las tecnologías innovadoras.
c) Las universidades–y particularmente los programas de doctorado–están desconectados del mundo productivo. Esta desconexión va en los dos sentidos; las empresas no tienen información respecto al contenido docente y foco de la investigación de los programas de doctorado.
d) Las empresas desconocen el aporte que pueden traer los doctores a sus organizaciones. No tienen estructuras organizacionales que acojan adecuadamente a estos profesionales[18].
e) Las empresas prefieren contratar a profesionales con magíster, los cuales se pueden amoldar más fácilmente a la lógica prevaleciente en la empresa. Los doctores pueden ser muy críticos y disruptivos respecto de esta lógica.
f) Hay cierta soberbia en el comportamiento de los doctores, quienes menosprecian a personas con grados no-doctor: técnicos, profesionales, magíster.

[18] Sugerencia de Javier Ruiz del Solar, Director Ejecutivo de Beauchef Minería.

g) El training adquirido durante la elaboración de la Tesis sesga a los Doctores hacia el trabajo individual y aislado. Esto implica que los Doctores no tienen mucha costumbre de trabajar en equipo, ni tampoco tienen las habilidades sociales para interactuar en un grupo con personas que no son Doctores. Los Doctores sólo están acostumbrados a interactuar con otros Doctores; el tema de conversación se restringe al paper pasado o el paper que están escribiendo ahora. "Esto es particularmente preocupante cuando el Doctor no ha tenido ninguna experiencia de trabajo fuera del ámbito académico" (Couston & Pignatel 2018).

Que las empresas chilenas contraten muy pocos doctores es un fenómeno generalizado. En efecto, esto es algo que ha empezado a constituir una preocupación de los países de la OCDE desde el comienzo de este siglo. En 19 países desarrollados de la OCDE sólo el 14% (valor mediana) de los doctores trabaja en las empresas productivas; hay tres países en que dicho porcentaje supera el 33%: EEUU, Bélgica y Holanda (año 2009).

Esto ha llevado a la OCDE y los Gobiernos europeos a elaborar una serie de propuestas para establecer un variado set de "puentes" y vinculaciones entre las dos culturas: Universidades y Empresas.

III. Tendencias Tecnológicas Relevantes para la Minería Futura

1. Tendencias en minería

Históricamente, la industria minera ha sido lenta y reacia a adoptar nuevas tecnologías. Independiente del motivo de este rezago tecnológico respecto a otras industrias, ya sea porque son empresas adversas al riesgo—probablemente por el alto factor de riesgo e incertidumbre al que están sometidas—o porque se han sentido cómodas haciendo las cosas de una cierta forma, ciertamente, la nueva era tecnológica cambiará la forma en que se explotan los recursos y las empresas lo deben integrar cuanto antes a sus políticas internas y estrategias de producción.

Los bajos niveles de productividad asociados a las decisiones que se tomaron durante el súper ciclo de precios altos, donde se priorizó incrementar las dotaciones de mano de obra y capital para aumentar la producción en desmedro de la productividad, han hecho que las empresas hoy en día tengan que poner mayor énfasis en disminuir sus costos (CNP 2017). Esto también se ha visto afectado por la disminución de la ley del mineral y el hecho de que el recurso es cada vez más escaso y difícil de extraer, por lo que la tecnología cumple un rol clave en este proceso.

Este escenario ha impulsado a las grandes empresas mineras a innovar. Por este motivo, con el objetivo de identificar las tendencias que darán forma a la minería del futuro, la revisión de lo que está sucediendo en otras partes del mundo pasa a ser esencial. Para nuestro estudio se ha tomado como referencia el caso de Rio Tinto en Australia, la cual representa una experiencia de éxito en cuanto a modernización y sofisticación de las operaciones. Dicha compañía se ha embarcado en una trayectoria fundada en la innovación, estrategia que en el presente ha mostrado notorios resultados en cuanto a productividad y promete seguir avanzando a futuro. Otro caso relevante para este estudio es el de CODELCO, empresa que ha sido pionera en innovación en Chile y que ha integrado importantes avances tecnológicos a sus procesos productivos.

Tomando como ejemplo reportes de consultoras líderes en temas de minería, como Deloitte y McKinsey, hemos definido tres enfoques para abordar el tema de los avances tecnológicos. La primera clasificación la hemos hecho según el tipo de tecnología, donde hemos identificado cinco áreas importantes (figura 4). Estas son: Tecnologías Productivas, Tecnologías de Información, Medio Ambiente, Seguridad Operacional y Eficiencia Energética.

Para el segundo enfoque, hemos considerados los programabas colaborativos de la industria minera, dado su importancia en el desarrollo de innovación tecnológica.

Finalmente, el tercer enfoque revisa los avances tecnológicos vistos desde su proceso productivo, enfocándonos principalmente en la transformación digital y automatización necesaria en cada etapa productiva.

Enfoque 1:
Tendencias globales determinantes para el futuro de la minería

A continuación, analizaremos cada una de las cinco tendencias de forma separada. Sin embargo, no debemos olvidar la interrelación que existe entre ellas. Muchas de las innovaciones tecnológicas que se están integrando a la minería abarcan más de una tendencia.

Esta interrelación entre las distintas tecnologías se puede apreciar en la figura 5, una matriz que muestra cada tecnología y las tendencias en las que se puede clasificar cada una.

Figura 4: Tendencias globales determinantes en la minería

Fuente: Elaboración propia

Figura 5: Interrelación entre las tendencias globales determinantes en la minería

	Tecnologías Productivas	Tecnologías de la Información	Medio Ambiente	Seguridad Operacional	Eficiencia Energética
Equipos Autónomos	■			■	■
Automatización de Sist.	■				
Sensores	■		■	■	■
Drones	■		■	■	
Big Data		■	■	■	■
Artefactos Móviles		■			
Visualización 3D		■			
Redes Sociales		■	■		
Cloud Computing		■			
Internet of Things		■			
Sistemas de Ventilación				■	
Energías Renovables			■		■
Emisiones de Carbono			■		
Relaves			■		

Fuente: Elaboración propia

- **Tecnologías Productivas**

Los desafíos que enfrenta la minería a nivel mundial han aumentado la relevancia de la innovación en tecnologías productivas. A diferencia de CODELCO, que sí desarrolla innovación local, la mayoría de las empresas mineras chilenas tienden a importar la tecnología, dejándonos muy atrás en comparación con empresas mineras líderes a nivel mundial. Si bien los camiones autónomos fueron integrados a la minería chilena hace diez años (la primera fue en Gabriela Mistral de CODELCO), este proceso ha quedado estancado durante una década y aún no se ha logrado expandir al resto de la industria (Minería Chilena 2016).

A continuación, se describen algunas de las tecnologías productivas innovadoras más importantes. Hemos identificado estas tecnologías basándonos en Matysek & Fisher (2016); McKinsey (2017); CSIRO (2017) y Deloitte (2018). Utilizamos a CODELCO y Rio Tinto como benchmark.

Tecnologías Productivas

Fuente: Elaboración propia

1. **Equipos autónomos y remotos:**

A modo de definición, la automatización puede ser entendida como la gestión inteligente de un sistema usando tecnología apropiada, de tal manera que su operación pueda ocurrir sin intervención humana. Su implementación tiene el potencial de generar resultados notorios, especialmente en productividad y seguridad laboral, produciendo también una reconfiguración de la fuerza de trabajo y el conjunto de habilidades y conocimientos requerido.

La automatización se ha aplicado a distintas etapas de la cadena de valor:

- *Perforación y tronadura*: Implementación de perforadores autónomos y camiones "inteligentes"[19] para el transporte de explosivos. 20% de los perforadores en Pilbara (Rio Tinto) son autónomos y la mina West Angelas es la única en el mundo que opera con una totalidad de perforadores autónomos.
- *Camiones autónomos*: Uso de camiones equipados con sensores y sistemas de comunicación con GPS, capaces de transitar por rutas predeterminadas de forma autónoma. CODELCO cuenta con 18 camiones autónomos y a pesar de haber sido pioneros en esta tecnología, la adaptación en Chile ha sido lenta. Por otro lado, Rio Tinto opera 71 camiones autónomos a lo largo de sus operaciones en Pilbara.
- *Martillos remotos*: Rompedores de roca dotados de sistemas de video con imágenes reales y proyecciones virtuales que sugieren una forma aceptable de proceder al rompimiento.
- *Tren Automático*: corresponde a un sistema férreo de larga distancia completamente autónomo, el cual tiene la misión de transportar el mineral hacia el puerto. Estos trenes comenzaron a funcionar de forma autónoma a comienzos del 2017 y se espera que a finales del 2018 esta tecnología abarque un 65% de toda la línea férrea de Rio Tinto (Rio Tinto 2018). En Chile, también podemos encontrar trenes autónomos en la división el Teniente.
- *Entrega del producto*: Carga remota de barcos asistida por indicadores recibidos en tiempo real que reportan la forma en que este va asimilando la carga.

Estos equipos autónomos han demostrado ser ampliamente eficientes. A continuación, en la tabla 21, se señalan los beneficios que le han otorgado a Rio Tinto[20].

[19] Son camiones automatizados que poseen computadores que informan sobre la ubicación de otros vehículos y les permiten comunicarse con el sistema computacional central. Están equipados con radares, láser, antenas de comunicación y GPS de gran precisión.

[20] Su política de automatización ha sido tan eficiente que en Diciembre del 2017 comunicaron que expandirán su flota de camiones autónomos en Pilbara en más de un 50% para el año 2019 (Rio Tinto 2017a).

Tabla 21: Tecnologías productivas y sus beneficios prácticos (Rio Tinto)

Tecnología	Áreas Beneficiadas	Beneficios Prácticos
Perforación y Tronadura	Seguridad	Al remover a los trabajadores de áreas peligrosas se han disminuido los accidentes y los problemas de salud asociados al polvo, al ruido y a las vibraciones. Los sistemas autónomos no han experimentado ningún daño físico desde que comenzaron sus operaciones.
	Eficiencia de maquinaria	Aumenta la utilización efectiva de los perforadores en aproximadamente un 15% en relación a los manuales.
		Resultados más consistentes y predecibles debido a la precisión. Disminuye la necesidad de volver a perforar, lo que reduce el uso de recursos, como las brocas y explosivos.
	Residuos	Recuperación más efectiva de los yacimientos al reducir la cantidad de residuos generados en este proceso.
	Capital humano	Grupos de trabajo más pequeños, más cualificados y más productivos que operan varios perforadores de forma simultánea desde una ubicación remota. Nuevos puestos de trabajo creados en ingeniería de sistemas, comunicaciones y análisis de datos.
Camiones Autónomos	Seguridad	No ha habido incidentes significativos en las operaciones de estos camiones. Los problemas asociados al daño de la maquinaria también se han reducido.
	Medio ambiente	Se ha reducido el consumo de combustible en un 13%.
	Eficiencia de maquinaria	Tienen un 40% más de utilización efectiva que los camiones manuales, lo cual ha reducido considerablemente los costos. Los camiones autónomos operan por periodos más largos, dado que están libres de pausas, ausencias y cambios de turnos.
		En el año 2016 cada camión autónomo operó 1000 horas adicionales y redujeron los costos en un 15%, principalmente debido progresos en las tasas de utilización, equipos más precisos, reducción de costos de mantenimiento y vidas útiles más extensas.

		La información obtenida a través del uso de camiones autónomos ha mejorado el rendimiento de los camiones manuales. Esto debido principalmente a la competencia que se genera entre ambos sistemas para alcanzar mayores rendimientos. Además, ha permitido mejorar el diseño de las minas.
Martillos Remotos	Seguridad	Al relocalizar a los operadores en centros de operación remotos, pueden llevar a cabo su trabajo en un ambiente más seguro y limpio.
	Eficiencia	Los trabajadores pueden operar más de un martillo de forma simultánea.
		Reducción de inactividad de la maquinaria provocada por atrasos de operadores.
	Calidad de vida	Menos trabajadores que deben viajar a lugares remotos para trabajar.
Tren Automático	Seguridad	El sistema automático de detección instalado en los cruces de la línea férrea ha reducido los riesgos de seguridad al aumentar las respuestas automáticas para proteger la maquinaria, restringir la velocidad y activar alarmas.
	Eficiencia	Entrega flexibilidad en la programación. Aumenta la velocidad, lo que reduce el tiempo promedio del ciclo. Además, al eliminar los cambios de turnos de los conductores, el tren puede operar de forma continua, reduciendo también los tiempos de viaje.
	Calidad de vida	Se elimina la necesidad de recorrer 70.000 kilómetros en áreas remotas cada semana para que los conductores del tren puedan comenzar o terminar sus turnos.
Entrega del producto: Carga Remota	Seguridad	Monitorea el calado aéreo y las grúas para administrar el espacio del puerto y así evitar choques entre los barcos. También monitorea la inclinación, para que los operadores de las grúas puedan evitar riesgos al realizar la carga.
	Eficiencia	Esta plataforma entrega información en tiempo real sobre la posición del barco—antes, durante y después del proceso de carga. Esto permite a los operadores de las grúas aumentar la eficiencia durante situaciones de visibilidad limitada.

Fuente: Elaboración propia a partir de información obtenida de Rio Tinto (2017a); Matysek & Fisher (2016); Rio Tinto (2018).

2. Automatización de sistemas:

Dado el éxito que Rio Tinto ha tenido en la automatización de equipos, su interés se ha volcado ahora hacia la automatización de un sistema capaz de funcionar con un mínimo de control externo. El objetivo es lograr, a través del análisis de grandes volúmenes de datos, la constitución de un sistema totalmente interconectado desde la mina al puerto.

A través del desarrollo de las iniciativas que se enumeran a continuación, Rio Tinto ha ido reportando sus primeros avances, esperando continuar por la misma vía:

- *Centros de operaciones y tecnologías facilitadoras:* Diseño de un centro ubicado en Perth, Australia, que controla y monitorea todas las operaciones (lo que incluye 15 minas, 1.700 kms. de línea férrea, cuatro terminales portuarios y plantas generadoras de energía) en base a información reportada en tiempo real desde una central unificada. Este se encuentra en uso desde 2009-2010. El conectar información en tiempo real a un centro de operación integrado, no solo posibilita una respuesta inmediata a los eventos que ocurren en la mina, sino que promueve un proceso de toma de decisiones mucho más sofisticado, que puede optimizar operaciones a través de toda la cadena de valor.
- *Mine of the Future™:* Proyecto que concentra todos los esfuerzos para automatizar cada aspecto de un sistema integrado desde una ubicación remota. Surge de un largo proceso de colaboración entre Rio Tinto, centros de investigación de todo el mundo y empresas proveedoras, y busca tanto generar una visión holística de las operaciones, como proveer información en tiempo real para mejorar la toma de decisiones.

CODELCO también ha implementado este tipo de tecnologías en sus operaciones. En la División El Teniente existe un Centro Integrado de Operaciones (CIO), que permite monitorear procesos, manejar equipos de forma remota y tomar decisiones integradas, gracias a la información en tiempo real que se obtiene de todos los procesos mineros (CODELCO 2010). Acá se intenta tener las salas de control unidas, desde la mina a la tostación, donde analistas estudian los datos para ir tomando decisiones de forma adecuada en temas de producción, geotermia, metalurgia, etc. Más recientemente, la División Ministro Hales también ha incorporado un centro integrado de operaciones con excelentes resultados.

3. Drones:

Estos aparatos están siendo cada vez más utilizados en la minería. Los drones pueden recopilar imágenes oportunas de geo referencia que son rápidamente transformadas en una imagen 3D precisa del sitio. Se puede usar esto para calcular volúmenes, monitorear sondajes, optimizar el manejo del tráfico, diseñar carreteras, etc.

Rio Tinto los emplea para llevar a cabo diversas tareas, que van desde realizar sondajes en terreno hasta monitorear sitios de nidos de tortugas cercanos a las operaciones portuarias de la empresa (Rio Tinto 2017c). En particular, en la mina Kennecott's Bingham Canyon de esta empresa, existe un trabajador encargado especialmente de supervisar la faena a través de drones, los que entregan mapas 3D en tiempo real en espacios donde los trabajadores no pueden acceder. Igualmente, permiten inspeccionar la maquinaria y supervisan que no haya trizaduras o movimientos en las paredes de la mina para asegurar la seguridad de los trabajadores (Rio Tinto 2017b).

- **Tecnologías de información**

Este tipo de tecnología corresponde al uso de computadores y equipos de telecomunicación para almacenar, recuperar, transmitir y manipular datos o información. La nueva era tecnológica está cambiando la forma de hacer negocios y producir en todo el mundo. En particular, "gran parte de la creación de valor en la minería dejará de estar basada en la eficiencia de las operaciones para mover el material y pasará a estar enfocada a qué tan bien las empresas recolectan, analizan y reaccionan a la información para transportar el material de forma más eficiente" (Durrant-Whyte et al. 2015).

Al igual que en el caso de las tecnologías productivas, la digitalización de los procesos también ha sido difícil de adoptar para la industria minera. Este proceso de cambio tecnológico está ocurriendo de forma dispareja a través de la economía y las empresas dedicadas a la extracción de recursos naturales tienden a ser las más rezagadas. En un estudio realizado para ver el estado de digitalización en Estados Unidos, el Industry Digitization Index, las mineras resultaron ser de las últimas en el ranking de las empresas (McKinsey 2015). Esta es una tendencia que ha empezado a cambiar en algunos países, a pesar de su lentitud respecto a otras industrias.

