
Roadmap

para la Implementación
del **Hidrógeno Verde** en
la Minería de Chile y Perú
2023



SAMMI
CLÚSTER MINERO ANDINO

Esta publicación fue elaborada por
Corporación Alta Ley
SAMMI Clúster Minero Andino



Primera edición
Santiago, 2023

Directorio Roadmap

Fernando Lucchini
Benjamín Quijandria
Elena Moreno
Daniel Escalante
Jairo Tiusabá
Ignacio Pérez
Luca Tagini
Carlos Correa
Alvaro Baeza
Milton Rosales
Marcos Cid
Andrés Alonso
Felipe Toro
Gonzalo Ramírez
Milton Valdés
Luis Arce
Pedro Estatuet
Ricardo Arce
Renzo Macher

Equipo de redacción y desarrollo de contenidos

Corporación Alta Ley
Fernando Lucchini
Elena Moreno
Guillermo Olivares
Katrina Matamala
Jorge Barrios
Daniel Cattaneo
SAMMI Clúster Minero Andino
Benjamín Quijandría
Daniel Escalante

Diseño y diagramación

Estudio BAJBUJ



Fernando Lucchini

*Presidente Ejecutivo
Corporación Alta Ley*

En el marco del Acuerdo de París, tanto Chile como Perú han adquirido compromisos – particularmente ambiciosos y ejemplificadores – con el fin de lograr los objetivos globales de desarrollo sostenible. En consecuencia, y como caso emblemático de la capacidad de nuestros ecosistemas de liderar en ciertos sectores económicos a nivel mundial, estos objetivos tienen su bajada en nuestros sectores mineros, líderes en producción de minerales como cobre, molibdeno, litio, plata, zinc y otros, considerados críticos para el desarrollo tecnológico y la transición hacia la carbono-neutralidad.

Consecuentemente, la minería de ambos países ha definido metas de descarbonización en el corto, mediano y largo plazo con el fin de producir minerales de manera crecientemente sustentable y amigable con el medioambiente y sus comunidades, enfrentando los desafíos de la crisis climática y cumpliendo con las exigencias de los mercados internacionales. Aceptando, de facto, una doble misión: la de avanzar hacia la carbono-neutralidad, al mismo tiempo que se aumenta la producción de minerales críticos para hacer frente a la batalla contra el cambio climático.

En esta búsqueda de opciones que permitan desarrollar procesos mineros más bajos en emisiones, dadas las inmejorables condiciones de radiación y viento para generar energía limpia, sumado a la cercana disponibilidad de agua salada en la región – en la medida que, como ecosistemas, podamos hacer de su competitividad un hecho tangible e inapelable – el hidrógeno verde se presenta como una alternativa protagónica. Ello, en consideración de los múltiples beneficios que representa, dado que no emite gases contaminantes, constituye un vector energético versátil que puede transformarse en electricidad o combustibles sintéticos, y posee además otras aplicaciones con fines domésticos, comerciales o industriales.

En esta línea, durante los años 2021 y 2022, desde Corporación Alta Ley, de Chile, y SAMMI Clúster Minero Andino de Perú, avanzamos en el desafío de generar un roadmap binacional para la adopción del hidrógeno verde en minería. Trabajando en este proceso con el gobierno, las compañías mineras, proveedores tecnológicos y la academia, entre otros actores y sectores de los ecosistemas de ambos países, en ejes tales como: la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero directas e indirectas de la minería, iniciativas habilitantes para el desarrollo del hidrógeno verde en infraestructura, cadena de suministro, regulaciones, capital humano y pilotajes, entre otros. ¿El resultado? Un documento con una visión de consenso y la identificación de desafíos a corto, mediano y largo plazo para hacer efectiva la implementación de tecnologías de hidrógeno verde en la minería; desde el desarrollo de pilotajes de las tecnologías mapeadas, hasta la consecuente adopción y penetración potencial estimada para estas tecnologías en nuestras operaciones.

Desde Alta Ley, con el documento que aquí comienza, promovemos con determinación la habilitación de conversaciones y acuerdos entre los distintos entes públicos y privados, para la implementación de las iniciativas identificadas, y la concreción de las gobernanzas y el financiamiento necesarios para el desarrollo de las distintas líneas de trabajo acordadas entre todos los actores. Asimismo, estamos convencidos de que la visión de “convertir a las industrias mineras de Chile y Perú en el principal hub minero carbono neutral del mundo” no sólo representa los grandes desafíos aquí plasmados, sino que constituye una oportunidad única para el desarrollo de largo plazo de nuestra región Andina, aportando a la vez desde nuestros países a la descarbonización del planeta y a un mejor futuro para las nuevas generaciones.