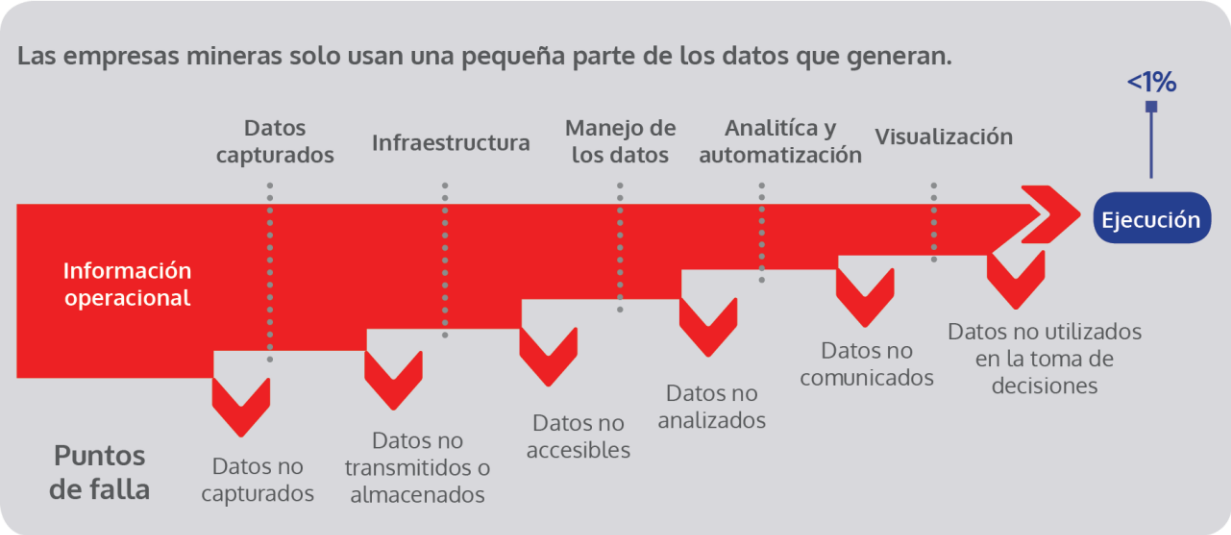
Estudios han demostrado que las empresas más digitalizadas consiguen un crecimiento de sus ingresos más acelerado y mayores niveles de productividad e innovación; sus utilidades pueden aumentar hasta tres veces más rápido, y sus trabajadores pueden beneficiarse de aumentos de sueldos que incrementan al doble de la velocidad que las otras empresas (McKinsey 2017).

Las empresas mineras producen gran cantidad de datos, sin embargo, menos del 1% de esta información es usada en el proceso productivo para desarrollar predicciones y estrategias (figura 6) (Durrant-Whyte et al. 2015). Hacer uso de esta información para estimar la probabilidad de fracaso, en vez de usar una estrategia basada en el tiempo de uso, ayuda a reducir los costos de mantención y prevenir interrupciones que podrían ser muy costosas.

Las empresas mineras producen gran cantidad de datos, sin embargo, menos del 1% de esta información es usada en el proceso productivo para desarrollar predicciones y estrategias.

A lo largo del proceso existen diversas fallas que provocan esta ineficiencia (figura 6). En primer lugar, ya sea por maquinaria defectuosa, problemas técnicos, etc., existe una cantidad de datos que no serán capturados. Posteriormente, de toda la información producida por la amplia variedad de equipos, existe una parte que no será transmitida o almacenada de forma correcta. Una vez que ya se tiene una base de datos almacenada, la empresa se va a encontrar con información que no será accesible, ya sea por su baja calidad (datos ruidosos, sucios, valores inexactos, incompletos o incorrectos, inadecuado tamaño de las bases de datos, etc.) o simplemente por el difícil acceso a las bases de datos. A continuación, de todos los datos generados y que son efectivamente accesibles, existirá un porcentaje que no será considerado por los analistas. Esto puede ser porque los algoritmos no son capaces de extraer de forma efectiva la información de las inmensas bases de datos o simplemente porque no son consideradas importantes por los analistas de datos. Una vez obtenido un análisis de la información obtenida, muchas veces estos resultados se pierden al no haber sido comunicado de forma efectiva. Esto se debe principalmente a problemas de coordinación internos o a que los diferentes departamentos pueden tener intereses muy diversos y no consideran importante información que para otros puede ser vital. Finalmente, la información correctamente analizada y comunicada, muchas veces no es usada por los tomadores de decisiones, ya sea porque no la consideran relevante o porque no la entienden, dejando finalmente un 1% de información efectiva que es utilizada para la toma de decisiones dentro de las empresas mineras.

Figura 6: Datos utilizados por las empresas mineras



Fuente: Durrant-Whyte et al., 2015. How Digital Innovation can Improve Mining Productivity.

En Chile, las empresas mineras siguen una conducta similar. Una de las mayores desventajas que tenemos respecto a las faenas internacionales, a diferencia de lo que muchos pensarían, no es la falta de tecnología, sino que su uso (CNP 2017). Esto ocurre principalmente en la utilización de datos para generar sistemas de información, lo cual es esencial en el desarrollo de políticas preventivas.

Por este motivo, es clave analizar las tecnologías de información relevantes en el rubro minero. A continuación, explicaremos cada una de estas innovaciones tecnológicas.

Tecnologías de Información

Fuente: Elaboración propia

1. Big Data:

Se refiere principalmente al uso de grandes bases de datos para ser usados en análisis predictivo, mejorar la precisión en los procesos, la eficiencia operacional y la toma de decisiones, y reducir costos y riesgos. Debido a los avances en computación y los métodos para recopilar datos, el uso de *Big Data* ha aumentado exponencialmente en los últimos años en varios sectores económicos.

El volumen de información que produce la minería crece cada día más, gracias a una mejora de la eficiencia de los sensores. Esto ha permitido que el análisis se transforme en una oportunidad clave para prevenir fallas y reducir los mantenimientos y otras causas de retraso en las operaciones.

Uno de los beneficios de la información en tiempo real es que nos permite conocer el estado y ubicación de cada maquinaria en cada momento. Por ejemplo, una gran minera en Estados Unidos usó una estrategia para el mantenimiento de sus camiones, utilizando datos que habían sido previamente recopilados, pero no usados. Se empleó un algoritmo que permitió identificar de forma más certera la causa de las fallas de los equipos. La empresa identificó que algunos camiones estaba experimentando más fallas técnicas que otros, y que eran usados en una zona con carreteras muy complejas. En consecuencia, pudieron mejorar las carreteras de forma rápida y eficiente y así eliminar la causa de la falla (Durrant-Whyte et al. 2015).

El *Big Data* está estrechamente relacionado con la tecnología productiva, ya que los sistemas de automatización necesitan almacenamiento, análisis y utilización de *Big Data* para trabajar de forma eficiente. Primero, la maquinaria autónoma produce un flujo de información en tiempo real que establece una base para mejores análisis predictivos. Por esto, la automatización será siempre más eficiente si se complementa con sistemas y herramientas de información. Segundo, estas decisiones serán reportadas a máquinas autónomas. El valor real de este mecanismo se asocia al aprendizaje que se puede generar, ya que al haber una constante grabación de las decisiones y acciones tomadas, junto con la utilización de máquinas que usan algoritmos de aprendizaje, implica que están continuamente siendo perfeccionadas para mejorar con cada iteración.

El *Big Data* es una tecnología revolucionaria, ya que transforma el cómo se organizan las empresas, cómo deciden qué tecnologías usar y cómo construyen ecosistemas con sus socios, distribuidores y proveedores. Puede ser usado en todas las etapas del proceso productivo minero, aportando gran valor a la industria a través de los siguientes aspectos (figura 7) (Digitalist Magazine 2017):

- *Eficiencia*: Los sistemas autónomos funcionan de forma mucho más eficiente el usar *Big Data*. Este permite optimizar los procesos y prevenir situaciones costosas para la empresa.

- *Logística*: El transporte es fundamental para la minería, por lo que su automatización trae grandes beneficios. El *Big Data* ayuda a identificar áreas de ineficiencia y de mejoramiento.

- *Colaboración Inteligente*: Una sola fuente de datos a lo largo de la organización mejora la colaboración entre los departamentos. Se construyen modelos colaborativos con los proveedores de maquinarias, proveedores de servicios y operadores para monitorear a través de *cloud computing* o redes internas.

- *Inteligencia de negocios*: permite identificar las áreas que acarrean mayores costos, permitiendo tomar decisiones de forma más rápida y mejorar el desempeño.

- *Seguridad*: *Big Data* proporciona información en tiempo real de los operadores (ubicación, ritmo cardiaco, temperatura, etc.), del medioambiente (concentración de gases, monóxido de carbono, polvo, velocidad del viento, etc.) y de las maquinarias (potencia, presión, velocidad, etc.). Todos estos datos permiten identificar potenciales riesgos y actuar de forma preventiva.

- *Adquisiciones inteligentes*: El *Big Data* facilita el manejo y el monitoreo de las necesidades actuales y futuras de la maquinaria, accesorios y repuestos, optimizando el inventario de la empresa.

Figura 7: Beneficios del *Big Data* en la industria minera

Fuente: Elaboración propia a partir de información obtenida en Digitalist Magazine (2017)

2. Internet of Things (IoT):

El Internet of Things (Internet de las Cosas), corresponde a la interconexión de aparatos físicos, vehículos, electrodomésticos y otros productos electrónicos, software y sensores a través de internet, lo que permite que se conecten e intercambien datos. El objetivo es que todos los dispositivos se comuniquen entre sí, y por lo tanto, trabajen de forma interconectada y sean más eficientes. Esta forma de interactuar puede provocar grandes cambios en términos económicos y sociales, ya que permite que los computadores interactúen con objetos de la vida real y se vuelvan más independientes de los seres humanos, permitiendo que nos preocupemos solo de lo que es realmente importante y le deleguemos el resto a las máquinas.

Esta emergente tecnología puede cambiar definitivamente la forma que conocemos la minería, al crear nuevas formas para mantener la seguridad al interior de la mina y mejorar la productividad. Esto implica conectar maquinarias, flotas y personas en base a identificación por radiofrecuencia y sensores. Gracias a esta tecnología, en una mina moderna donde prácticamente todos los aparatos están interconectados y constantemente generando datos, se obtiene información valiosa para la toma de decisiones y predicciones, como la presión del agua, temperatura y concentración de gases, entre otros (Mining.com 2017). Esto puede ser muy beneficioso, ya que facilitaría la automatización del mantenimiento, la operación de la maquinaria, la estandarización de procesos, el mejoramiento de la trazabilidad y visibilidad, la seguridad de los trabajadores y de los equipos, el moverse de un mantenimiento preventivo a uno predictivo y mejorar el análisis.

3. Tecnología de Visualización 3D:

La tecnología de visualización 3D permite navegar virtualmente a través de una mina. Una empresa minera puede usar animación 3D para diversos propósitos, como mostrar sus planes de expansión a través de una representación exacta del proyecto para explicar futuros planes a comunidades aledañas o gobiernos; visualizar planes futuros; capacitar a los operarios en un ambiente seguro que permite visualizar la maquinaria y las condiciones en las que trabajarán y para mostrar recursos minerales subterráneos que serían imposibles de mostrar sin esta tecnología.

Dado que para personas sin conocimientos técnicos es casi imposible leer e interpretar datos e información compleja referente a geología o minería, la visualización 3D permite que una audiencia sin conocimientos en el área pueda comprender proyectos de ingeniería complejos. Adicionalmente, esta herramienta es útil para profesionales de la minería, ya que les permite visualizar una mina en gráficas 3D realistas, poder explorarla gracias a la realidad virtual y analizar la información a través de la realidad aumentada sin tener que buscar y analizar enormes bases de datos (Mining Technology 2018a).

Si complementamos esta tecnología con la información en tiempo real que se genera durante las operaciones, permitiría al usuario navegar mientras ocurre la producción, abriendo nuevas oportunidades para la planificación minera, logística, capacitaciones y el comprometer a los accionistas.

Un ejemplo de estos software es el *LongWall 3D Visualizer*, un sistema gráfico 3D que permite navegar de forma virtual en las minas subterráneas mientras se realiza la producción. Este programa utiliza datos de las maquinarias para mostrar sus operaciones en tiempo real. El personal y los ejecutivos tienen acceso remoto a las operaciones a través de aparatos móviles, permitiendo el monitoreo del sistema productivo en todo momento (Komatsu 2018).

4. Redes Sociales:

Las redes sociales se han transformado en una herramienta de comunicación, tanto a nivel individual como a nivel colectivo. Muchas empresas han usado las redes sociales para mantener una comunicación constante con sus trabajadores y con las comunidades.

En la minería existe una oportunidad subutilizada de las redes sociales y las comunicaciones, las que podrían ser empleadas para aumentar la transparencia, reducir la carga regulatoria del gobierno y mejorar la relación y confianza con las comunidades. A través de estas plataformas, se puede mantener una comunicación fluida con las partes interesadas y así actualizarlos de los eventos y las decisiones que se tomen dentro de la compañía. Por otro lado, las empresas pueden tener un mejor entendimiento de lo que preocupa a las comunidades, pudiendo así cambiar sus procesos operacionales y llegar a consensos con la comunidad. Para entender el amplio impacto que esto podría tener se requieren herramientas apropiadas, como el análisis de datos, para desarrollar índices de progreso social y comunicarlos a través de varios mecanismos, que pueden ir desde reportes de sustentabilidad, hasta videos informales publicados en las redes sociales (Robert Spence 2015).

Estos métodos de comunicación también son muy efectivos al ser utilizados de forma interna para mantener un diálogo constante con trabajadores de la empresa y desarrollar capacitaciones, sobre todo cuando la interacción cara a cara es imposible (Deloitte 2013).

5. Teléfonos y aparatos móviles:

Los Smartphones, tablets y otros aparatos móviles están reemplazando a los computadores. En el año 2016, la cantidad de páginas web accedidas a través de teléfonos móviles superó a las entradas vía computadores por primera vez (The Telegraph 2016).

El término móvil quiere decir que es libre para moverse, característica cada vez más valorada en muchos sectores productivos, incluyendo la minería. Esta capacidad de hacer las operaciones "móviles", impacta a las empre-

sas en temas que van desde cómo involucrar a los clientes, hasta equipar a los trabajadores con herramientas que les permitan hacer su trabajo de forma más eficiente.

Ya existen aplicaciones en el mercado diseñados especialmente para la industria minera. Un ejemplo claro es *MiApps*, que posee varias aplicaciones para monitorear distintas partes del proceso productivo (MiPlan 2018). Una de ellas, *MiDrill*, permite hacer un seguimiento a todos los taladros presentes en la faena. También se puede monitorear a los explosivos a través de la aplicación *MiBlast*, que permite una medición precisa del proceso para mejorar su rendimiento. Por otro lado, *MiHaul* simplifica el monitoreo del movimiento de las flotas de camiones y entrega una perspectiva de costo-eficiencia para analizar y optimizar las rutas en tiempo real.

Otro ejemplo relevante es *FIFO RnR*, una aplicación que funciona como un calendario, diseñado especialmente para los mineros que trabajan en minas remotas, a quienes sus turnos de trabajo los mantienen alejados de sus hogares por varias semanas (Mining Technology 2014). Esta aplicación es muy usada en Australia, donde muchas faenas se encuentran aisladas. *FIFO* permite a los mineros compartir sus itinerarios con familia y amigos para facilitar los reencuentros y organización de eventos, mejorando su calidad de vida.

Para el sector minero, incluir la tecnología móvil ha sido más complejo que para una industria tradicional, ya que existen varios factores que pueden limitar el correcto funcionamiento de estos aparatos. La profundidad a la que se encuentran muchos yacimientos, o su ubicación remota, puede interferir en la señal. Sin embargo, una mina es un entorno que experimenta un cambio constante en cuanto a su geografía y sus construcciones, por lo que un sistema móvil podría adaptarse mucho mejor a estas transformaciones que una plataforma digital fija (Mining.com 2016).

Las empresas mineras han estado adaptando estas tecnologías a sus necesidades, pero dadas las dificultades asociadas ha sido un proceso lento y poco masificado dentro del sector. El uso de computadores móviles ya está siendo ampliamente usado dentro de las minas, pero se espera que a futuro cada vehículo posea un aparato móvil y pueda producir datos desde cualquier sitio (Funk 2016).

6. Cloud Computing:

Las nubes se han convertido en una herramienta básica dentro de nuestra sociedad. El uso de programas como Dropbox o Google Drive se ha introducido en las vidas de los trabajadores a tal punto que son imprescindibles en muchas empresas. Parece bastante obvio el porqué estas soluciones se han vuelto tan populares: las nubes previenen duplicación de errores y otros problemas asociados al procesamiento de datos y permiten que los equipos de trabajo se comuniquen y colaboren de forma mucho más simple.

Esta tecnología puede ser muy beneficiosa para la minería. Una empresa puede mantener todas sus faenas conectadas—incluso encontrándose en diferentes países—al mismo sistema integrado. Las minas pueden subir su información a la nube y generar reportes de forma directa en el sistema interconectado online y también revisar lo subido por otras plantas. Se pueden incluso crear protocolos para administrar el funcionamiento global de la empresa, donde un sensor ubicado en un país pueda actualizar el sistema de la nube que estimule una orden en una planta ubicada en el otro lado del mundo.

Además, a medida que la empresa va creciendo, el costo adicional de aumentar el tamaño de la nube no es tan grande comparado con lo que sería comprar computadores y discos duros para almacenar toda la información que se va generando, donde además se necesitaría más espacio, energía, personal y seguridad.

El único inconveniente es que necesita una buena conexión a internet, lo cual puede ser un problema en faenas aisladas. A pesar de que muchas empresas reconocen la importancia de la conectividad, esto puede ser un gran desafío, sobre todo para las minas más antiguas que poseen tecnología más arcaica.

- **Seguridad Operacional**

El entorno en el cual trabajan los mineros tiende a ser sucio, ruidoso y algunas veces confinado o en ubicaciones remotas. En cualquier faena existen riesgos producidos por gases, polvo, químicos, ruido, trabajar bajo temperaturas extremas o también factores individuales como el cansancio, aburrimiento o falta de concentración.

En las minas a rajo abierto, los derrumbes o caídas de rocas pueden ser mortales para el personal. Además, en grandes faenas, los operadores interactúan con maquinaria muy grande y pesada que está en constante movimiento, lo cual puede ser muy peligroso ante cualquier falla. Otros problemas comunes se deben a: diseños irregulares de las carreteras, visibilidad limitada o puntos ciegos en el uso de grandes vehículos y la velocidad de los aparatos en movimiento.