Benjamín Quijandría Díaz

*Director Ejecutivo
SAMMI Clúster Minero Andino*

El presente “Roadmap Binacional para la Implementación del Hidrógeno Verde en la Minería del Perú y Chile” es el resultado del trabajo colaborativo, durante más de un año, en el que han participado los principales actores de los ecosistemas mineros y de proveedores de ambos países, dentro de los que se puede destacar a diez empresas mineras, con operaciones en ambos países, y que formaron parte del comité ejecutivo del proyecto. También colaboraron empresas proveedoras, gremios, instituciones de gobierno, consultoras, la academia, entre otras organizaciones. El objetivo del proyecto ha sido construir una hoja de ruta que permita aprovechar las ventajosas condiciones geográficas y climáticas del sur del Perú y norte de Chile para ser productores competitivos de hidrogeno verde, y en paralelo, generar una demanda base desde la industria minera y avanzar hacia su descarbonización.

Creemos que este proyecto constituye un hito, ya que es la primera iniciativa binacional de este tipo y nos pone en la vanguardia como países que ponen en agenda la transición energética y las metas de carbono neutralidad con las que se han comprometido tanto el Perú como Chile al año 2050. También es importante señalar que hemos planteado este roadmap como un proceso continuo, es decir, el trabajo no termina con la publicación del presente documento, sino que más bien comienza con las iniciativas que se proponen y que tenemos como tarea, especialmente de las instituciones que hemos liderado esta hoja de ruta, SAMMI – Clúster Minero Andino y la Corporación Alta Ley, de impulsar en los próximos meses y años, la implementación de pilotos y proyectos concretos que traccionen la demanda del hidrogeno en el sector.

Hemos encontrado oportunidades muy interesantes en la movilidad y transporte, así como en otros procesos mineros, y también en la cadena de suministro, en los que son los núcleos traccionantes, y que permitirán avanzar en la mitigación de los alcances 1 y 3 de la huella de carbono del sector. Así mismo, hemos identificado las áreas habilitantes que será necesario desarrollar para avanzar con los objetivos planteados, entre los que están temas de infraestructura y cadena de suministro, gobernanza y financiamiento, capital humano, políticas públicas y mediana minería.

Estamos convencidos que este esfuerzo es un importante insumo para la carrera de la descarbonización de la minería, y nos permite avanzar hacia la visión compartida que definimos en el roadmap, y que es convertir al sector minero del Perú y Chile en un polo minero carbono neutral, que impulse la industria del hidrogeno verde, la investigación y desarrollo y genere mayor prosperidad en la región andina.

Jorge Riesco Valdivieso

Presidente
SONAMI

Las implicancias derivadas del cambio climático y la aceleración de sus efectos a nivel global, han llevado a tomar una mayor conciencia sobre la necesidad de avanzar en las estrategias de descarbonización de los sistemas productivos, e introducir las transformaciones necesarias para lograr una matriz energética sustentable y competitiva, aspecto que tanto Chile como Perú han decidido enfrentar.

Debido a la envergadura y el alcance de estas transformaciones, y comprendiendo que se trata de un desafío como país y que involucra a los diferentes sectores productivos, resulta fundamental poder contar con lineamientos y orientaciones que contribuyan a focalizar los esfuerzos en un entorno de cooperación público - privada.

La electromovilidad y la sustitución de energía proveniente de combustibles fósiles están provocando una demanda creciente por minerales metálicos y no metálicos. Pero, al mismo tiempo, la producción de estos minerales significa mayores niveles de emisiones de gases de efecto invernadero, si se sigue produciendo con las actuales tecnologías. En este escenario, la mayor disponibilidad de minerales a nivel global pasa por buscar alternativas tecnológicas para reducir la huella de carbono de las operaciones mineras, y es aquí donde el hidrógeno verde resulta un factor clave.

Así, frente al desafío de descarbonización que plantea el cambio climático a la industria minera y a los compromisos ya asumidos por ambos países en este ámbito, el “Roadmap para la Implementación del Hidrógeno Verde en la Minería de Chile y Perú” constituye una herramienta fundamental para avanzar de manera efectiva en el cumplimiento de los objetivos y temas propuestos y en las transformaciones necesarias en los ecosistemas mineros de Chile y Perú.

Este roadmap entrega una visión comprensiva sobre el rol estratégico del hidrógeno verde en la reducción de las emisiones de GEI de Alcance 1 y 3 del sector minero de Chile y Perú, así como un gran número de aspectos claves para avanzar en su desarrollo. En este sentido, es importante destacar que, en conjunto, ambos países producen anualmente del orden de 8 millones de toneladas de cobre, constituyéndose en el área geográfica de mayor producción en el mundo (38% de la producción mundial).

La relevancia de Chile y Perú en la producción de cobre a nivel global plantea las condiciones excepcionales para el desarrollo del hidrógeno verde, a través de la instalación de nuevas capacidades tecnológicas y competencias en ambos países. Para enfrentar este desafío, el roadmap es también una herramienta clave que permite focalizar los esfuerzos en los factores críticos asociados a los 3 núcleos traccionantes: movilidad y transporte; aplicaciones en procesos mineros; y emisiones de alcance 3 de los proveedores, y a los 5 núcleos habilitantes, entre los que destacamos la infraestructura habilitante y cadena de suministro, y la formación de capital humano.

Como industria minera, valoramos este trabajo de sistematización y priorización liderado por la Corporación Alta Ley y SAMMI Cluster Minero Andino, que nos entrega un camino a seguir donde, sin duda, es fundamental actuar en forma coordinada y promover la colaboración y la asociatividad entre los diferentes actores involucrados. De esta forma, lograremos una minería más sustentable y competitiva, tanto en Chile como Perú, que da respuesta a los desafíos de nuestros tiempos.

Joaquín Villarino Herrera

Presidente Ejecutivo

Consejo Minero

Las implicancias derivadas del cambio climático y la aceleración de sus efectos a nivel global, han llevado a tomar una mayor conciencia sobre la necesidad de avanzar en las estrategias de descarbonización de los sistemas productivos, e introducir las transformaciones necesarias para lograr una matriz energética sustentable y competitiva, aspecto que tanto Chile como Perú han decidido enfrentar.

Debido a la envergadura y el alcance de estas transformaciones, y comprendiendo que se trata de un desafío como país y que involucra a los diferentes sectores productivos, resulta fundamental poder contar con lineamientos y orientaciones que contribuyan a focalizar los esfuerzos en un entorno de cooperación público - privada.

La electromovilidad y la sustitución de energía proveniente de combustibles fósiles están provocando una demanda creciente por minerales metálicos y no metálicos. Pero, al mismo tiempo, la producción de estos minerales significa mayores niveles de emisiones de gases de efecto invernadero, si se sigue produciendo con las actuales tecnologías. En este escenario, la mayor disponibilidad de minerales a nivel global pasa por buscar alternativas tecnológicas para reducir la huella de carbono de las operaciones mineras, y es aquí donde el hidrógeno verde resulta un factor clave.

Así, frente al desafío de descarbonización que plantea el cambio climático a la industria minera y a los compromisos ya asumidos por ambos países en este ámbito, el “Roadmap para la Implementación del Hidrógeno Verde en la Minería de Chile y Perú” constituye una herramienta fundamental para avanzar de manera efectiva en el cumplimiento de los objetivos y temas propuestos y en las transformaciones necesarias en los ecosistemas mineros de Chile y Perú.

Este roadmap entrega una visión comprensiva sobre el rol estratégico del hidrógeno verde en la reducción de las emisiones de GEI de Alcance 1 y 3 del sector minero de Chile y Perú, así como un gran número de aspectos claves para avanzar en su desarrollo. En este sentido, es importante destacar que, en conjunto, ambos países producen anualmente del orden de 8 millones de toneladas de cobre, constituyéndose en el área geográfica de mayor producción en el mundo (38% de la producción mundial).

La relevancia de Chile y Perú en la producción de cobre a nivel global plantea las condiciones excepcionales para el desarrollo del hidrógeno verde, a través de la instalación de nuevas capacidades tecnológicas y competencias en ambos países. Para enfrentar este desafío, el roadmap es también una herramienta clave que permite focalizar los esfuerzos en los factores críticos asociados a los 3 núcleos traccionantes: movilidad y transporte; aplicaciones en procesos mineros; y emisiones de alcance 3 de los proveedores, y a los 5 núcleos habilitantes, entre los que destacamos la infraestructura habilitante y cadena de suministro, y la formación de capital humano.