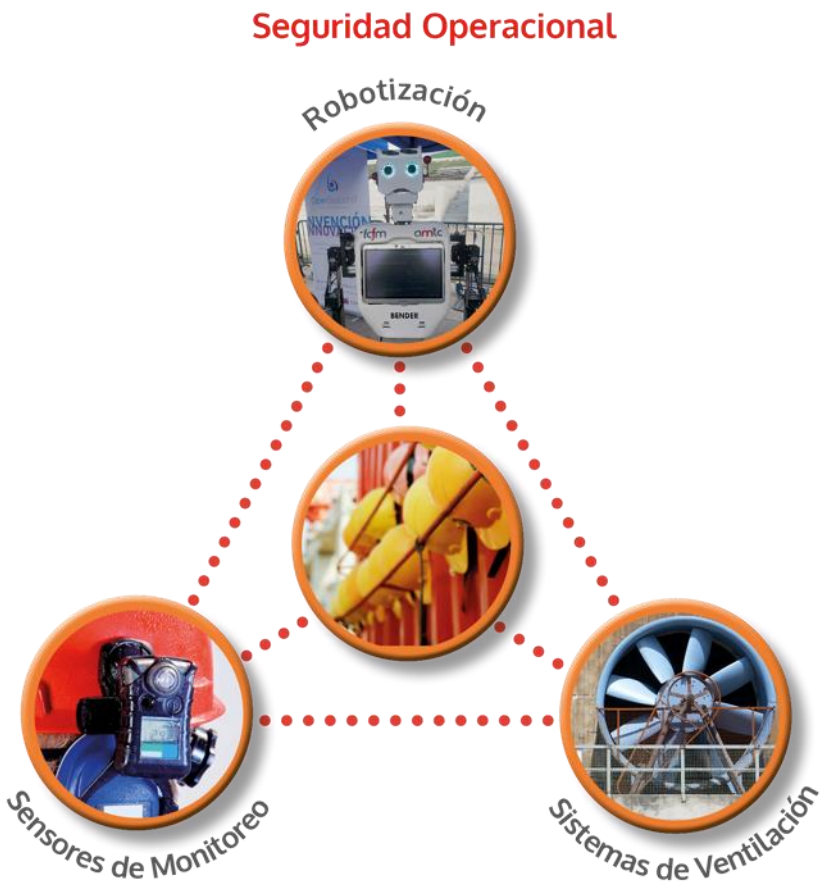
En las minas subterráneas son otros los tipos de riesgos, los trabajadores pueden sufrir accidentes debido a fallas en los pilares de contención, caídas de techos o paredes, explosiones, incendio, inundaciones, estallido de roca, etc. Además, el uso de maquinaria pesada en espacios reducidos puede llegar a ser un peligro.

En Chile, el sector minero tiene una de las menores tasas de accidentalidad. Además, comparado con mineras internacionales, las tasas de accidentes por millón de horas trabajadas son semejantes (CNP 2017). Sin embargo, según la Superintendencia de Seguridad Social, el sector minero presenta la tasa de mortalidad por accidentes más alta para el periodo 2011-2015, con 21.6 fallecimientos por cada 100.000 trabajadores protegidos. En la tabla 22 se muestra la brecha que hay entre Chile y los países referentes, donde Chile tiene 21,6, Estados Unidos 9,8 y Australia 2,7 fatalidades por cada 100.000 trabajadores.

Tabla 22: Tasa de fatalidad para Chile, EE.UU. y Australia

	Chile	EE.UU.	Australia
Tasa de Fatalidad	21,6	9,8	2,7

Fuente: Elaboración propia en base a datos de la Comisión Nacional de Productividad (2017); Centers for Disease Control and Prevention (2015); y Safe Work Australia (2018).



Fuente: Elaboración propia

1. Robotización:

La minería será cada vez más profunda y subterránea, por lo que la seguridad de los trabajadores será cada vez más relevante. Lo que pasó en el 2010 con "los 33" es una clara señal de los riegos que enfrentan los trabajadores en algunos tipos de faenas. Esto ha incentivado la innovación y desarrollo de robots que puedan reemplazar a los humanos para llevar a cabo las tareas peligrosas. Gracias a esto, los operadores pueden manejar la maquinaria desde lugares más seguros, a través de imágenes y vídeos en tiempo real que generan los mismos artefactos autónomos.

La empresa Anglo American, con su iniciativa *FutureSmart*, ha impulsado importantes avances en robótica. Actualmente, están testeando robots que son capaces de detectar grietas detrás de las rocas. Por otro lado, envían vehículos (en vez de trabajadores) a túneles muy profundos para registrar desniveles, formaciones de rocas y fallas, reduciendo de forma significativa los riesgos de seguridad, a la vez que se ahorra una gran cantidad de tiempo y energía (Robert Spence 2015).

2. Sensores de Monitoreo:

Los sensores de monitoreo pueden detectar y reportar datos sobre la seguridad de forma instantánea, tal como el estado de la maquinaria, la salud y seguridad de trabajadores, la calidad de aire de la mina, geolocalización de los activos y detección de la estabilización de los suelos (Mining Magazine 2018). Gracias a esto, se podría percibir la ubicación exacta de un trabajador y su temperatura corporal a través de un *Smartphone*, pudiendo predecir y evitar accidentes y problemas de salud. Este es un ejemplo donde el IoT permite recolectar y compartir datos para proteger la vida de los operadores.

3. Sistemas de Ventilación Complejos:

Debido a que los yacimientos superficiales ya han sido explotados, los mineros deben aventurarse cada vez más profundo para poder extraer el mineral. Existen minas que se encuentran a grandes distancias bajo tierra, y por consecuente, alcanzan temperaturas de hasta 42°C. En el caso de estar cerca de fuentes geotérmicas esta situación podría ser incluso más compleja, debido a un aumento en la temperatura del agua que se filtra. Las elevadas temperaturas pueden causar problemas en la salud de los trabajadores, como taquicardias, agotamientos, calambres, sudoración, cefaleas, desorientación y aceleración de los latidos. Esto podría llegar incluso a provocar golpes de calor, manifestándose con convulsiones, vómitos, delirios y desmayos (HSEC Magazine 2016).

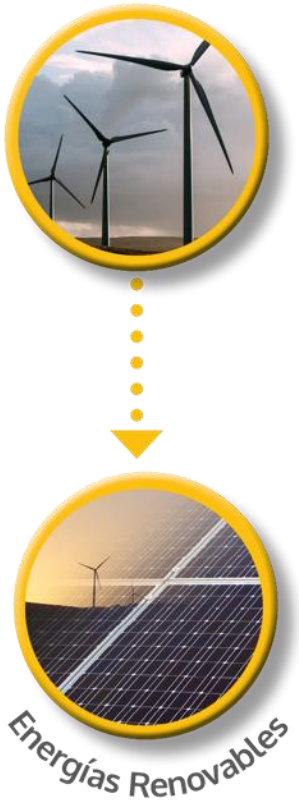
Esto se ha transformado en un desafío importante para la minería, ya que estas condiciones serán cada vez más comunes. Esto significa llevar a cabo proyectos de ingeniería tremendos para crear un ambiente de trabajo adecuado para los trabajadores, lo que incluye diseñar complejos sistemas de ventilación que permitan que la temperatura se mantenga a un nivel que permita que la gente trabaje de forma cómoda y segura.

- **Eficiencia Energética**

La minería es un sector muy intensivo en uso de energía. En consecuencia, impulsar proyectos de eficiencia energética es clave para disminuir costos y aumentar la productividad del sector. Además, el tratado de París ha comprometido a Chile a disminuir sus emisiones de carbono y la minería es un sector que tiene que poner especial énfasis en este tema.

Existen diferentes iniciativas que puede usar la minería para reducir su consumo energético y reducir costos. Tecnologías mencionadas previamente, como los sensores, los equipos autónomos y el *Big Data* son de gran ayuda a la hora de mejorar la eficiencia energética. Sin embargo, dada la urgencia del tema, lo que genera mayores impactos es la utilización de energías renovables.

Eficiencia Energética



Fuente: Elaboración propia

1. Energías Renovables no Convencionales (ERNC):

Las ERNC han aumentado su participación en la matriz energética global considerablemente en los últimos años. La energía solar ha experimentado caídas en sus costos de un 80%, mientras que la energía eólica de un 50% desde el año 2009 (McKinsey 2017).

En Chile, hemos experimentado algo similar, donde las ERNC han llegado a representar un 20,4% de la capacidad instalada (equivalente a 5.095 MW). Es más, los avances tecnológicos seguirán bajando los costos de almacenamiento de estos tipos de energía, haciéndolas más competitivas y aumentando su participación en la matriz energética. En la tabla 23 se aprecia la capacidad instalada de energía solar fotovoltaica y energía eólica (medida en MW) en Chile entre el año 2008 y el 2018. Se puede apreciar el fuerte incremento de estos tipos de energía, los cuales llegan a ocupar el 12% de la matriz nacional energética (Comisión Nacional de Energía (CNE) 2018).

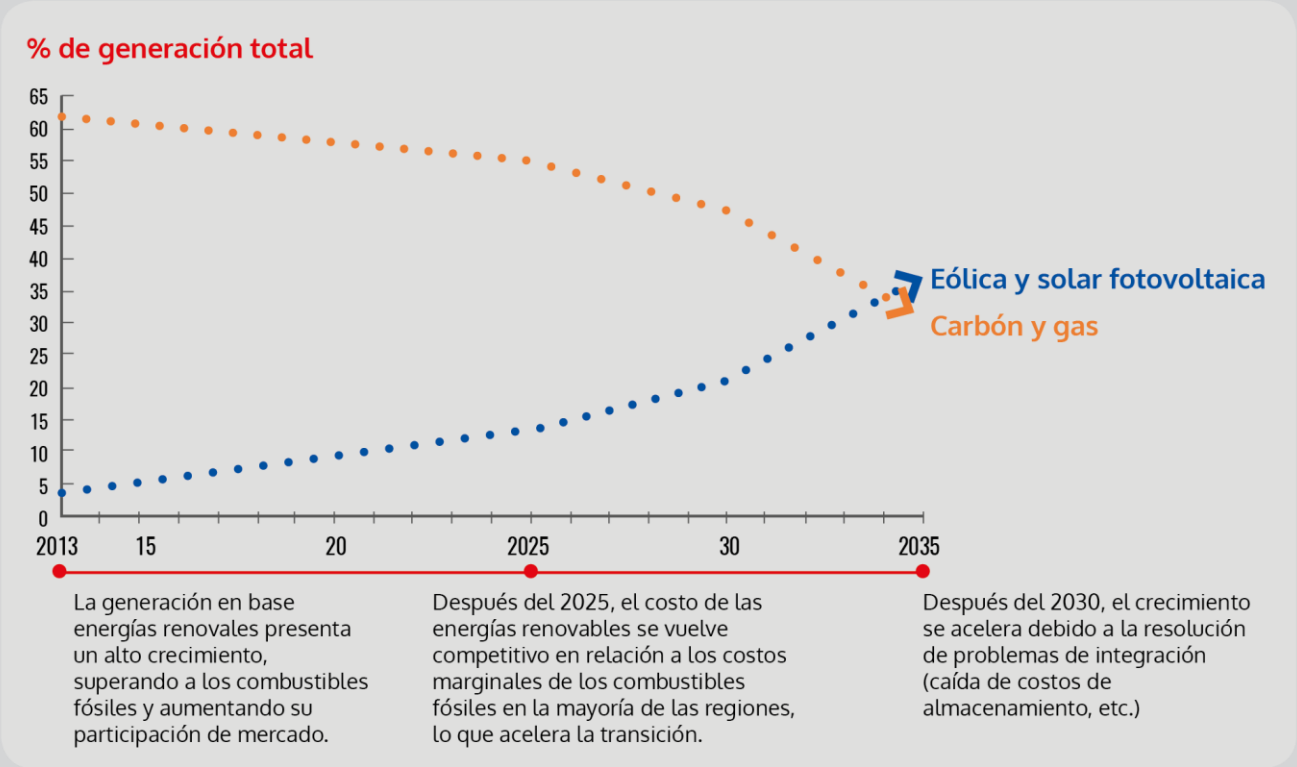
Por otro lado, ha habido una caída importante de los precios de energía en licitaciones recientes. En el 2017 se llegó a un precio promedio record de 32,5 USD/MWh (CNE 2017).

Tabla 23: Capacidad instalada de energía solar y eólica en Chile (2012-2018)

	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
Energía solar (MW)	0	0	0	0	3	10	221	576	1.119	1.748	2.358
Energía eólica (MW)	20	86	181	201	201	298	735	908	1.035	1.295	1.609

Fuente: Elaboración propia en base a datos de CNE (2018)

Figura 8: Matriz energética global (% del total de la generación energética)



Fuente: Elaboración propia. Adaptado de McKinsey (2017)

Según un estudio de McKinsey (figura 8), los costos de las ERNC podrían alcanzar un punto de inflexión en el año 2025, aumentando ampliamente su penetración. Después del año 2025, las ERNC se volverían muy competitivas, incluso superando a los hidrocarburos en algunas regiones. Después del 2035 se estima que este crecimiento se acelerará aún más debido a la solución de problemas asociados al almacenamiento y otros factores técnicos.

El tratado de París es solo el comienzo de un sistema de regulación internacional que probablemente se irá volviendo cada vez más exigente. Por lo tanto, la transición a tecnologías más verdes ocurrirá de todas formas y mientras antes las empresas sean capaces de adaptarse y usar este cambio como una oportunidad en vez de percibirlo como una desventaja, más competitivas lograrán ser una vez que el cambio ya sea inevitable.

Además, la volatilidad en los precios de los combustibles fósiles afecta enormemente a la industria minera, la cual es intensiva en recursos energéticos y gran parte de sus costos están asociados al precio de la energía. Por esto, un sistema de producción energética basado en ERNC generaría una oferta estable e independiente de las alzas de los precios de los combustibles fósiles.

Asimismo, el gran espacio disponible que suelen tener los sitios mineros crea una oportunidad adicional para impulsar una mina conectada a un sistema propio de generación eléctrica. Estas minas autosuficientes en recursos energéticos pueden reducir sus emisiones de carbono hasta un 28% al usar un sistema interconectado que combine energía solar, almacenamiento a través de baterías y generadores diésel, lo cual no solo permitiría mejorar el rendimiento ambiental, sino que es una gran oportunidad para reducir costos y mejorar la calidad del suministro energético (Energy and Mines 2017). Este desafío es aún más relevante para un país como Chile, donde la ubicación de los recursos solares y mineros coincide en el norte del país, permitiendo generar sinergias importantes entre ambos sectores (Palma 2018).

En Chile ya se está trabajando para fomentar el desarrollo de estas energías. La CORFO creó el Comité de Desarrollo de la Industria de Energía Sola (Comité Solar) con la finalidad de impulsar la industria solar en el país, aprovechando así las ventajas comparativas que tenemos en el norte. Este comité ha destacado la urgente necesidad de la industria minera en temas energéticos, identificándola como una poderosa aliada para la búsqueda de soluciones energéticas innovadoras.

Por otro lado, ya existe un proyecto CORFO que busca producir hidrógeno en base a energía solar para alimentar los camiones de la industria minera. Este proceso consiste en generar combustible a través de la separación del agua con el oxígeno, el que puede ser usado en una gran variedad de maquinarias, como los camiones, y así bajar el nivel de emisiones de carbono. Este proyecto cuenta con un financiamiento de $13.800 millones y ha sido adjudicado por CODELCO, BHP, Anglo American, Engie, Collahuasi y Siemens.

En el extranjero, empresas como Rio Tinto también están considerando involucrarse en temas de ERNC. Han definido un programa de cambio climático, que busca disminuir el consumo de energía y la proporción de carbón de su matriz energética. En una de sus operaciones en Australia, Rio Tinto usa panales fotovoltaicos con el fin de reducir el uso de combustibles fósiles. La planta, con una capacidad de 1.7 MW, será capaz de proveer un 20% de la electricidad diaria que necesita el pueblo aledaño, ahorrando 600.000 litros de diésel y reduciendo 1.600 toneladas de emisiones de carbono al año. Si se considera exitosa, será ampliada hasta alcanzar una reducción de 6.100 toneladas de carbono al año (Rio Tinto 2016).

En algunos casos, donde es difícil impulsar proyectos de forma autónoma, la empresa ha creado alianzas con otras compañías. Richards Bay Minerals[21] trabajó en colaboración con la consultora Ensight en 2013 para crear el Energy Leadership Programme, un programa enfocado en encontrar e implementar proyectos de eficiencia energética, el cual ha logrado realizar 24 proyectos durante su primera etapa (Ensight 2018).

[21] Richards Bay Minerals es una empresa minera ubicada en Sudáfrica, de la cual Rio Tinto posee un 74%.

- **Medio Ambiente y Comunidad**

El tema medioambiental está cada vez más presente en las políticas empresariales. La minería puede provocar degradación de ecosistemas acuáticos causados por la sedimentación, drenaje ácido y deposiciones de metales. Además, durante el proceso productivo se emite una gran cantidad de gases de efecto invernadero, dada su intensidad en consumo de energía y combustible. Es también un sector que usa mucha agua, que muchas veces es difícil de obtener debido a las condiciones geográficas (desierto, montañas, etc.).

Los impactos medioambientales que genera la minería son ampliamente conocidos por la población, lo que ha generado un cambio de perspectiva dentro de la industria, tanto en la forma en cómo operan y cómo es regulada. La relación con las comunidades ha cambiado, obligando a las empresas a tener una "licencia social para operar", por lo que tener una comunicación permanente y efectiva con las comunidades ha pasado a ser clave a la hora de desarrollar nuevos proyectos.

En la siguiente imagen se muestran los temas principales que se han podido detectar en informes de consultoras y mineras ubicadas en países con leyes y reglamentación medio ambiental mucho más exigentes y antiguas que las chilenas, por lo que puede ser un buen indicio para estimar cómo irá evolucionando este tema en los próximos años.

Medio Ambiente y Comunidad

Fuente: Elaboración propia.

1. Emisiones de Carbono:

Con el acuerdo de París, la mayoría de los países se comprometieron a impulsar políticas de reducción de gases de efecto invernadero que lograran alcanzar la meta de mantener el aumento promedio de la temperatura global por debajo de 2°C.

A raíz de esto, muchas empresas han comenzado a impulsar políticas de reducción de emisiones. Rio Tinto se ha comprometido a disminuir sus emisiones de forma intensiva y alcanzar una descarbonización substancial para el año 2050, para lo que ha construido parques eólicos y fotovoltaicos para cubrir su demanda energética. En particular, la empresa ha tomado este desafío como una oportunidad para impulsar la innovación, por lo que dentro de sus políticas de cambio climático el tema de investigación y desarrollo de nuevas tecnologías está ampliamente presente.

2. Relaves:

Uno de los aspectos más controversiales de la minería son los relaves. La minería no se acaba cuando se termina de extraer el mineral, sino que sus residuos siguen siendo parte de su cadena productiva y deben ser tratados con sumo cuidado.

Existen diversas formas en que podemos dar una utilidad y mejorar la condición de los relaves. En primer lugar, pueden transformarse en un activo importante, ya que poseen una gran cantidad de minerales que no fueron aprovechados en el momento en que se explotó y que hoy en día, dados los avances tecnológicos y los cambios que ha tenido el mercado de metales[22], podrían ser una gran fuente de ingresos (Townley 2018).

A pesar de esto, existen relaves que no podrán ser reutilizados y que deberán ser administrados eficientemente para evitar accidentes. El uso de sensores permite monitorear la estabilidad física y química de los depósitos de relaves. Esto ya está considerado en la hoja de ruta del Programa Alta Ley, con el objetivo de proporcionar información en tiempo real a las empresas mineras, las comunidades aledañas y la autoridad fiscalizadora (Alta Ley 2016). Para los relaves que están activos se utilizará un sistema de monitoreo en base al análisis de información. Para los relaves abandonados se usarán imágenes satelitales y un monitoreo participativo de las comunidades.

En el caso de Rio Tinto, la empresa se ha dedicado a monitorear la calidad del aire, el nivel del agua y evitar que aves y animales silvestres entren en los relaves por medio de grandes barreras, tanto naturales como construidas. Para esto, se usan paneles de control remoto con información en tiempo real.

[22] Existen minerales que antiguamente no eran económicamente rentables, pero que hoy en día son muy útiles.

Enfoque 2:
Programas colaborativos

Los países desarrollados se han percatado de lo importante que es la colaboración entre el sector privado y la industria para desarrollar nuevas tecnologías. Empresas líderes en innovación, como es el caso de Rio Tinto, han creado centros de investigación o colaboran directamente con universidades para desarrollar investigación en conjunto y así enfocar la innovación a las necesidades de la industria.

En países desarrollados la tendencia es trabajar colaborativamente entre el sector privado y las universidades, mientras que en América Latina se priorizan las alianzas con clientes, sin considerar a la academia.

1. Programas colaborativos en investigación y desarrollo

El rol de la universidad ha ido cambiando a través de la historia. Originalmente, las universidades eran instituciones dedicadas a la enseñanza, que luego adoptaron un sistema mixto entre docencia e investigación a medida que esto fue ganando importancia en la sociedad (Etzkowitz 2003). Por otro lado, la industria privada se ha transformado en un agente importante para la creación y utilización del conocimiento, por lo que las universidades deben cumplir y trabajar en conjunto con la industria para desarrollar tecnología productiva.

En países desarrollados la tendencia es trabajar colaborativamente entre el sector privado y las universidades (Borrel-Damian et al. 2015), mientras que en América Latina se priorizan las alianzas con clientes, sin considerar a la academia (Agosin et al. 2010).

La interacción entre el sector privado y las instituciones de educación superior, sobre todo a través de la creación de programas de doctorados en conjunto, puede ser considerado como una estrategia para las universidades, ya que les permite desarrollar una enseñanza interdisciplinaria, entregar soluciones innovadoras a problemas complejos respondiendo a las necesidades de la industria y formar profesionales altamente calificados para las empresas, a la vez que mejoran sus problemas de financiamiento.

Por el lado de la industria, es una estrategia muy conveniente, ya que les permite acceder a conocimiento científico y técnico esencial para enfrentar sus desafíos propios. Además, tienen la oportunidad de contar con profesionales capacitados especialmente para trabajar en su sector, mejorando la productividad y competitividad (Borrel-Damian et al. 2015).

Rio Tinto no se ha quedado atrás en este proceso y se ha dado cuenta que para llevar adelante procesos complejos de automatización y robotización de operaciones se requiere un conjunto importante de habilidades interdisciplinarias. Para conseguirlo, la empresa constituyó el *Rio Tinto Centre for Mine Automation* (RTCMA) en conjunto con la Universidad de Sydney, proyecto que desde 2007 ha entregado resultados satisfactorios.

A pesar de que en Chile existen centros de investigación que trabajan en colaboración con la industria, no existe una alianza estable y sólida que permitan realizar una labor de largo plazo, a diferencia de como ocurre en países mineros más desarrollados. En nuestro país, las empresas mineras tienden a contactar a los centros de investigación cuando necesitan que les resuelvan un problema puntual, pero no han sido capaces de desarrollar programa colaborativos con una inversión de riesgo que les permita a estos centros desarrollar I&D. Considerando que la industria minera maneja un horizonte de tiempo que fluctúa entre el mediano y largo plazo, es clave promover la creación de centros de investigación que tengan permanencia en el tiempo y que sean capaces de resolver los desafíos que la industria está experimentando en la actualidad de forma estable y continua.

Ni siquiera en momentos de crisis la industria minera ha sido capaz de colaborar.

2. Colaboración dentro de la misma industria

El sector minero es conocido por ser poco colaborativo, no solo con el sector público y la academia, sino que también con sus pares de la industria. En Chile la situación es bastante crítica, ya que el sector no ha sido capaz de colaborar ni siquiera en proyectos de beneficio mutuo. Un ejemplo de esto es lo que ocurre con las desaladoras, que desde hace más de 10 años instituciones como COCHILCO han recomendado que las empresas desarrollen un trabajo en conjunto y esto no ha ocurrido. Si las empresas construyeran una gran desaladora que pudiese ser usada por todas las faenas que operan en la zona en vez de cada una trabajar con la suya propia, podrían aprovechar economías de escala y así reducir costos y aumentar la productividad. Además, esto reduciría el impacto en el borde costero y podrían incluso ser capaces de suministrar a las comunidades aledañas.

Pero esta situación escapa del particular caso chileno. Ni siquiera en momentos de crisis la industria minera ha sido capaz de colaborar. En el año 2015 la minería provocó el mayor desastre ambiental de Brasil y el más grave provocado por esta industria a nivel mundial cuando el relave Fundão de la empresa Samarco (controlada por Vale y BHP Billliton) liberó 40 mil millones de litros de agua con sedimentos y sustancias tóxicas provenientes de una mina de hierro, contaminando el suministro de agua de cientos de miles de personas, diezmando la fauna local, contaminando el rio local y provocando un alud que destruyó varios pueblos, entre ellos el pueblo de Bento Rodriguez, donde más de 500 personas perdieron sus hogares y otras 19 fallecieron (The Guardian 2016). Ante esta catástrofe, la industria no manifestó su interés en generar grupos de trabajo colaborativo para financiar y desarrollar innovación que prevenga desastres similares en el futuro o planes de acciones para actuar de forma rápida y eficaz en caso de que algo así vuelva a ocurrir. En enero de este año, un relave de la misma empresa, Vale, provocó un desastre ambiental aún peor, provocando la muerte de más de 150 personas. Bajo estas circunstancias, el gobierno brasilero ha prohibido todas las represas agua arriba, el método menos costoso usado por la minería para deshacerse de sus desechos, y tendrán hasta Agosto del 2021 para finiquitar operaciones en los relaves existentes (Mining Journal 2019).

A pesar de que en países más desarrollados se ha llegado al consenso de que la industria minera necesita más colaboración, estos desastres ambientales no han sido capaces de generar la consciencia necesaria que sí ha ocurrido en otros sectores productivos. Un caso importante de destacar es lo que ocurrió en Estados Unidos con la empresa petrolera BP en la planta oceánica Deepwater Horizon, donde una explosión provocó el derrame de 4,2 millones de barriles de petróleo en el Golfo de México, catalogado como el peor derrame que ha ocurrido en la historia. Esta catástrofe impulsó a las grandes empresas del rubro a colaborar en la planificación de un sistema de repuesta rápida para capturar y contener el petróleo en el caso de que ocurriera un accidente similar en el mismo golfo. Poco tiempo después de ocurrido el desastre, Chevron, ConocoPhillips, ExxonMobil y Shell se comprometieron a participar con US$ 1 billón para financiar el costo inicial del proyecto con la intensión de formar una organización sin fines de lucro, llamada Marine Well Containment Company (MWCC), que estaría a cargo de desarrollar este proyecto. Hoy en día, el MWCC está conformado por 10 empresas; a las 4 fundadoras se le sumaron Anadarko, Apache, BHP Billiton, BP, Equinor y Hess (MWCC 2019)

Esta falta de colaboración trae grandes obstáculos para el desarrollo de la innovación. En países mineros desarrollados ya están empezando a preocuparse de este tema, donde han surgido iniciativas que buscan mejorar la cooperación entre las empresas de este rubro. En Canadá, el Global Mining Guidelines Group (GMG) (2019) es una red de empresas que tienen una visión común: que la innovación no ocurrirá en silos. Los miembros, que van desde empresas mineras hasta proveedores y centros de investigación, buscan generar cambios en la industria a través del desarrollo de directrices multidisciplinarias para manejar el riesgo, mejorar el desempeño, diseñar soluciones, informar sobre planificaciones y toma de decisiones y ahorrar tiempo y dinero.

Enfoque 3:
Tendencias tecnológicas específicas de los procesos productivos

Otra forma de analizar este tema es a través de una perspectiva tecnológica vinculada a los procesos productivos de la minería. Es cierto que existen múltiples innovaciones tecnológicas asociadas a cada etapa del proceso productivo, pero para este estudio nos enfocaremos más que nada en los avances de carácter más transversal que están generando un cambio real en cómo se llevan a cabo los procesos. Aquí enfatizaremos la automatización y la digitalización.

La industria minera ha puesto especial énfasis en desarrollar la automatización y otras tecnologías que abaratan costos y permiten extraer minerales de lugares remotos, con menores leyes de mineral y cada vez más profundos. A pesar de esto, se han quedado atrás en la digitalización de sus operaciones, a diferencia de otras industrias, como el retail y la banca. No obstante, algunas empresas mineras líderes a nivel global han comenzado este proceso de modernización y se estima que la transformación digital se irá apoderando cada vez más del sector. La consultora McKinsey (2018) definió cuatro cambios claves que explican la importancia de la digitalización en el sector minero:

1. La cantidad de datos e información ha crecido exponencialmente en los últimos años. Las empresas mineras están utilizando cada vez más y variados sensores (de vibración, ópticos y sonoros) mientras que los costos del almacenamiento de datos se reduce cada vez más.
2. El aumento de la potencia de los computadores y el desarrollo de nuevas metodologías analíticas permiten que las empresas mineras desarrollen análisis extremadamente sofisticados de los datos que obtienen. Los algoritmos que permiten el machine-learning son capaces de analizar datos que provienen de diversas fuentes de forma simultánea, incluso cuando estos factores no tienen relación lineal directa.
3. La tecnología móvil contribuye considerablemente a la productividad gracias a que permite una administración más efectiva y una optimización de los procesos (ej.: en mantenimiento).
4. La automatización ha generado importantes mejoras en la eficiencia de las faenas: los costos asociados a la mano de obra cada vez se incrementan más mientras el de los robots disminuye.

La transición tecnológica no solo ha revolucionado los procesos de cada etapa del proceso productivo, sino que ha cambiado completamente la forma en que se organizan las empresas, se desarrollan las estrategias de negocios y se relaciona con el cliente. En muchas industrias, incluyendo la minería, el proceso productivo no acaba en el momento en que se termina el producto y se tratan los residuos, sino que se extiende hasta el momento en que el consumidor compra el producto y queda conforme con él.

Boston Consulting Group (2018) aborda este tema en uno de sus artículos y muestra el siguiente esquema para identificar las tecnologías emergentes. Como se puede ver en la figura 9, para esta consultora el proceso comienza con la exploración y termina con el marketing y la comercialización del producto. Las innovaciones más relevantes están principalmente asociadas a las tecnologías de información y la automatización. Empresas mineras innovadoras a nivel mundial han invertido enormes sumas de dinero en automatizar sus procesos para reducir costos, mejorar la seguridad de los trabajadores y mejorar la eficiencia productiva.

Figura 9: **Ejemplos de tecnologías nuevas y emergentes a lo largo de la cadena de valor de la industria minera**

Fuente: Boston Consulting Group (2018)

Esta esquematización del proceso minero y de las nuevas tecnologías demuestra que, a pesar de que sí han aparecido—y seguirán haciéndolo—innovaciones específicas a cada etapa del proceso productivo, como es el caso de la detección remota, la biolixiviación (biotecnología), software de planificación minera, nanotecnología, etc., el cambio más revolucionario se asocia al desarrollo del *Smart Mining* (minería inteligente). Cada una de las innovaciones que se han desarrollado en cada etapa han permitido abaratar costos y posibilitar la explotación de yacimientos de muy bajas leyes que anteriormente no eran económicamente rentables; sin embargo, no han cambiado realmente la forma en que se hace minería. Por el contrario, la transformación digital sí está cambiando los procesos productivos, ya que modifica la forma en que se toman las decisiones, se optimiza y se administra a la vez que altera la composición de la fuerza laboral del sector.

1. Exploración y planificación:

El uso de *Big Data* disminuirá los costos de exploración. A través del uso de software, estas grandes bases de datos permiten un análisis mucho más certero y eficaz de los posibles yacimientos. Los avances en la capacidad de los computadores y otras tecnologías han facilitado muchos de los desafíos que tenían los profesionales al capturar, clasificar y analizar los datos.

Gracias a los datos recopilados a través de sensores u otros aparatos de monitoreo, los ingenieros pueden crear simulaciones para planificar las operaciones de forma muy precisa y determinar la eficiencia y productividad de una mina futura. La importancia de esta fase recae en los costos que se pueden evadir gracias a los errores que no se cometieron y los problemas que fueron pronosticados y evitados (AMC Consultants 2017).

En Chile ya se están desarrollando proyectos de innovación que permiten que la estimación de recursos minerales sea mucho más eficiente. El AMTC, centro de investigación de la Universidad de Chile, está trabajando en un proyecto de tomografía sísmica que permite estimar los recursos minerales del subsuelo a través de un método que utiliza la actividad sísmica para obtener una especie de radiografía del subsuelo, mediante la determinación de las variaciones de velocidades de las ondas sísmicas (Comte 2018). Otro proyecto interesante, liderado por el laboratorio ALGES del centro AMTC, corresponde a un software de geoestadística denominado ANDES, que permite trabajar con grandes volúmenes de datos para evaluar los recursos minerales de forma rápida a través de la ejecución de algoritmos de estimación y simulación geoestadística (Soto 2018).

2. Extracción y procesamiento:

El uso de sensores para generar información en tiempo real permite el uso de maquinaria remota y hacer predicciones para evitar situaciones de riesgo y/o costosas. Esta tecnología está cada vez más integrada en las grandes empresas mineras y se estima que la digitalización irá penetrando cada vez más en el sector. El uso de estas tecnologías va muy de la mano de la automatización, ya que gracias a este flujo de información las empresas pueden ir monitoreando las maquinarias desde la distancia y así lograr que lleguen a su máxima eficiencia. Los equipos autónomos mejoran la precisión y la eficiencia, mientras que reducen la exposición de los operadores a situaciones peligrosas. La información en tiempo real también entrega información sobre la seguridad de los trabajadores, previniendo accidentes dentro de las faenas.

Los robots, y con ellos la inteligencia artificial, pueden llevar a cabo, en forma autónoma o asistida, operaciones asociadas a perforaciones, tronadura, carguío, transporte, rescates, etc. Una alternativa impulsada por la Unión Europea llamada ¡VAMOS! (Viable Alternative Mine Operating System), busca tener acceso a reservas que son imposibles de explotar con trabajo humano, a través de un sistema remoto completamente robotizado y automatizado. Esto permitirá la explotación de yacimientos en minas que fueron abandonadas por ser riesgosas, minas inundadas o incluso yacimientos ubicados bajo el mar (a niveles superficiales), con una conducta ambiental y social responsable (¡VAMOS! 2018).

Asimismo, los robots también serán usados para monitorear las operaciones de la mina y asegurarse que todo está funcionando correctamente. Deambularán a través de las minas subterráneas recopilando datos de la temperatura, estabilidad de las rocas y otras condiciones que pudieran afectar la seguridad de los trabajadores (NBC News 2017).

Adicionalmente, estos grandes volúmenes de información, junto con los software y los expertos adecuados para interpretarlos, representan una fuente importante de conocimiento que permite optimizar los procesos, planificar las operaciones de la mina e incluso prevenir catástrofes dentro de la faena. Además, esta tecnología permite predecir el mantenimiento de las maquinarias y el uso de repuestos, reduciendo las fallas y los costos que se generan por el averío no pronosticado del equipamiento. Es más, los repuestos podrán ser fabricados a través de impresoras 3D y 4D, evitando tiempos de espera y reduciendo costos.

3. Cadena de suministro y logística:

La logística ha cambiado mucho en los últimos años debido a la globalización, el crecimiento del comercio internacional y la digitalización de los procesos, entre otros. En América Latina, existen problemas estructurales y de productividad en los corredores logísticos que generan una gran brecha con países más desarrollados. Esto se debe principalmente a problemas estructurales y culturales que no permiten una colaboración público-privada. Además, la región está muy atrasada en la adaptación de nuevas tecnologías de información, como el IoT, Cloud Computing, etc. Por ejemplo, si comparamos el tiempo que tardan los camiones en descargar y cargar en los puertos, en Australia requieren en promedio media hora, mientras que en Valparaíso demoran cinco veces más; si tomamos el caso más ineficiente demora más de seis horas (Manchón 2018).