Como industria minera, valoramos este trabajo de sistematización y priorización liderado por la Corporación Alta Ley y SAMMI Cluster Minero Andino, que nos entrega un camino a seguir donde, sin duda, es fundamental actuar en forma coordinada y promover la colaboración y la asociatividad entre los diferentes actores involucrados. De esta forma, lograremos una minería más sustentable y competitiva, tanto en Chile como Perú, que da respuesta a los desafíos de nuestros tiempos.

Raúl Pérez Reyes Espejo

Ministro de la Producción
PRODUCE

Actualmente el mundo se encuentra atravesando diferentes retos ambientales que, como es lógico repercuten directamente sobre la economía. Uno de dichos problemas, quizá el que más retos nos plantea, es el cambio climático. Frente a ello, resulta esencial reducir las fuentes de emisión de gases de efecto invernadero, mediante el uso de energías limpias en los diferentes procesos productivos y actividades cotidianas.

En dicho contexto el Perú no puede estar al margen del cambio climático, por lo que debe orientar sus esfuerzos y estrategias hacia la generación y empleo de energías renovables y limpias, como es el hidrógeno verde.

La Organización de las Naciones Unidas para el Desarrollo Industrial (ONUDI) ha venido trabajando desde julio de 2021 un Programa Global para Hidrógeno Verde en la Industria, que ha sido impulsado con el apoyo de los gobiernos de Alemania, Austria, Italia y el Centro de Energía Internacional de Hidrogeno en China, con el propósito de fomentar la aplicación del hidrógeno verde en la industria, en países en desarrollo y economías en transición; la cual consideramos es una iniciativa internacional que se alinea al enfoque ambiental que promovemos en las industrias manufactureras en Perú.

En línea con ello desde el Ministerio de la Producción, junto con el Ministerio del Ambiente, venimos implementando la Hoja de Ruta hacia una Economía Circular en el Sector Industria, con la cual se busca promover y fomentar la transición progresiva de las industrias de un modelo económico lineal de producción a uno circular, incentivando la innovación, buenas prácticas, optimización de procesos productivos, entre otros beneficios. En ese sentido, la aplicación del hidrógeno verde puede ayudar al cumplimiento de los fines de la Hoja de Ruta, toda vez que esta busca promover la economía circular, por medio de la eficiencia de recursos y producción más limpia, la implementación de tecnologías con bajas emisiones de carbono, tecnologías limpias y buenas prácticas ambientales.

Lo antes comentado, se alinea a la propuesta del “Roadmap para la implementación del Hidrógeno Verde en la Minería de Chile y Perú”, la cual busca articular esfuerzos para promover el impulso de una industria de hidrógeno verde y a la vez contribuir a mitigar la huella de carbono del sector minero, que a nivel global tiene metas muy ambiciosas para alcanzar la carbono neutralidad. Si bien el roadmap tiene un enfoque orientado a la actividad minera, consideramos que, en atención a los encadenamientos productivos intersectoriales, los beneficios de este documento irradiarán no solo a las actividades mineras, sino también a otras actividades económicas, como es el caso de las industrias manufactureras, lo que podría impulsar su descarbonización.

En tal sentido, creemos que el roadmap representa un avance importante con elementos concretos de cómo debemos avanzar a nivel país respecto del desarrollo del hidrogeno verde, siendo un aspecto esencial para la promoción de esta energía limpia, lo que impulsará las iniciativas que en el Perú podamos tener para impulsar el hidrogeno verde, apuntando en la misma línea junto con países hermanos como Chile y el mundo.

Philippe Hemmerding Cubillos

Presidente
APRIMIN

Estos últimos años hemos vivido cambios impresionantes, por mencionar algunos, tales como la transformación digital, acelerada por el COVID-19; las aplicaciones de inteligencia artificial generativa para resolver problemas o tareas repetitivas (ChatGPT3); la conversión a energías limpias (eólica y solar) y por supuesto la electromovilidad que se acelera de manera exponencial. Todos estos cambios tecnológicos van por supuesto asociados a la necesidad y demanda de materias primas, metálicas y no metálicas, tales como el cobre, plata, oro, tierras raras, litio y otros. En el contexto mundial, Perú y Chile tienen mucho que decir respecto del abastecimiento de estas materias primas y un factor diferenciador será que estos elementos provengan de yacimientos que generen productos de manera sustentable. No es posible imaginar una fábrica de vehículos de alta gama, que se jacte de producir vehículos eléctricos de manera sustentable, sin asegurar que sus materias primas también lo sean. Aquí cobran mucha importancia las políticas ESG (medioambientales, sustentabilidad y gobernanza), que van en el camino correcto para lograr una producción con el menor impacto posible en la huella de carbono y en el medioambiente.

Si realmente creemos que la solución al cambio climático vendrá de las energías renovables y de la electromovilidad y que Perú y Chile podemos ser parte importante de la respuesta a ese desafío, entonces tenemos que trabajar fuerte y unidos en ese objetivo. Este roadmap para la implementación del hidrógeno verde en Perú y Chile es una iniciativa conjunta de la Corporación Alta Ley de Chile y del SAMMI, Cluster Minero Andino del Perú. En él se han definido, objetivos de corto plazo del 2023 al 2026 y largo plazo del 2027 al 2030, con foco en la reducción de emisiones de carbono de alcance 3, mediante la aplicación de hidrógeno verde en movilidad y transporte, que generan un alto impacto en la huella de carbono y la búsqueda de aplicaciones en otros procesos.

La cercanía al mar en nuestras largas costas y la abundancia de energía solar en el sur del Perú y el norte de Chile, proveen de grandes ventajas para la generación de hidrólisis que produce el hidrógeno verde. La tecnología seguirá avanzando y permitirá reducir los costos de producción, almacenamiento y transporte de las células de hidrógeno, en este camino, esperamos que este roadmap conjunto contribuya a prepararnos para un futuro más sustentable en nuestras operaciones, ya que a través de él se persigue entregar lineamientos, facilitar la coordinación de los esfuerzos, orientar la focalización y asignación de los recursos humanos y financieros, y especialmente, estimular la creación de un espacio de colaboración público y privado.

Para APRIMIN, como asociación representativa de los proveedores mineros Chilenos, la búsqueda de la reducción de la huella de carbono de alcance 3, que es la que generamos los proveedores, es tarea fundamental para lograr la sustentabilidad de la industria y el trabajo colaborativo como este roadmap, es el camino correcto para lograr ese objetivo.

Pedro José Grijalba Luna

*Presidente
METS Perú*

El presente “Roadmap Binacional para la Implementación del Hidrógeno Verde en la Minería del Perú y Chile” es una iniciativa que se suma a la búsqueda global de una minería sostenible, que también refuerza el cumplimiento de los ODS y que permite alinear a ambas naciones en un lenguaje y conceptos adaptados a la realidad latinoamericana que resultan claves para la implementación y como guía.

METS Perú, como asociación que fomenta el desarrollo de tecnología, equipamiento y servicios para el sector minero, se compromete a colaborar y participar con las iniciativas propuestas en el documento, siendo uno de nuestros propósitos realizar el desarrollo del sector de una manera sostenible y a favor del medio ambiente.

Creemos que este roadmap representa una fuente de oportunidades e inspiración para las empresas proveedores del sector, que permitirán la creación de nuevas propuestas de valor en torno a las necesidades y problemáticas que surjan a partir de la implementación del Road Map y también oportunidades de colaboración entre proveedores peruanos y chilenos para desarrollar tecnología que atienda estas nuevas necesidades del mercado.

Desde METS Perú estamos convencidos que este roadmap representará un hito para la descarbonización de la minería en Latinoamérica, donde la transición energética de las mineras es un actor fundamental para una minería más verde y sostenible, y donde los proveedores también nos comprometemos a implementar las mejores prácticas y esfuerzos en la reducción de la huella de carbono de nuestras operaciones, contribuyendo de manera integral a la reducción de la huella de carbón y mitigando los impactos ambientales en búsqueda de una transición a fuentes de energía eficiente y verde.

Marcos Kulka

*Director Ejecutivo
Asociación Chilena de Hidrógeno*

El hidrógeno verde es una de las respuestas ante la urgencia de la crisis climática, ofreciendo una alternativa de bajas emisiones a los combustibles fósiles y materias primas derivadas de estos, lo cual aportará decididamente a todos los esfuerzos que estamos haciendo como sociedad para detener el calentamiento global y de esta manera, poder contener sus efectos catastróficos.

De acuerdo con cifras del Ministerio de Energía, Chile tiene un potencial de 2.150 GW de generación de energía en base a fuentes renovables, equivalente a 76 veces la capacidad eléctrica instalada del país en el año 2021. Esto permitiría el desplazamiento del uso de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo o el gas natural que son los responsables de las emisiones de gases de efecto invernadero.