En países más desarrollados ya se está priorizando la cadena de suministro y la logística en los procesos productivos. En el año 2017, Rio Tinto inauguró un tren autónomo que conecta la mina con el puerto. La figura 9 hace alusión a este tren en la parte de la cadena de suministro y logística, demostrando que este proyecto no se entiende como un caso aislado, sino que como el pionero de una tendencia tecnológica que se expandirá al resto de la industria. Adicionalmente, estos sistemas de carguío disminuirán los costos de la mano de obra y aumentarán la seguridad y la eficiencia.

Viéndolo a más largo plazo, los computadores cuánticos, los cuales tienen una capacidad aumentada de almacenar datos, ayudarán a desarrollar estas innovaciones. En conjunto, estas tecnologías permitirán que las empresas alcancen un nuevo nivel de optimización de la cadena de suministros, con grandes mejoras en la planificación de rutas y la interacción entre sus participantes.

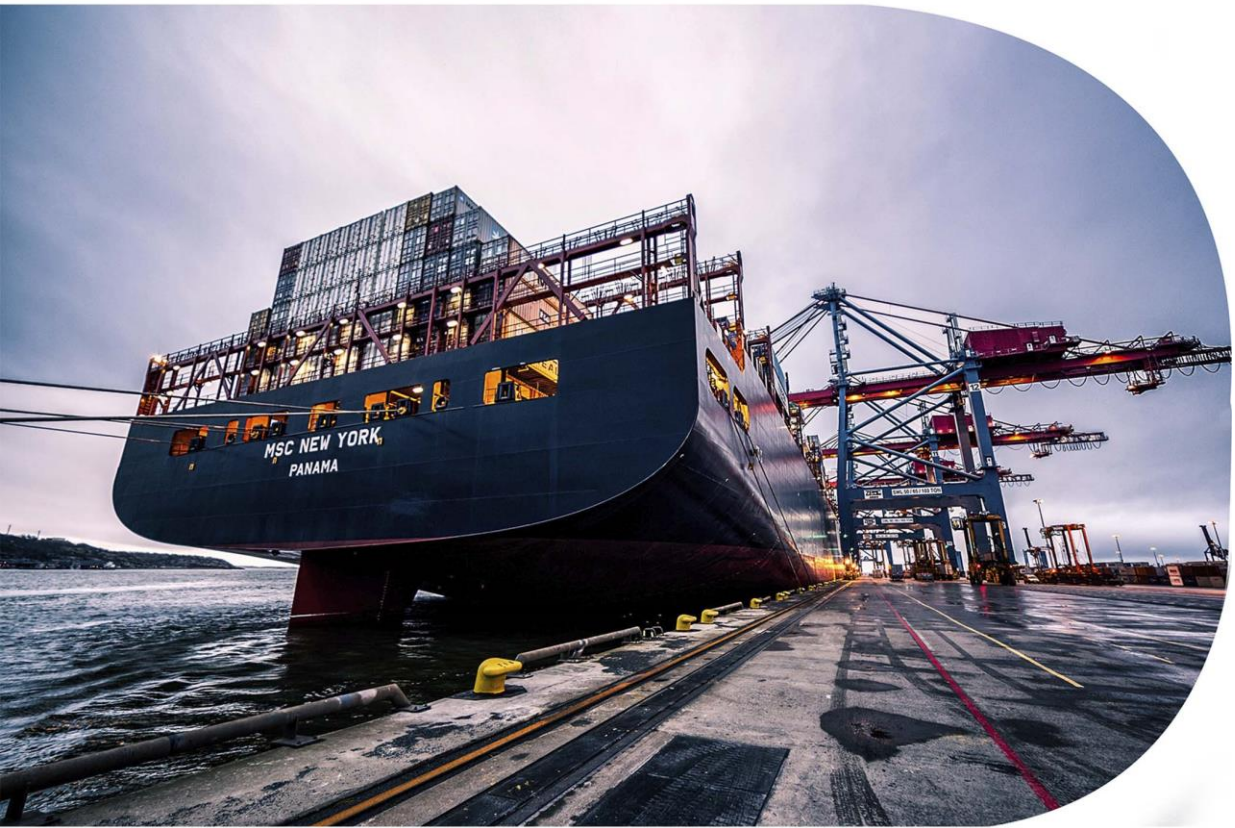
Este proceso de transformación es muy acelerado. Los países desarrollados ya han avanzado bastante en este camino, mientras que América Latina se ha quedado bastante atrás, lo cual debe mejorar si quiere seguir siendo competitiva. Manchón (2018) argumenta que para disminuir la brecha es fundamental solucionar problemas de competitividad logística e implementar nuevas tecnologías de la información. Para lograr esto propone tres acciones:

1. *Nodos inteligentes de los corredores:* se obtiene de la suma de la economía logística con la economía circular y las nuevas tecnologías. Esto tiene impactos en la productividad, fluidez y competitividad. Además, se crean las condiciones para que emprendedores de tecnologías disruptivas propongan soluciones que entreguen valor al nodo.
2. *Implicación del sector privado:* es importante que se involucre en la resolución de los problemas logísticos que están fuera de su propia empresa. Para esto, se definen cinco retos que debiese asumir para mejorar la logística: (1) colaboración a tra-

vés de clusters y gobernanza logística en nodos y corredores; (2) innovación privada; (3) participación en el financiamiento y gestión de infraestructura; (4) responsabilidad en la formación de capital humano y protección del medio ambiente; y (5) ayudar a garantizar la sostenibilidad de las estrategias logísticas en el tiempo a pesar de que haya cambios de gobierno.

3. *Inteligencia Logística:* los gobiernos y las políticas públicas en América Latina están muy atrasadas respecto a los acontecimientos globales. Para solucionar esto, es necesario contar con núcleos de centros de inteligencia logística que actúen como catalizadores y anticipadores de estos procesos.

En síntesis, Manchón (2018) argumenta que para que América Latina pueda alcanzar niveles de eficiencia logística similares a países desarrollados debe enfocar su estrategia en dos focos. En primer lugar, es clave eliminar la brecha que existe en aspectos más convencionales, donde América Latina se encuentra muy atrasada, como los costos, fluidez, infraestructura, modelos de gestión colaborativa, integración con el comercio exterior, políticas públicas, etc. En segundo lugar, la región no debe permitir que surja una nueva brecha tecnológica que la dejará aún más atrasada en temas de logística. Es importante transitar a la digitalización de los procesos e invertir en innovación y tecnologías que permitan agilizar los procesos.



4. Marketing y comercialización:

La digitalización y el *Big Data* están expandiendo las capacidades del marketing y de la comercialización, mientras que los algoritmos están revolucionando los modelos de distribución.

La transparencia en la cadena de suministros y la integración de los procesos productivos mejorará la experiencia del consumidor y fortalecerá su compromiso con la industria. A pesar de que en Chile aún no hay mucha preocupación sobre la procedencia de los bienes que se consumen, en países desarrollados, donde se transan los productos que utilizan nuestro cobre, la gente es cada vez más consciente del impacto medioambiental y el respeto a las comunidades. Esto ha impulsado el uso de logos ambientales—muy utilizados en alimentos, productos de belleza y sector forestal—para que los consumidores puedan tomar decisiones de forma informada. Es probable que en un futuro cercano este sistema de sellos abarque también el sector minero y mientras antes estemos preparados para enfrentar estos cambios, más eficiente será la transición.

A diferencia de la figura 9, donde se localiza el *Big Data* solo en exploración y planificación, mientras que la información en tiempo real solo en el proceso extractivo y procesamiento, en este estudio se plantea que ambas tecnologías son transversales al proceso productivo y permiten la interoperabilidad de las faenas mineras. El *Big Data* puede ser usado incluso en el monitoreo de relaves, para generar índices de estabilidad física y química y así prevenir catástrofes ambientales que afectan a las comunidades cercanas.

En la parte inferior de la figura 9 se muestran las tecnologías que aún no están totalmente integradas, pero que su adaptación está pronta a ocurrir. Acá se destaca el uso de sensores interconectados (drones), el análisis avanzado (integración de procesos, seguimiento del producto y comunicación continua), los computadores cuánticos (optimización de logística, optimización de rutas) y la inteligencia de mercado. Esto nos hace plantearnos las siguientes interrogantes: si los niveles de automatización y digitalización han avanzado tan rápido, ¿qué nos espera para el futuro? ¿A qué tecnología nos veremos enfrentados en los próximos 15 años? ¿En los próximos 50 años?

En síntesis, la evolución de los computadores y los sensores permitirá fortalecer aún más la integración de los procesos automatizados dentro de la industria minera (Matysek & Fisher 2016). Se estima que en el futuro (largo plazo) la minería estará casi totalmente robotizada y las operaciones serán mayoritariamente remotas (Boston Consulting Group 2018). Los procesos estarán todos interconectados, dejando de considerar etapas independientes dentro de la cadena de valor. Además, la optimización de los procesos se llevará a cabo en oficinas con expertos mirando paneles de datos y estudiando los modelos que pueden generar a partir de esto.

Es difícil pronosticar exactamente cómo se comportará la minería del futuro, pero lo que sí podemos visualizar es que la digitalización y la automatización serán cada vez más relevantes. Por lo tanto, si queremos mantener la competitividad y participación de la industria minera chilena a nivel global, al menos tenemos que seguir el camino en el que se han aventurado las empresas mineras líderes del mundo, ya que claramente están dándonos la señal de por dónde va a transitar el tema de la innovación tecnológica.

Se estima que en el futuro la minería estará casi totalmente robotizada y las operaciones serán mayoritariamente remotas.

2. El capital humano para la minería del futuro

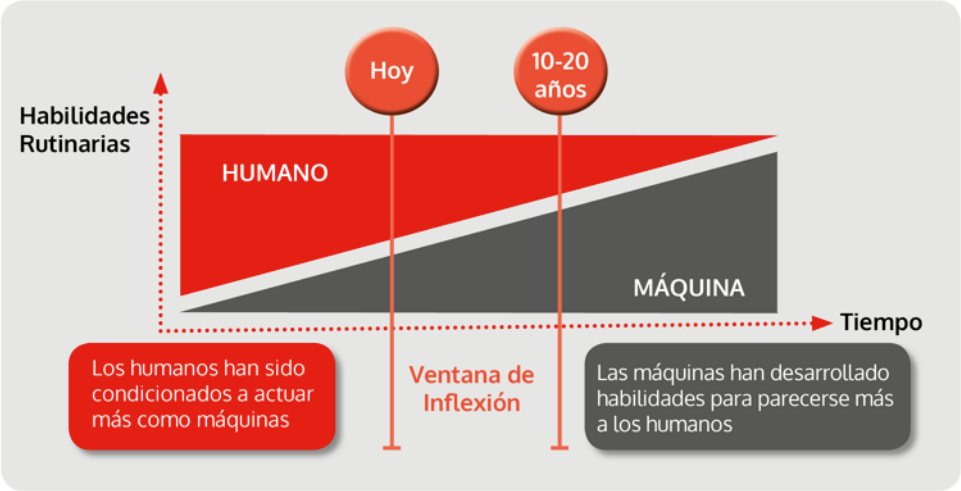
Cada revolución tecnológica que ha ocurrido ha generado un cambio social importante. La diferencia entre la Revolución 4.0 con las anteriores es la escala a la que actúa, la rapidez con la que ocurren los cambios y su complejidad, por lo que provocará cambios que la humanidad nunca ha experimentado antes (World Economic Forum 2016). Este fenómeno transformará la forma en que vivimos, trabajamos y nos relacionamos con otros individuos. Además, los efectos de la globalización provocarán la aparición de plataformas globales y modelos de negocios distintos a los que conocemos hoy, por lo que el talento, la cultura y las estructuras organizacionales tendrán que ser repensadas.

Muchos expertos aseguran que, dado que en la actualidad las empresas compiten en una economía global liderada por grandes volúmenes de información, tecnologías digitales e innovación, esta revolución tecnológica requerirá más profesionales en las áreas de ciencia, tecnología, ingeniería y matemáticas (PwC 2015). Sin embargo, ¿qué habilidades deberán desarrollar para poder adaptarse a estos cambios tecnológicos?

Enfocándonos en el caso de los ingenieros, a pesar de que hay diversas opiniones al respecto, es un hecho que se debe cambiar la forma en que se están formando estos profesionales, ya que la metodología usada mayoritariamente en las universidades chilenas no ha cambiado de forma significativa y siguen haciendo clases expositivas y evaluación escrita en vez de enfocarse en un aprendizaje más aplicado (Academia de Ingeniería de Chile 2018). Respecto a cómo se debería abordar este cambio, algunos argumentan que la analítica, la robótica y las tecnologías de la información son el camino hacia el futuro (Mining Technology 2018b); otros postulan que los ingenieros deberían obtener una formación básica sólida y flexible que pueda adaptarse a los cambios (Academia de Ingeniería de Chile 2018); grandes empresas mineras como Rio Tinto creen que los trabajadores del futuro tendrán que poseer habilidades como la resolución de problemas, pensamiento crítico y conocimiento digital (Rio Tinto 2017c); mientras que otros afirman que la enseñanza se debería enfocar en la creatividad y diseño, administración, expresión oral y escrita, trabajo en equipo y liderazgo (National Academy of Engineering 2018).

En la figura 10 se presenta un gráfico que muestra que en la actualidad estamos en un punto de inflexión, que marca la transición entre un periodo donde los humanos llevan a cabo las tareas rutinarias a uno donde las máquinas son las responsables de estas labores. Esto viene asociado a un cambio importante de los trabajos y las habilidades que se requieren. Anteriormente, a los humanos se les enseñaba más a actuar como máquinas, valorando la estandarización, certeza y disminución del riesgo; en el futuro serán las máquinas las que intentarán imitar al humano, por lo que será importante la habilidad de aprender, la adaptabilidad, la empatía, la interdisciplinariedad, etc. En cuanto a la educación, esto genera un cambio total de paradigma, donde a veces puede ser más importante el cómo se adquiere el conocimiento que el conocimiento en sí.

Figura 10: Habilidades humanas v/s maquinas en el tiempo



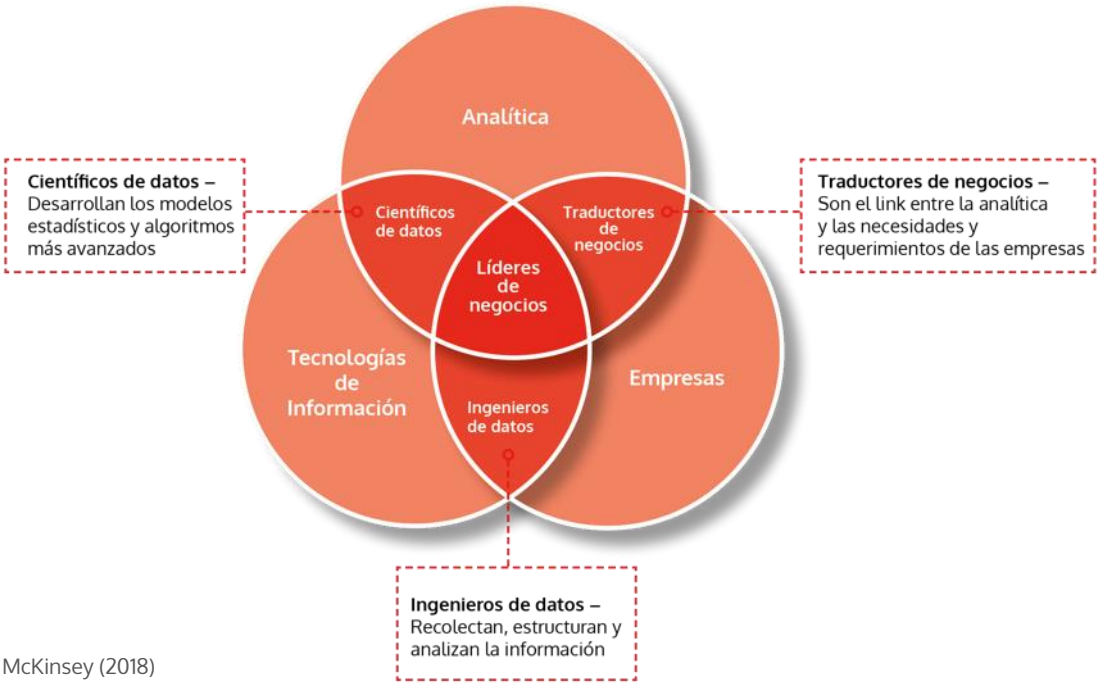
Fuente: National Academies of Sciences Engineering and Medicine (2018)

Este tema es cada día más relevante. Se estima que en Estados Unidos, el 47% de los empleos tienen la posibilidad de ser automatizados en los próximos años (probablemente una década o dos) (Frey & Osborne 2017). El caso de Chile no es muy diferente; un estudio hecho por la OCDE ha estimado que un trabajador promedio tiene un 55% de probabilidades de que sus labores sean automatizadas (Nedelkoska & Quintini 2018). En síntesis, la fuerza laboral cambiará enormemente y los profesionales tendrán que desarrollar habilidades distintas para destacar y ser capaces de trabajar en conjunto con las máquinas de forma eficiente.

Esto generará un cambio en los puestos de trabajo. Como se puede ver en la figura 11, a raíz de la interacción entre los roles tradicionales surgirán nuevas labores. McKinsey identifica tres aspectos importantes: la analítica, las tecnologías de información y la administración de empresas. Al interactuar las tres se forman nuevos conjuntos de tareas claves para el mundo digitalizado de hoy. La intersección de la analítica y las tecnologías de información provoca la aparición de los científicos de datos. Por otro lado, la interacción entre la analítica y la parte empresarial fortalece el rol de los profesionales que hacen el link entre ambas disciplinas, los cuales McKinsey llama los "traductores de negocios". A raíz de la intersección entre la administración y las tecnologías de información surgen los ingenieros en análisis de datos. Finalmente, gracias a la mezcla de las tres surgen de líderes empresariales.

Es decir, cada vez será más importante la capacidad de generar modelos estadísticos, algoritmos y ser capaces de interpretarlos para tomar decisiones de forma eficiente y optimizar los procesos productivos. La administración, por ende, se vuelve fundamental, por lo que las jerarquías deben simplificarse para incentivar una organización más dinámica y con menos niveles jerárquicos. En las grandes empresas mineras chilenas existen en promedio dos niveles jerárquicos adicionales en comparación con Estados Unidos, Australia, Suecia y Canadá (CNP 2017).

Figura 11: Nuevos roles que surgen de la interacción de los roles tradicionales



Fuente: McKinsey (2018)

Ahora veamos el caso puntual de la minería. En el mediano plazo, la forma en que extraemos y procesamos el mineral no va a variar mucho. Lo que realmente cambiará es quién lo hace (robots o personas). Se generará mucha información en cada etapa del proceso productivo y se requerirá buena comprensión de lo que esté pasando y tomar decisiones en tiempo real puede significar un gran aumento de eficiencia.

La automatización, a través de robots y maquinaria remota, se integra cada vez más al sector minero como respuesta a una intensión generalizada de aumentar la productividad del sector (McKinsey 2018). Adicionalmente, los minerales deberán ser extraídos de lugares más remotos y profundos, lo que dificultará encontrar trabajadores que deseen llevar a cabo estas tareas.

Gracias a la maquinaria autónoma, los operadores no estarán en las faenas manejando los taladros ni supervisando las obras, sino que estarán sentados a kilómetros de distancias cómodamente en sus oficinas mientras manejan todo los aparatos de forma remota; así lo hace Rio Tinto desde su centro de operaciones en Perth (Matysek & Fisher 2016) y CODELCO en sus divisiones de El Teniente y Ministro Hales. Mientras tanto, los supervisores estarán mapeando el estado de la mina a través de drones, los cuales estarán generando información en tiempo real que también podrá ser analizada desde los centros de operaciones.

En el mediano plazo, la forma en que extraemos y procesamos el mineral no va a variar mucho. Lo que realmente cambiará es quién lo hace (robots o personas).

Si ya vemos que existen empresas que llegan a este nivel de automatización, lo que podemos esperar para el futuro es que habrá un reducido número de trabajadores en las faenas (Boston Consulting Group 2018). Entonces, ¿qué tipo de profesionales necesitaremos para llevar a cabo estos procesos?[23]

Con la intensión de identificar a los profesionales que se necesitarán en Chile dado los nuevos avances tecnológicos que están integrándose en las mineras modernas, realizamos entrevistas a investigadores de la FCFM de la Universidad de Chile. El objetivo era esquematizar el proceso minero y definir qué tipo de profesionales se necesitará en cada etapa. Dividiremos el análisis en corto y largo plazo.

[23] Ya existe un estudio realizado por el Consejo de Competencias Mineras junto con Fundación Chile, llamado "Fuerza Laboral de la Gran Minería Chilena 2017-2026", donde se estimó la demanda de KH para la gran minería. Sin embargo, este estudio se basó principalmente en profesionales con formación en oficios y educación técnica, universitaria con y sin licenciatura y de ejecución. No se contemplan a los postgrados.

- **Corto plazo:**

Los sensores desempeñarán un rol fundamental. En el corto plazo[24], se necesitarán distintos profesionales para desarrollar esta tecnología. Para entender la cadena de generación de valor, se identificaron las siguientes fases (Álvaro Egaña, director del laboratorio ALGES del centro AMTC).

1. **Fabricación del sensor:** Para crear un sensor se necesita un profesional, probablemente un ingeniero eléctrico, minero o mecánico. Lo ideal sería tener un sistema académico multidisciplinario, con mallas curriculares compartidas entre dos especialidades o incentivar a los alumnos a que sigan estudios de postgrado en un departamento diferente del cual cursaron el pregrado. Para saber qué grado de especialización requerirá este profesional necesitamos identificar el nivel de complejidad del sensor. Si necesitamos crear un sensor con un material que aún no existe, ahí necesitaremos a un doctor. Por otro lado, si la intensión es copiar tecnología del extranjero y adaptarla a las condiciones locales, un ingeniero es suficiente (mientras sea multidisciplinario).

2. **Colocación y operación de los sensores:** En términos generales, no se necesita un especialista ni un geólogo. Puede ser un técnico que sea capaz de armar una red y poner sensores con un sistema de comunicación integrado (wifi o cableado). No obstante, depende de la complejidad del problema. Por ejemplo, en el caso de los sensores tomográficos sí se necesita alguien capacitado (un ingeniero de minas o geofísico), ya que tiene que ser capaz de discriminar donde poner el tomógrafo, manejarlo y calibrarlo. Por el contrario, si solo se quiere poner una red de radiofaros que emitan una cierta cantidad de bits, un técnico es suficiente. En esta área pudiese surgir una nueva especialidad, algo similar a la función que cumple el tecnólogo médico: un profesional que no necesita ser médico, pero tampoco puede ser cualquier persona; tiene que ser capaz de interpretar un examen. Para los sensores necesitamos un profesional con este mismo perfil, sobre todo considerando que los sensores van a ir complejizándose con los años. Para suplir esta demanda, se podría crear una nueva especialidad dentro del departamento de ingeniera de minas o ingeniería eléctrica; otra posibilidad es mezclar las mallas académicas. Otra solución eficiente podría ser crear un magíster en tecnología minera liderado por dos departamentos, o incentivar a que un ingeniero en computación haga un magíster en materiales, o que un ingeniero eléctrico haga un magíster en minería. Posibilidades hay muchas, pero la base de todas estas es apuntar a la multidisciplinariedad.

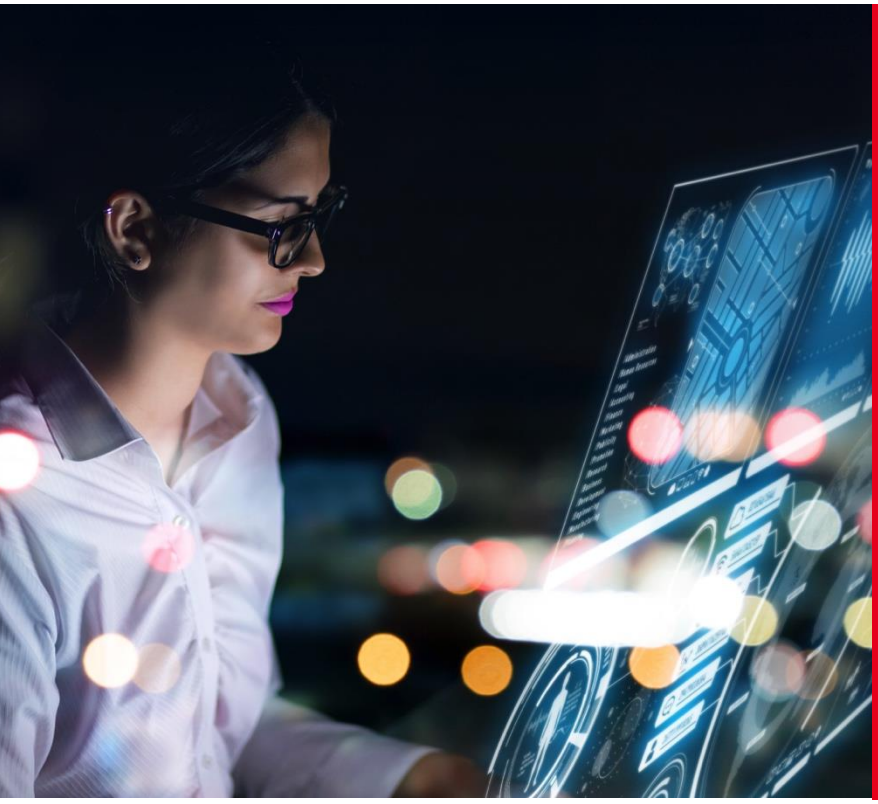
[24] Decimos corto plazo porque a largo plazo no sabemos lo que ocurrirá con la tecnología, por lo que no podemos predecir de forma tan específica lo que pasará con los profesionales.

3. **Captación de datos:** Los que hacen normalmente esta tarea son los ingenieros. Pueden ser electrónicos.

4. **Procesamiento de datos:** El objetivo es convertir los datos en algo que sea interpretable por los expertos (los analistas). Tienen que reformatear los datos pero tienen que saber para qué lo están haciendo, qué es lo que se quiere obtener y qué necesita saber el experto. Por lo tanto, se necesita un especialista, ya sea un profesional con grado de magíster o doctor.

5. **Análisis de datos:** Para esta etapa se necesitan expertos calificados en análisis de datos. Cuando hay sistemas automatizados los procesos se van complejizando cada vez más, por lo que generalmente hay un panel de expertos mirando indicadores y haciendo análisis al respecto (como ocurre en las plantas nucleares). Puede ser un analista especializado o un tomador de decisiones. En la etapa de exploración, puede ser un geólogo especialista en análisis de datos. Dada la complejidad de este trabajo, se necesita un doctor que seas capaz de modelar y tomar decisiones.

A medida que estas etapas se vayan complejizando y todo esté cada vez más automatizado lo que va a cambiar son las especialidades que tendrán los profesionales, dado que el proceso va a estar más orientado a la toma de decisiones con un nivel de abstracción mucho más alto. En el caso de los supervisores, ya no tendrán que preocuparse de los operadores que entran a la mina, sino que se encargarán de supervisar la maquinaria y preocuparse que todo funcione correctamente. Al fin y al cabo, ¿qué hacen los mineros? Sacan minerales. ¿Qué harán los robots? Sacarán minerales también. Por lo tanto, lo que experimentará cambios será la seguridad (un problema menos) y se eliminarán capas de supervisores. Por esto, para enfrentar la Revolución 4.0 es fundamental impulsar el desarrollo de capacidades analíticas. Sin embargo, como país estamos muy lejos de alcanzarlo, falencia que debe ser abordada desde la educación escolar. Chile necesita una verdadera revolución en la formación de capital humano, focalizando la educación en trabajo en equipo, capacitación, adaptación y resolución de problemas (Corbo 2018).



Para enfrentar la Revolución 4.0 es fundamental impulsar el desarrollo de capacidades analíticas. Sin embargo, como país estamos muy lejos de alcanzarlo, falencia que debe ser abordada desde la educación escolar.

Egaña destaca que los expertos no se van a poder reemplazar, dado que no se pueden crear sistemas inteligentes que estén capacitados para tomar decisiones integrales; podemos generar sistemas expertos que ayuden a los especialistas inteligentes que sí tienen criterio y que finalmente tomarán las decisiones. Por lo tanto, seguiremos necesitando geólogos, ingenieros de minas, ingenieros en computación, ingenieros electrónicos, etc., la única diferencia serán las habilidades que deberán tener; tendrían que desarrollar la capacidad de analizar datos y por esto deben formarse en instituciones que fomenten la multidisciplinariedad. La Academia de Ingeniería de Chile (2018) ya ha expresado su preocupación respecto a este tema, donde considera que la formación de los ingenieros en Chile es muy rígida y debiese transitar a la creación de mallas académicas que tengan mayor énfasis en el aprendizaje multidisciplinario, que desarrollen la habilidad de diseñar, que fortalezca la capacidad de tomar decisiones en base a grandes cantidades de información y que complementen la parte teórica con lo aplicado a través de la contratación de profesores que trabajen en la industria.

Para Paul Vallejos y Alejandro Ehrenfeld, investigadores del AMTC, hay muchas ineficiencias en Chile que deben ser resueltas antes de pensar en el capital humano especializado que formaremos. En primer lugar, no sacamos nada con tener buenos ingenieros y doctores trabajando en las empresas mineras si los operadores técnicos no están bien capacitados. Es absurdo contar con una mina que tenga un sistema integrado excelente, con una fibra óptica conectada a un centro integrado de operaciones, donde hay una pantalla que muestra las datos generados por los sensores, si los técnicos no saben calibrar los sensores, como ocurre en algunas empresas.

Otro problema son los incentivos que existen en las universidades para la investigación. Para obtener fondos, los académicos están obligados a escribir artículos y publicarlos en revistas científicas, lo que puede generar ineficiencias. Por ejemplo, el desarrollo de un software no es una publicación y a pesar de que puede ser una innovación muy exitosa, no le "suma puntos" al académico para conseguir nuevos fondos y seguir investigando. Además, los centros de investigación trabajan con empresas privadas, donde la información es confidencial y no siempre puede ser publicada.

Simultáneamente y coordinadamente, las empresas debiesen integrar en sus organizaciones profesionales altamente calificados y las universidades fortalecer la generación de centros de I&D aplicada, en los cuales se incentive el desarrollo de nuevas tecnologías, se fomente la protección industrial de los nuevos desarrollos y se premie la vinculación de proyectos en conjunto con la industria. Los doctores están capacitados para desarrollar nuevas tecnologías, no para administrarlas ni implementarlas (que es lo que ocurre hoy en día en las empresas).

La oportunidad de generar esto existe, pero el problema es que en Chile hay muy poca inversión en I&D y hace falta más investigadores en centros de investigación, pero con recursos y flexibilidad para enfrentar riesgos e incertidumbres inherentes a procesos de innovación. En consecuencia, Vallejo y Ehrenfeld sugieren que a corto plazo nos debiésemos enfocar en mejorar la eficiencia de las operaciones, a través de técnicos mejor preparados e ingenieros más flexibles y multidisciplinarios.

Otra propuesta tiene relación con la formación de profesionales en conjunto con la industria. Si existieran programas colaborativos entre empresas y universidades, los alumnos podrían hacer sus tesis de magíster o doctorado en la misma industria y aprender de forma mucho más aplicada y enfocada a las necesidades de esta.

En el corto plazo, si Chile se viese enfrentado a un cambio repentino de la tecnología usada en minería, los laboratorios y centros de investigación que poseen las universidades podrían ser una buena solución para adaptarse, siempre que tengan profesionales provenientes de diferentes disciplinas, es decir, la interacción interdisciplinaria es fundamental. Las universidades no serán capaces de cambiar sus mallas académicas de forma rápida y espontánea, ya que es una institución muy resistente al cambio, pero pueden crear centros colaborativos que serían una buena solución mientras se vuelven a estructurar (Álvaro Egaña).

En síntesis, se espera que en un futuro no muy lejano la minería inteligente se apodere de las faenas mineras, sobre todo de la gran minería.

- **Largo plazo:**

Si queremos determinar qué pasará a largo plazo se complejiza el análisis, ya que el nivel de incertidumbre frente a lo que ocurrirá con estos profesionales es muy alto. "Tanto el trabajo, como los mercados y las habilidades requeridas cambiarán, por lo que estamos educando gente para trabajos que aún no existe, usando tecnologías que no han sido creadas para resolver problemas que no hemos podido identificar todavía" (National Academies of Sciences Engineering and Medicine 2018). La velocidad con la que están ocurriendo los cambios es tan grande que es muy difícil predecir cuáles serán las habilidades que requerirán los ingenieros en el futuro.

Ante esta incertidumbre, los ingenieros deberán desarrollar habilidades no técnicas, como el liderazgo, compromiso, retroalimentación y comunicación. La durabilidad y la adaptabilidad son también claves, ya que el éxito se basará en la flexibilidad, creatividad y velocidad a la que los individuos se adecuarán a los cambios. La adaptabilidad depende más de la velocidad que del conocimiento que uno pueda poseer, ya que el mundo está cambiando más rápido que nunca, por lo que los individuos deben intentar seguir este ritmo para no quedarse atrás (National Academies of Sciences Engineering and Medicine 2018).

En consecuencia, los humanos tendrán que enfatizar en las habilidades que las máquinas no son capaces de desarrollar. Según Colvin (2019), economista de la Universidad de Harvard y experto en tendencias tecnológicas, tenemos que dejar de preguntarnos lo que las máquinas no pueden hacer, ya que es imposible saber qué pasará en el futuro. Hace un tiempo, expertos decían que los computadores nunca podrían jugar ajedrez a un nivel profesional, traducir idiomas o conducir automóviles, lo cual han logrado hacer y a veces mejor y más rápido que los humanos. Por esto, Colvin asegura que debemos enfocarnos en las habilidades humanas que son inherentes a nuestra naturaleza y que no cambiarán a pesar de lo que ocurra con la tecnología. Con esto se refiere a la capacidad de interactuar entre seres humanos de manera profunda, la cual clasifica en tres:

1. *Empatía*: entendida como la capacidad de entender lo que la otra persona está sintiendo y pensando y responder adecuadamente a ello.
2. *Resolver problemas en conjunto de forma creativa*: lo que hace que los equipos de trabajo sean eficaces es la capacidad de sus miembros de leerse unos a los otros y averiguar lo que está pensando y sintiendo su compañero;
3. *Contar historias:* a pesar de que los datos son importantes para tomar buenas decisiones, los humanos no pueden competir con los computadores en el manejo de grandes bases de datos, pero lo que sí pueden hacer es contar una historia con esta información para poder cambiar la mentalidad de las personas, asegurarse de que recuerden e inspirar a que actúen.

Alejándonos un poco del panorama general y aterrizando este tema a la minería, ya podemos ver que han ocurrido cambios en las habilidades que requieren los ingenieros de minas. En países mineros desarrollados muchos de estos profesionales están tan especializados en el desarrollo y utilización de software como en planificación minera (Rio Tinto 2017c). Estas nuevas aptitudes son relevantes para la industria de hoy, ¿pero qué podemos predecir para el futuro? En el sector minero es aún más complejo planificar las adaptaciones a estos cambios, dado los plazos con los que trabajan. Los avances tecnológicos que están a la vanguardia hoy en día, como la robótica, operación remota, drones, machine learning, etc., quizás estarán obsoletos en cinco años más. Entonces, ¿cómo pueden las empresas desarrollar planes flexibles (en planificación, financiamiento y capital humano) si las decisiones que se toman tienen un horizonte temporal de incluso más de 20 años? Existe claramente una disparidad entre el ciclo de vida de las minas y el de las tecnologías y digitalización que está alterando el funcionamiento del sector (PwC 2017).