Las energías renovables son el recurso fundamental para la producción de hidrógeno verde y sus derivados, por lo que, esta industria es por su naturaleza, una actividad productiva compatible con el cuidado del medio ambiente en nuestros territorios. Este tipo de hidrógeno representa el 24% de los compromisos de descarbonización de Chile al 2050

La Política Nacional de Minería del Gobierno de Chile propone una serie de medidas para poder lograr la carbono neutralidad en el sector, dentro de las cuales se destaca el uso de tecnologías cero emisiones en sus flotas operacionales, ya sea para vehículos de pasajeros y para aquellos enfocados al traslado de carga. En este contexto, el hidrógeno verde puede tomar un rol clave, considerando el potencial que tiene para ser utilizado como energético en diversos procesos de la actividad minera. Asimismo, el uso de derivados del hidrógeno, como es el amoníaco verde también tiene un potencial para ser utilizado como insumo para explosivos y contribuir con la descarbonización de la industria minera.

Para el despliegue de una industria minera que sea motor y ejemplo de transformaciones urgentes a escala nacional e internacional, el “Roadmap para la implementación del Hidrógeno verde en la Minería de Chile y Perú”, se convierte en un insumo clave para apoyar la materialización de la industria del hidrógeno aplicada a la minería. En concreto, esta hoja de ruta considera un diagnóstico y dimensionamiento de oportunidades identificando principalmente variables como consumo energético en los procesos mineros, emisiones generadas y costo actual de la producción y transporte de H₂V en diferentes escenarios. Además, de proponer una serie de objetivos estratégicos, junto con metas tangibles, orientadas al logro con plazos establecidos que ayudaran sin lugar a duda al desarrollo del ecosistema del Hidrógeno para Chile y Perú.

Daniel Cámac Gutiérrez

Presidente

H2 Perú

El Acuerdo de París adoptado en la Conferencia sobre el Clima de París (COP21) en 2015 establece como meta limitar el calentamiento global a 1,5 °C. Ante este contexto, el Perú se ha comprometido a que sus emisiones netas de gases de efecto invernadero no excedan los 208,8 Mt CO₂eq en el 2030 (meta no condicionada) y hasta 179,0 MtCO₂eq (meta condicionada).

El sector minero es responsable del 4% al 7% de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial, del 2,4% en Perú (con excepción de combustibles) según el inventario nacional del 2016. En el último tiempo ha experimentado un aumento de la presión para reducir sus impactos, y reforzar los criterios ambientales, sociales y de gobernanza para la ejecución de proyectos, el otorgamiento de permisos y financiamiento.

Ante el desafío del sector minero, y el de otros sectores difíciles de descarbonizar, y conociendo el alto potencial renovable del Perú, se ha creado en febrero del 2021 H2 Perú, Asociación Peruana de Hidrógeno. La asociación sin fines de lucro impulsa la descarbonización de la economía a través del uso del hidrógeno verde, para un crecimiento resiliente y sostenible del país.

Desde su creación, H2 Perú ha liderado múltiples iniciativas, generando el ecosistema nacional y colaborando con actores clave nacionales e internacionales para impulsar esta industria en el país. Ha realizado ciclos de capacitación abiertos en aspectos técnicos y de mercado, apoyado a los asociados para la concepción y desarrollo de proyectos piloto de producción y adopción de hidrógeno. También ha propuesto una Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde del Perú a 2050, publicado Bases y Recomendaciones para la elaboración de la Estrategia Nacional del H2 Verde en Perú y propuesto un Proyecto de Ley de Promoción del Hidrógeno Verde, mismo que fue ingresado al Congreso de la República en octubre de 2022.

La publicación del Roadmap para la Implementación del Hidrógeno Verde en la Minería de Chile y Perú contribuye a dar mayor claridad para la adopción de este energético en la industria minera de ambos países. También, representa un instrumento de apoyo para que H2 Perú continúe con el trabajo de habilitación del hidrógeno verde en el Perú. La identificación de núcleos traccionantes y habilitantes propone una ruta, y valiosas ideas, sobre cómo podríamos avanzar a nivel del sector minero tanto en Perú como en Chile.

Desde H2 Perú, estamos comprometidos con el desarrollo de esta palanca de descarbonización y estamos convencidos de que es una pieza clave para un futuro sostenible. Asimismo, continuaremos impulsando su adopción en la minería peruana para descarbonizar el transporte, materias primas y procesos.



Resumen

El presente documento corresponde al resultado final del proceso de co-diseño de la hoja de ruta (o “Roadmap”), para la adopción e implementación del hidrógeno verde para la industria minera de Chile y Perú, el cual tiene como objetivo principal, servir como eje estructurante de la futura incorporación del hidrógeno verde (H2V) en la minería de ambos países.