Por otro lado, para determinar qué tipo de KH necesitaremos para enfrentar esta transición tecnológica no solo necesitamos identificar los tipos de tecnología que predominarán en la industria, sino que también el rol que cumplirá nuestro país en este proceso. Es fundamental definir si vamos a transformarnos en productores de tecnología o si seguiremos importándola y cuál será el rol del Estado y las universidades en este proceso.

Ehrenfeld y Vallejos mencionan que si Chile decide transformarse en productor de tecnología hay que determinar el cómo lo vamos a hacer. ¿Será a través de los proveedores? ¿Con apoyo de la CORFO? ¿En centros de investigación? ¿Proyectos de colaboración con la industria? En primer lugar, tenemos que definir el modelo de cómo se va a desarrollar la investigación aplicada en Chile, por lo que debemos primero responder la siguiente interrogante: ¿Qué sacamos con formar doctores si no hay una política de Estado que le otorgue posteriormente financiamiento a cada uno de ellos para desarrollar investigación específica en sus áreas? Para ambos investigadores, lo primordial es determinar cuánto vamos a invertir como país en innovación tecnológica y después ver, según los recursos que dispongamos, cuántos profesionales vamos a necesitar para darle utilidad a este presupuesto.

Es fundamental definir si vamos a transformarnos en productores de tecnología o si seguiremos importándola.

El problema, es que hablar de largo plazo para la minería no es lo mismo que para cualquier otro sector. La minería es un sector que trabaja a muy largo plazo, donde las decisiones tecnológicas que se toman hoy en día tendrán repercusión entre 30 a 50 años más. El problema es que en Chile cinco años ya es largo plazo (porque dura más que un gobierno) y a veces cuando hay cambio de go-

bierno no se renuevan los proyectos y se pierden los fondos. No hay continuidad en las políticas y esto afecta enormemente el trabajo de los centros de investigación en Chile. Rio Tinto, por ejemplo, invierte en centros de investigación que le entregarán soluciones de acá a 20 años, mientras que en Chile las empresas esperan obtener resultados de un año a otro, lo cual se parece más al trabajo que realiza una consultora que un centro de investigación.

Todas estas ineficiencias implican que hoy en día no tengamos los recursos necesarios para desarrollar investigación de forma eficiente. Los investigadores del AMTC concuerdan en que en Chile no existe un ecosistema de innovación. En la práctica, esto quiere decir que cuando un investigador encuentra la solución a un problema y genera un prototipo necesita que una empresa proveedora tome esta idea y la transforme en un producto comercializable. En Chile no existen suficientes empresas que hagan esto, es decir, no existe un ecosistema tecnológico y ese es el mayor problema.

En consecuencia, la industria minera no confía en la innovación local. A pesar de que los centros de investigación pueden resolver sus inquietudes y presentarles soluciones exitosas, nadie les asegura que esto va a tener continuidad en el tiempo, ya que no existe una empresa que desarrolle ese producto, lo actualice y otorgue el servicio de reparación y mantención en caso de fallas.

La incertidumbre respecto a la tecnología que existirá en el futuro hace que los profesionales tengan que ser capaces de pensar de forma multidisciplinaria, conectar ideas y construir información.

En síntesis, la incertidumbre respecto a la tecnología que existirá en el futuro hace que los profesionales tengan que ser capaces de pensar de forma multidisciplinaria, conectar ideas y construir información; estas competencias globales formarán nuestro mundo y la forma en que vivimos y trabajamos en conjunto (OECD 2017). Por otro lado, las empresas mineras importan tecnología porque no hay oferta tecnológica local, debido a la falta de continuidad en la entrega de los productos y servicios generados localmente.

Sabemos que "no podemos predecir el futuro, pero creemos que la conversación sobre cómo podría ser el futuro es fundamental".

Mientras no se invierta lo necesario para generar las condiciones adecuadas que permitan el desarrollo de este ecosistema de innovación en Chile, resulta muy difícil determinar qué tipo de profesionales especializados necesitaremos.

Sabemos que "no podemos predecir el futuro, pero creemos que la conversación sobre cómo podría ser el futuro es fundamental" (PwC 2017).

Anexos

I. Anexo 1: Titulados de Ingeniería de Minas por Universidad (2007-2017)

Universidad	Titulados
Año 2007	**56**
UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA	13
UNIVERSIDAD DE CHILE	22
UNIVERSIDAD DE LA SERENA	4
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE	17
Año 2008	**82**
UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA	11
UNIVERSIDAD DE ATACAMA	14
UNIVERSIDAD DE CHILE	25
UNIVERSIDAD DE LA SERENA	8
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE	24
Año 2009	**116**
UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA	17
UNIVERSIDAD DE ATACAMA	23
UNIVERSIDAD DE CHILE	19
UNIVERSIDAD DE LA SERENA	10
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE	47
Año 2010	**89**
UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA	9
UNIVERSIDAD DE ATACAMA	16
UNIVERSIDAD DE CHILE	20
UNIVERSIDAD DE LA SERENA	14
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE	30
Año 2011	**120**
UNIVERSIDAD DE ACONCAGUA	5
UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA	9
UNIVERSIDAD DE ATACAMA	13
UNIVERSIDAD DE CHILE	24
UNIVERSIDAD DE LA SERENA	13
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE	56

Año 2012	164
UNIVERSIDAD DE ACONCAGUA	34
UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA	17
UNIVERSIDAD DE ATACAMA	30
UNIVERSIDAD DE CHILE	26
UNIVERSIDAD DE LA SERENA	17
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE	24
UNIVERSIDAD LA REPUBLICA	1
UNIVERSIDAD PEDRO DE VALDIVIA	15
Año 2013	**303**
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE	46
UNIVERSIDAD DE ACONCAGUA	51
UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA	26
UNIVERSIDAD DE ATACAMA	19
UNIVERSIDAD DE CHILE	26
UNIVERSIDAD DE LA SERENA	34
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE	48
UNIVERSIDAD LA REPUBLICA	42
UNIVERSIDAD PEDRO DE VALDIVIA	11
Año 2014	**368**
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE	43
UNIVERSIDAD DE ACONCAGUA	62
UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA	39
UNIVERSIDAD DE ATACAMA	59
UNIVERSIDAD DE CHILE	53
UNIVERSIDAD DE LA SERENA	33
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE	51
UNIVERSIDAD LA REPUBLICA	19
UNIVERSIDAD PEDRO DE VALDIVIA	9
Año 2015	**352**
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE	51
UNIVERSIDAD ADOLFO IBAÑEZ	2
UNIVERSIDAD BOLIVARIANA	2
UNIVERSIDAD DE ACONCAGUA	43
UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA	33
UNIVERSIDAD DE ATACAMA	28
UNIVERSIDAD DE CHILE	40
UNIVERSIDAD DE LA SERENA	51
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE	66
UNIVERSIDAD LA REPUBLICA	15

UNIVERSIDAD PEDRO DE VALDIVIA	21
Año 2016	**461**
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE	51
UNIVERSIDAD ADOLFO IBAÑEZ	18
UNIVERSIDAD BOLIVARIANA	4
UNIVERSIDAD DE ACONCAGUA	40
UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA	47
UNIVERSIDAD DE ATACAMA	31
UNIVERSIDAD DE CHILE	53
UNIVERSIDAD DE LA SERENA	45
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE	85
UNIVERSIDAD LA REPUBLICA	42
UNIVERSIDAD PEDRO DE VALDIVIA	45
Año 2017	**578**
PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DE CHILE	48
UNIVERSIDAD ADOLFO IBAÑEZ	24
UNIVERSIDAD ANDRES BELLO	12
UNIVERSIDAD CATOLICA DEL NORTE	16
UNIVERSIDAD DE ACONCAGUA	56
UNIVERSIDAD DE ANTOFAGASTA	47
UNIVERSIDAD DE ATACAMA	81
UNIVERSIDAD DE CHILE	57
UNIVERSIDAD DE LA SERENA	61
UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE	85
UNIVERSIDAD LA REPUBLICA	40
UNIVERSIDAD PEDRO DE VALDIVIA	51
Total Periodo	**2.689**

II. Anexo 2: Disciplinas OCDE

CIENCIAS NATURALES
Matemáticas
Matemáticas Puras
Matemáticas Aplicadas
Estadísticas y Probabilidades
Otras Especialidades de las Matemáticas
Ciencias de la Información y Computación
Ciencias de la Computación
Ciencias de la Información y Bioinformática
Otras Especialidades de las Ciencias de la Información y Computación
Ciencias Físicas
Física Atómica, Molecular y Química
Física de la Materia Condensada
Física de Partículas y Campos
Física Nuclear
Física de Plasmas y Fluidos
Óptica
Acústica
Astronomía
Otras Especialidades de la Física
Ciencias Químicas
Química Orgánica
Química Inorgánica y Nuclear
Físico-Química
Polímeros
Electroquímica
Química de los Coloides
Química Analítica
Otras Especialidades de la Química

Ciencias de la Tierra y del Medio Ambiente
Geociencias
Mineralogía
Paleontología
Geoquímica y Geofísica
Geografía Física
Geología
Vulcanología
Ciencias del medio Ambiente
Meteorología y Ciencias Atmosféricas
Climatología
Oceanografía, Hidrología y Recursos del Agua
Otras Especialidades de Ciencias de la Tierra
Ciencias Biológicas
Biología Celular
Virología
Bioquímica
Biología Molecular
Métodos de Investigación en Bioquímica
Micología
Biofísica
Genética y Herencia
Biología Reproductiva
Biología del Desarrollo
Botánica
Zoología, Ornitología, Entomología, Comportamiento Biológico
Biología Marina, Limnología
Ecología
Conservación de la Biodiversidad
Biología (Teórica, Matemática, Criobiología, Ritmos Biológicos)
Biología Evolutiva
Otras Especialidades de la Biología

Otras Ciencias Naturales
INGENIERIA Y TECNOLOGIA
Ingeniería Civil
Ingeniería Civil
Ingeniería Arquitectónica
Ingeniería de la Construcción
Ingeniería Estructural y Municipal
Ingeniería de Transporte
Ingeniería Eléctrica, Ingeniería Electrónica, Informática
Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Robótica y Sistemas de Control Automático
Sistemas de Automatización y Control
Ingeniería de sistemas y Comunicaciones
Telecomunicaciones
Arquitectura y Hardware de Computación
Ingeniería Mecánica
Ingeniería Mecánica
Mecánica Aplicada
Termodinámica
Ingeniería Aeroespacial
Ingeniería Nuclear
Ingeniería en Sonido
Ingeniería Química
Ingeniería Química
Ingeniería de Procesos Químicos
Ingeniería de los Materiales
Ingeniería de los Materiales
Cerámicos
Recubrimientos y Películas
Compuestos (Laminados, plásticos reforzados, fibras sintéticas y naturales)
Papel y Madera
Textiles

Ingeniería Médica
Ingeniería Médica
Tecnología Médica
Ingeniería Ambiental
Ingeniería Ambiental y Geológica
Geotecnia
Ingeniería del Petróleo (combustibles y aceites)
Sensores Remotos
Minería y Procesamiento de Minerales
Ingeniería Marina y Naval
Ingeniería Oceanográfica
Biotecnología Ambiental
Biotecnología Ambiental
Biorremediación
Biotecnología de Diagnóstico (Chips de ADN y dispositivos biosensores) en manejo ambiental
Ética Relacionada con Biotecnología Ambiental
Biotecnología Industrial
Biotecnología Industrial
Tecnologías de Bioprocesamiento, Biocatálisis, Fermentación
Bioproductos (productos que se manufacturan usando biotecnología como materia prima), Biomateriales, Bioplásticos, Biocombustibles, Químicos Brutos y Finos Biodeerivados, Materiales Nuevos Bioderivados
Nanotecnología
Nanomateriales (producción y propiedades)
Nanoprocesos (aplicaciones a nanoescala)
Otras Ingenierías y Tecnologías
Tecnología de los Alimentos
Otras Ingenierías y Tecnologías

III. Anexo 3: Doctores graduados en Chile y países referentes (2012)

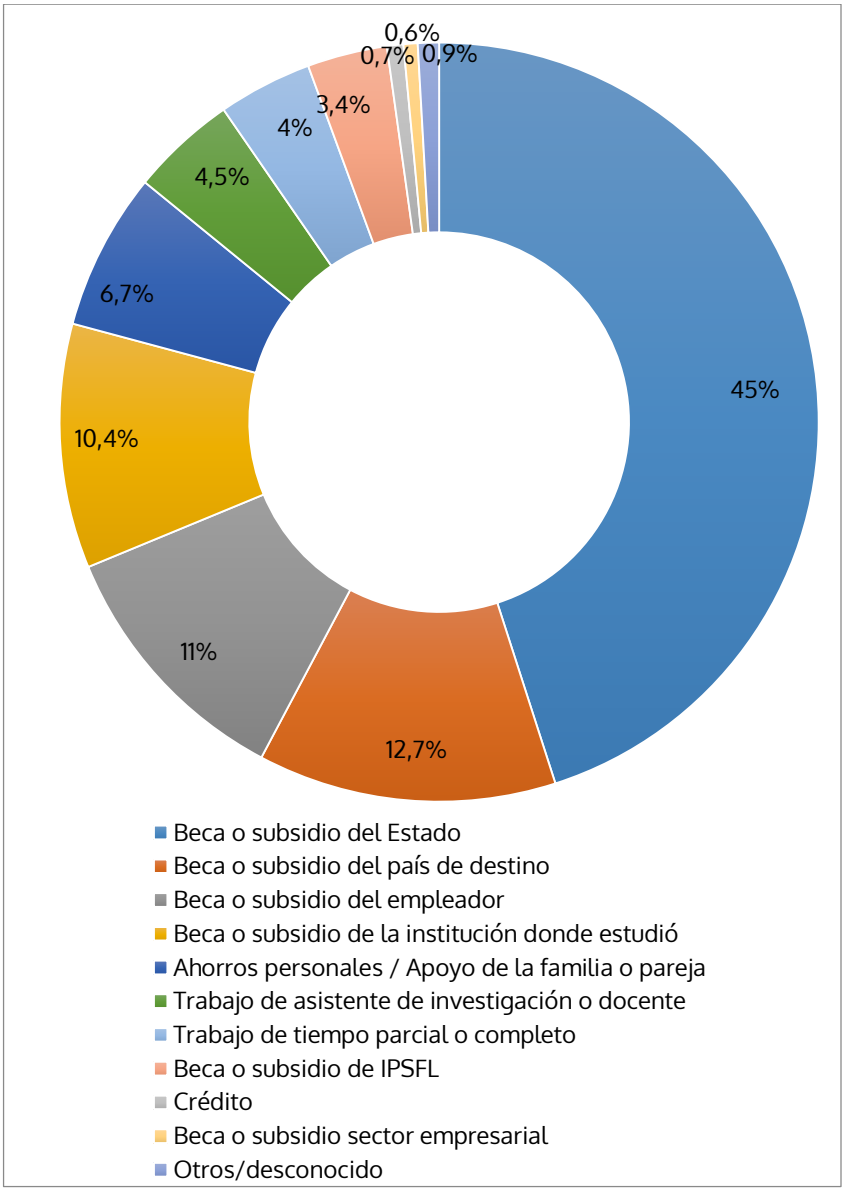
N° de doctores graduados en Australia, Canadá, Chile y Estados Unidos en áreas de ciencias e ingenierías (2012)*

País	Ciencias e Ingenierías	C&I por millón de habitantes	Total	Total por millón de habitantes
Chile	313	18	538	31
Australia	2.392	106	6.079	270
Estados Unidos	25.783	82	76.288	243
Canadá	3.295	95	5.906	170

Fuente: Elaboración propia a partir de datos obtenidos en OECD.stat

* Con excepción de Australia, donde solo se encontraron los datos para el año 2011

IV. Anexo 4: Fuente primaria de financiamiento de doctorado (2014)



Fuente: Elaboración propia a partir de datos de Ministerio de Economía Fomento y Turismo (2016)

Referencias

¡VAMOS!, 2018. ¡VAMOS! Focus and specific objectives. Obtenido de: http://vamos-project.eu/approach/.

Academia de Ingeniería de Chile, 2018. *Visión de Futuro de la Ingeniería y de los Ingenieros en Chile*, Santiago.

Advisory Council for Science Technology and Innovation, 2009. *The Role of PhDs in the Smart Economy*,

Agosin, M. et al., 2010. *La Era de la Productividad: Cómo Transformar las Economías Desde sus Cimientos* Banco Interamericano de Desarrollo, ed.,

Alta Ley, 2016. Relaves. Obtenido de: http://programaaltaley.cl/iniciativas/relaves/.

AMC Consultants, 2017. Long-term mine planning and the mine-planning process. Obtenido de: https://amcconsultants.com/experience/long-term-mine-planning-and-the-mine-planning-process/.

ANIP, 2016. Becas Chile, CONICYT y la nula existencia de programas de inserción. Obtenido de: https://anip.cl/tag/becas-conicyt/.

ANIP, 2018. *Inserción laboral de investigadores. Informe de resultados: 2da Encuesta de Inserción de Investigadores con Postgrado*,

Asian Development Bank, 2017. *Asian Development Bank Annual Report 2017*,

Auriol, L., 2010. *Careers of Doctorate Holders: Employment and Mobility Patterns*, Paris.

Australian Bureau of Statistics, 2017. Labour Force, Australia, Detailed, Quarterly.

Australian Mining, 2013. Mining industry spends $1.15 bn on training: report. Obtenido de: https://www.australianmining.com.au/news/mining-industry-spends-1-15-bn-on-training-report/.

Autor, D.H., 2015. Why Are There Still So Many Jobs? The History and Future of Workplace Automation. *Journal of Economic Perspectives*, 29(3), pp.3–30.

Banco Mundial & OCDE, 2011. *Revisión de Políticas Nacionales de Educación: Programa Becas Chile*,

Bell, M., 2010. *Innovation Capabilities and Directions of Development*, Brighton: STEPS Centre.

Benito, M. & Romera, R., 2013. *How to Boost the PhD Labour Market? Facts from the PhD System Side*, Madrid.

Borrel-Damian, L., Morais, R. & Smith, J.H., 2015. *Collaborative Doctoral Education in Europe: Research Partnerships and Employability for Researchers*, Brussels.

Boston Consulting Group, 2018. The New Technology Frontier in Mining. Obtenido de: https://www.bcg.com/publications/2018/new-technology-frontier-mining.aspx.

Bush, V., 1945. *Science, the endless frontier: A report to the President.*,

Caraça, J., Lundvall, B. & Mendonça, S., 2009. The changing role of science in the innovation process: From Queen to Cinderella?. Technological Forecasting and Social Change. *Technological Forecasting and Social Change*, 76(6), pp.861–867.

Centers for Disease Control and Prevention, 2015. Statistics: All Mining. Obtenido de: https://www.cdc.gov/niosh/mining/statistics/allmining.html.

CNE, 2018. Capacidad instalada de generación. *[base de datos]*. Obtenido de: https://www.cne.cl/estadisticas/electricidad/.

CNE, 2017. Valor de la energía más bajo en la historia de las licitaciones en Chile. Obtenido de: https://www.cne.cl/prensa/prensa-2017/11-noviembre-2017/valor-de-la-energia-mas-bajo-en-la-historia-de-las-licitaciones-en-chile/.

Cochilco, 2016. *Anuario de estadísticas del cobre y otros minerales 1997-2016*,

CODELCO, 2010. Este es el primer paso para la minería del siglo XXI. Obtenido de: https://www.codelco.com/este-es-el-primer-paso-para-la-mineria-del-siglo-xxi/prontus_codelco/2011-05-06/205829.html.

Colvin, G., 2019. Leading Ahead of Disruption: Value creation and the role of humans as technology revolutionizes mining. In *Automatización y Tecnología: oportunidades y desafíos*. Santiago: Seminario Consejo Minero 2019.

Comisión Nacional de Productividad, 2017. *Productividad en la Gran Minería del Cobre* Primera Ed., Santiago: Editorial Universitaria S.A.

Comte, D., 2018. Exploration & Ore Deposit Modeling. En *Coloquio Estimación de Recursos*. Santiago: Beauchef Minería.

Conexión Ingenieros, 2016. *Estudio de Sueldos de Ingenieros 2016 y Mercado Laboral*,

CONICYT, 2017. CONICYT Define Áreas de Interés Prioritario Para Magíster Becas Chile 2018. Obtenido de: http://www.conicyt.cl/becasconicyt/2017/11/21/conicyt-define-areas-de-interes-prioritario-para-magister-becas-chile-2018/.

CONICYT, 2018. Seleccionados Concurso. Obtenido de: http://www.conicyt.cl/becasconicyt/postulantes/seleccionados-concursos/.

Consejo de Competencias Mineras, 2017. *Fuerza Laboral de la Gran Minería Chilena 2017-2026: Diagnóstico y Recomendaciones*,

Corbo, V., 2018. Implicaciones para el mercado laboral de la inteligencia artificial y la robótica. In Santiago: FCFM Universidad de Chile.

Couston, A. & Pignatel, I., 2018. PhDs in business: Nonsense, or opportunity for both? *Global Business and Organizational Excellence*, 37(2), pp.49–58.

Cyranoski, D. et al., 2011. The PhD Factory. *Nature*, 472, pp.276–279.

Deloitte, 2013. *DMITRE ICT Roadmap for Minerals and Energy Resources: Industry Roundtable*,

Deloitte, 2017. *Rewriting the rules for the digital age: 2017 Deloitte Global Human Capital Trends*,

Deloitte, 2018. *The Rise of the Social Enterprise: 2018 Deloitte Global Human Capital Trends*,

Deming, D.J., 2017. *The Growing Importance of Social Skills in the Labor Market*, Cambridge.

Digitalist Magazine, 2017. Big Data Analytics: A Smarter Way To Mine. Obtenido de: https://www.digitalistmag.com/future-of-work/2017/10/11/big-data-analytics-smarter-way-to-mine-05384220.

Durrant-Whyte, H. et al., 2015. How digital innovation can improve mining productivity. *McKinsey & Company*, (November).

Emery, X., 2014. Exceso de ingenieros de minas producirá el sistema universitario chileno. Obtenido de: http://ingenieria.uchile.cl//u/preview/noticiaImp.jsp?id=103973&idDesktop=FCFM.

Emol, 2017. Escasas oportunidades: Conoce las carreras más saturadas en el mercado laboral chileno. Obtenido de: http://www.emol.com/noticias/Nacional/2017/12/29/889184/Conoce-las-carreras-con-mayores-indices-de-saturacion-en-el-mercado-laboral-chileno.html.

Energy and Mines, 2017. Mining Sector Embracing Microgrids: Hybrid Systems Reduce Energy Costs & Environmental Impact. Obtenido de: http://energyandmines.com/2017/09/mining-sector-embracing-microgrids-hybrid-systems-reduce-energy-costs-environmental-impact/.

Ensight, 2018. Richards Bay Minerals. Obtenido de: http://www.ensight.solutions/portfolio/richards-bay-minerals/.

Etzkowitz, H., 2003. Innovation in innovation: The Triple Helix of university-industry-government relations. *Social science information*, 42(3), pp.293–337.

Fixari, D. & Pallez, F., 2005. *Propositions pour favoriser l'emploi des docteurs: Rapport du groupe de travail sur l'emploi des docteurs- FutuRIS Président : Jean-Claude Lehmann*,

Frey, C.B. & Osborne, M.A., 2017. The future of employment: How susceptible are jobs to computerisation? *Technological Forecasting and Social Change*, 114, pp.254–280.

Funk, C., 2016. Bringing the benefits of mobile computing to the mining industry. *MINING.com*.

Global Mining Guidelines Group, 2019. What is GMG? Obtenido de: https://gmggroup.org/about-us/gmg/.

Gordon, R.J., 2016. *The Rise and Fall of American Growth: The US standard of living since the civil war*, Princeton University Press.

Hankel, I., 2017. 7 Advantages PhDs Have Over Other Job Candidates. Obtenido de: https://cheekyscientist.com/job-candidates/.

He, Z., 2014. Are CEOs With a Ph.D. More Innovative?

HSEC Magazine, 2016. Control de temperatura y humedad en la minería subterránea. Obtenido de: http://www.emb.cl/hsec/articulo.mvc?xid=865&edi=38&xit=control-de-.

Kim, L., 2000. The Dynamics of Technological Learning in Indutrialisation. *Discussion Paper Series. United Nations University, Institute for New Technologies*.

Kim, Y.K. & Lee, K., 2015. Different Impacts of Scientific and Technological Knowledge on Economic Growth: Contrasting Science and Technology Policy in East Asia and Latin America. *Asian Economic Policy Review*, 10(1), pp.43–66.

Komatsu, 2018. Longwall 3D Visualization. Obtenido de: https://mining.komatsu/technology/mining-intelligence/longwall-3d-visualization.

Manchón, F., 2018. Los Corredores Logísticos y la Transformación Digital como Catalizadores del Comercio y la Integración Regional. En *Conferencia CAF: Productividad e Innovación para el Desarrollo*. Bogotá.

Marine Well Containment Company, 2019. Membership. Obtenido de: https://www.marinewellcontainment.com/about-us/membership/.

Márquez, M.A. & Heyl Ch., V., 2010. El Sistema Bicentenario Becas Chile: Una Evaluación de la Política Pública de Formación de Capital Humano Avanzado 2006-2010.

Matysek, A.L. & Fisher, B.S., 2016. *Productivity and Innovation in the Mining Industry*, Canberra.

McKinsey, 2017. *Beyond the Supercycle: How Technology Is Reshaping Resources*,

McKinsey, 2015. *Digital America: A Tale of the Haves and Have-Mores.*,

McKinsey, 2018. Unlocking the digital opportunity in metals. , (January).

Meller, P., 2010. *Carreras Universitarias: Rentabilidad, Selectividad y Discriminación* Uqbar Editores, ed.,

Meller, P. & Gana, J., 2015. *El Cobre Chileno Como Plataforma de Innovación Tecnológica* .1era Edici., Santiago: CIEPLAN.

Meller, P. & Parodi, P., 2016. *La Importancia de la Capabilidad Tecnológica en el Mundo Global* CIEPLAN, ed., Santiago de Chile.

Meller, P. & Rappoport, D., 2003. *Comparaciones internacionales de la dotación de profesionales y la posición relativa chilena.*, Santiago de Chile: Centro de Economía Aplicada, Universidad de Chile.

El Mercurio, 2018. Se buscan doctores: tendencia mundial de integrar capital humano avanzado toma fuerza en Chile.

Minerals Council of Australia, 2017. *Annual Report 2016*,

Minerals Council of Australia, 2018. *Miners at Work*,

Minería Chilena, 2016. Automatización en Minería: Se avanza, pero falta más. , pp.1–9. Obtenido de: http://www.mch.cl/informes-tecnicos/automatizacion-en-mineria-se-avanza-pero-falta-mas/.

Mining.com, 2016. Bringing the benefits of mobile computing to the mining industry. Obtenido de: http://www.mining.com/web/bringing-the-benefits-of-mobile-computing-to-the-mining-industry/.

Mining.com, 2017. How technology is transforming the mining industry. Obtenido de: http://www.mining.com/web/technology-transforming-mining-industry/.

Mining Journal, 2019. Brazil bans upstream tailings dams. Obtenido de: https://www.mining-journal.com/politics/news/1356734/brazil-bans-upstream-tailings-dams.

Mining Magazine, 2018. IoT sensors to improve mine safety. Obtenido de: http://www.miningmagazine.com/sustainability/news/1332076/iot-sensors-to-improve-mine-safety.

Mining Technology, 2018a. A new dimension: bringing mine sites to life in 3D. Obtenido de: https://www.mining-technology.com/features/mine-visualisation-3d/.

Mining Technology, 2014. Five mobile apps for the 21st century miner. Obtenido de: https://www.mining-technology.com/features/featurefive-mobile-apps-for-the-21st-century-miner-4349777/.

Mining Technology, 2018b. Mind the gap: training mining workers for a digital future. , pp.1–12.

Ministerio de Economía Fomento y Turismo, 2016. Resultados Desagregados CDH. *[base de datos]*. Obtenido de: https://www.economia.gob.cl/2016/04/22/segunda-encuesta-trayectoria-de-profesionales-con-grado-de-doctor-cdh-ano-de-referencia-2014.htm.

Ministerio de Economía Fomento y Turismo, 2015. Resultados Desagregados CDH. *[base de datos]*. Obtenido de: https://www.economia.gob.cl/2015/02/23/primera-encuesta-trayectoria-de-profesionales-con-grado-de-doctor-cdh-ano-de-referencia-2011-2.htm.

Ministerio de Economía Fomento y Turismo, 2018. *VII Encuesta Nacional sobre Gasto y Personal en I+D. Resultados Preliminares*, Santiago.

Ministerio de Educación, 2018. Base Titulados Histórica 2007 a 2017. *[base de datos]*. Obtenido de: http://www.mifuturo.cl/bases-de-datos-titulados/.

Ministerio de Educación, 2017. Estadísticas por carrera. Obtenido de: http://www.mifuturo.cl/index.php/futuro-laboral/buscador-por-carrera.

MiPlan, 2018. Applications. Obtenido de: http://miplanconsulting.com/applications/

Muro, M. et al., 2017. *Digitalization and The American Workforce*,

Narayanamurti, V., Odumosu, T. & Vinsel, L., 2013. RIP: The Basic/Applied Research Dichotomy. *Issues in Science and Technology*, 29(2), pp.31–36.

National Academies of Sciences Engineering and Medicine, 2018. *Adaptability of the US Engineering and Technical Workforce: Proceedings of a Workshop*, Washington, D.C: The National Academies Press.

National Academy of Engineering, 2018. *Understanding the Educational and Career Pathways of Engineers*, Washington, D.C.

Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada, 2018. Canada Graduate Scholarships-Master's Program. Obtenido de: http://www.nserc-crsng.gc.ca/Students-Etudiants/PG-CS/CGSM-BESCM_eng.asp.

NBC News, 2017. Robots are replacing humans in the world's mines. Here's why. Obtenido de: https://www.nbcnews.com/mach/science/robots-are-replacing-humans-world-s-mines-here-s-why-ncna831631.

Nedelkoska, L. & Quintini, G., 2018. *Automation, skills use and training*, OECD, Paris.

OECD, 2017. *21st Century Skills: Learning for the Digital Age*,

OECD, 2011. *Education at a glance 2011: OECD Indicators*,

OECD, 2015. *Frascati Manual 2015: Guidelines for Collecting and Reporting Data on Research and Experimental Development. The Measurement of Scientific, Technological and Innovation Activities*, Paris: OECD Publishing.

OECD, 2016. Gross Domestic Spending on R&D. Obtenido de: https://data.oecd.org/rd/gross-domestic-spending-on-r-d.htm.

OECD, 2013. Patents by Technology.

Oliveira, M.B. de, 2014. Technology and basic science: the linear model of innovation. *Scientiae Studia*, 12(SPE), pp.129–146.

Palma, R., 2018. Solar Mining Project. In *Coloquio Energía y Minería*. Santiago: Beauchef Minería.

PriceWaterhouseCoopers, 2017. *Sizing the prize: What's the real value of AI for your business and how can you capitalise?*,

PwC, 2015. *A Smart Move*,

PwC, 2017. *We need to talk about the future of mining*,

Rio Tinto, 2018. Rio Tinto granted accreditation for AutoHaul project by rail regulator. Obtenido de: 180518_Rio_Tinto_granted_accreditation_for_AutoHaul_project_by_rail_regulator.

Rio Tinto, 2017a. Rio Tinto to expand autonomous fleet as part of $5 billion productivity drive. Obtenido de: https://www.riotinto.com/documents/171218_Rio_Tinto_to_expand_autonomous_fleet_as_part_of__5_billion_productivity_drive.pdf.

Rio Tinto, 2017b. Taking safety to new heights: A drone's-eye view of mining safety at Rio Tinto Kennecott. Obtenido de: https://www.riotinto.com/ourcommitment/spotlight-18130_22480.aspx.

Rio Tinto, 2016. Towards a low-carbon future: Rio Tinto recognises the challenge of climate change. Obtenido de: http://www.riotinto.com/ourcommitment/spotlight-18130_18725.aspx.

Rio Tinto, 2017c. What will the mining workforce of the future look like? Obtenido de: http://www.riotinto.com/ourcommitment/spotlight-18130_22976.aspx.

Robert Spence, 2015. Anglo American: Digging Smarter, not Harder. *Mining Global*, pp.6–13.

Romer, P., 2005. The arc of science. In *World Bank/CREI conference on 'R&D and Innovation in the Development Process. A New Look at Theory, Evidence and Policies'', Universitat Pompeu Fabra,.'* Barcelona.

Rosenberg, N., 1994. *Exploring the black box: Technology, economics, and history*, New York: Cambridge University Press.

Rull, V., 2014. The most important application of science: As scientists have to justify research funding with potential social benefits, they may well add education to the list. *EMBO reports*, 15(9), pp.919–922.

Safe Work Australia, 2018. Fatality statistics by industry. Obtenido de: https://www.safeworkaustralia.gov.au/statistics-and-research/statistics/fatalities/fatality-statistics-industry.

Santelices, B. & Lund, F., 2013. Innovación con Base Científica: Observaciones para el Análisis y la Formulación de Políticas Públicas. In B. Santelices et al., eds. *Innovación Basada en Conocimiento Científico*. Santiago: Academia Chilena de Ciencias, pp. 289–301.

Schwab, K., 2016. *The Fourth Industrial Revolution*, World Economic Forum.

Soto, F., 2018. Modelamiento rápido de recursos minerales y cuantificación de incertidumbre. En *Coloquio Estimación de Recursos*. Santiago: Beauchef Minería.

Stokes, D.E., 1997. *Pasteur's quadrant: Basic science and technological innovation.*, Brookings Institution Press.

The Guardian, 2016. Samarco dam collapse: one year on from Brazil's worst environmental disaster. Obtenido de: https://www.theguardian.com/sustainable-business/2016/oct/15/samarco-dam-collapse-brazil-worst-environmental-disaster-bhp-billiton-vale-mining.

The New Yorker, 2013. The New Science of Disaster Prediction. Obtenido de: https://www.newyorker.com/news/news-desk/the-new-science-of-disaster-prediction.

The Telegraph, 2016. Mobile web usage overtakes desktop for first time. Obtenido de: https://www.telegraph.co.uk/technology/2016/11/01/mobile-web-usage-overtakes-desktop-for-first-time/.

Townley, B., 2018. Recuperación de Elementos de Valor con Potencial Económico en Relaves Chilenos. En *Coloquio Relaves*. Santiago: Beauchef Minería.

World Economic Forum, 2016. The Fourth Industrial Revolution: what it means, how to respond. *World Economic Forum*, pp.1–7. Obtenido de: https://www.weforum.org/agenda/2016/01/the-fourth-industrial-revolution-what-it-means-and-how-to-respond/.

Yang, J.J. et al., 2015. Emerging information technologies for enhanced healthcare. *Computers in Industry*, pp.3–11.

Zimm, M., 2018. Four reasons tech companies should hire more PhDs—and not just computer scientists. Obtenido de: https://qz.com/work/1173128/four-reasons-tech-companies-should-hire-more-phds-and-not-just-computer-scientists/.

Beauchef
MINERÍA

Beauchef MINERÍA

Av. Beauchef N° 850, Santiago, Chile.

Teléfono: +562 29771000

contacto@beauchefmineria.cl

http://www.beauchefmineria.cl/

ISBN: 978-956-19-1128-4

10 amtc

CMM Center for Mathematical Modeling

fcfm Ingeniería de Minas

INGENIERÍA INDUSTRIAL UNIVERSIDAD DE CHILE