Esta hoja de ruta busca asimismo facilitar el encadenamiento productivo necesario en el camino hacia la utilización de energías renovables, para dos países que tienen como objetivo lograr la carbono neutralidad, a través de un desarrollo sostenible.

Este proceso de planificación estratégica se desarrolló a través de jornadas colaborativas con los principales actores del ecosistema, asegurando la participación del mundo público, privado, productivo y académico, entre otros actores claves asociados a la industria.

Inicialmente se realizó un diagnóstico del desempeño competitivo del sector y un mapeo actualizado de los actores y los recursos con los que actualmente se cuenta en las localidades del norte de Chile y sur del Perú. Posteriormente, se realizó el levantamiento de una línea de base y de las principales condiciones para el desarrollo de valles de hidrógeno, buscando sistematizar los antecedentes principales que ayudaron al proceso participativo de co-creación de una visión regional del hidrógeno verde, tomando como base la situación actual y las brechas existentes.

Posteriormente, en base a los hallazgos y la identificación de brechas y necesidades detectadas, se definió y validó la “Visión Compartida”, “Valores Esenciales” y “Objetivos”, los cuales enmarcan, guían y estimulan el proceso colaborativo del Roadmap.

Por último, utilizando metodologías de planificación participativa, se definieron iniciativas estratégicas, soluciones (líneas de I+D+i) y plazos a partir del levantamiento de brechas tecnológicas, para hacer efectiva la visión y objetivos definidos.

Tabla de contenido

1. Introducción	19
2. Objetivos y alcance	23
3. Línea base para la hoja de ruta	25
3.1 Introducción	25
3.2 Principales antecedentes	26
3.2.1 Chile: Producción, consumos energéticos y emisiones	26
3.2.2 Perú: Producción, consumos energéticos y emisiones	29
3.2.3 Oportunidades de aplicación del H2V en la minería	31
3.2.4 Alternativas al hidrógeno para descarbonizar emisiones en minería	31
3.2.5 Competitividad del H2V vs BaU y alternativas cero carbono	33
3.3 Potencial uso de H2V en la minería	35
3.3.1 Proyección de emisiones de GEI en Chile y Perú al 2030	35
3.3.2 Estimación del potencial uso de H2V en la minería en Chile e inversión en capacidad de electrólisis asociada	36
3.3.3 Estimación del potencial uso de H2V en la minería en Perú e inversión en capacidad de electrólisis asociada	37
3.4 Iniciativas públicas y privadas en torno al H2V	39
3.4.1 Proyectos del ecosistema global del H2V	39
3.4.2 Chile	43
3.4.3 Perú	52
4. Contexto y alcance de la hoja de ruta	57
4.1 Descripción del proceso	57
4.2 Directorio y participación cadena de valor	58
4.3 Alcance y marco de acción	60
4.4 Visión y valores esenciales	62
4.4.1 Visión compartida	62
4.4.2 Valores esenciales	63
4.5 Metas de la hoja de ruta	64
4.6 Núcleos traccionantes y habilitantes	65
5. Núcleos traccionantes	67
5.1 Núcleo traccionante 1 (NT1): Movilidad y Transporte	67
5.1.1 Descripción	67
5.1.2 Brechas que aborda	68
5.1.3 Iniciativas y plazos	69
5.2 Núcleo traccionante 2 (NT2): Aplicaciones de H2V en otros procesos mineros	70
5.2.1 Descripción	70

5.2.2	Brechas que aborda	70
5.2.3	Iniciativas y plazos	70
5.3	Núcleo traccionante 3 (NT3): Reducción de emisiones de alcance 3 en la cadena de suministro de la minería (EA3)	71
5.3.1	Descripción	71
5.3.2	Brechas que aborda	72
5.3.3	Iniciativas y plazos	73
6.	Núcleos habilitantes	75
6.1	Núcleo habilitante 1 (NH1): Infraestructura y cadena de suministro	75
6.1.1	Descripción	75
6.1.2	Brechas que aborda	75
6.1.3	Iniciativas y plazos	77
6.2	Núcleo habilitante 2 (NH2): Gobernanza y financiamiento	78
6.2.1	Descripción	78
6.2.2	Brechas que aborda	78
6.2.3	Iniciativas y plazos	78
6.3	Núcleo habilitante 3 (NH3): Capital humano	80
6.3.1	Descripción	80
6.3.2	Brechas que aborda	80
6.3.3	Iniciativas y plazos	81
6.4	Núcleo habilitante 4 (NH4): Regulaciones, políticas, permisos y estandarización	82
6.4.1	Descripción	82
6.4.2	Brechas que aborda	82
6.4.3	Iniciativas y plazos	83
6.5	Núcleo habilitante 5 (NH5): Mediana minería	84
6.5.1	Descripción	84
6.5.2	Brechas que aborda	84
6.5.3	Iniciativas y plazos	84
7.	Iniciativas tecnológicas priorizadas y líneas de I+D+i	87
7.1	Núcleo traccionante 1 (NT1): Movilidad y Transporte	87
7.2	Núcleo traccionante 2 (NT2): Aplicaciones de H2V en otros procesos mineros	89
7.3	Núcleo traccionante 3 (NT3): Reducción de emisiones de alcance 3 en la cadena de suministro de la minería (EA3)	89
8.	Glosario de términos técnicos	93

Índice de tablas

Tabla 3-1	Procesos mineros, posibles aplicaciones del H2V y alternativas cero carbono	32
Tabla 3-2	Porcentajes de penetración del H2V considerados para distintas aplicaciones en minería de Chile y Perú (2030)	37
Tabla 3-3	Proyecto nuGen™ de Anglo American (CAEX a H2V)	41
Tabla 3-4	Descarbonización de suministro energético mediante H2V	41
Tabla 3-5	Generación eléctrica de respaldo Mina Raglan, Canadá	42
Tabla 3-6	Reemplazo de 10 buses diésel por celdas de combustible de H2V	43
Tabla 3-7	Resumen de las principales iniciativas en torno al H2V en Chile	44
Tabla 3-8	Proyectos adjudicados por el Fondo CORFO	46
Tabla 3-9	Empresas adjudicadas con co-financiamiento de la AGCID	47
Tabla 3-10	Proyecto HyEx (fase piloto)	50
Tabla 3-11	Pilotaje de grúa horquilla en sitio minero Las Tórtolas	50
Tabla 5-1	Brechas del núcleo traccionante NT1 “Movilidad y Transporte”	68
Tabla 5-2	Iniciativas estratégicas y líneas de I+D núcleo traccionante NT1 “Movilidad y Transporte”	69
Tabla 5-3	Brechas del núcleo traccionante NT2 “Aplicaciones de H2V en otros procesos mineros”	70
Tabla 5-4	Iniciativas estratégicas y líneas de I+D núcleo traccionante NT2 “Aplicaciones en otros procesos mineros”	71
Tabla 5-5	Brechas del núcleo traccionante NT3 “Reducción de emisiones de alcance 3 (EA3)”	72
Tabla 5-6	Iniciativas estratégicas y líneas de I+D núcleo traccionante NT3 “Reducción de emisiones de alcance 3 en la cadena de suministro de la minería (EA3)”	73
Tabla 6-1	Brechas del núcleo habilitante NH1 “Infraestructura y cadena de suministro”	76
Tabla 6-2	Iniciativas estratégicas y líneas de I+D núcleo habilitante NH1 “Infraestructura y cadena de suministro”	77
Tabla 6-3	Brechas del núcleo habilitante NH2 “Gobernanza y financiamiento”	78
Tabla 6-4	Iniciativas estratégicas y líneas de I+D núcleo habilitante NH2 “Gobernanza y financiamiento”	79
Tabla 6-5	Brechas del núcleo habilitante NH3 “Capital humano”	80
Tabla 6-6	Iniciativas estratégicas y líneas de I+D núcleo habilitante NH3 “Capital humano”	81
Tabla 6-7	Brechas del núcleo habilitante NH4 “Regulaciones, política, permisos y estandarización”	82
Tabla 6-8	Iniciativas estratégicas y líneas de I+D núcleo habilitante NH4 “Regulaciones, política, permisos y estandarización”	83
Tabla 6-9	Brechas del núcleo habilitante NH5 “Mediana minería”	84
Tabla 6-10	Iniciativas estratégicas y líneas de I+D núcleo habilitante NH5 “Mediana minería”	85

Índice de figuras

Figura 1-1	Camino de la hoja de ruta del H2V para la minería de Chile y Perú	21
Figura 3-1	Producción de cobre en Chile	26
Figura 3-2	Desglose de emisiones en la minería del cobre chilena según su alcance (2019)	27
Figura 3-3	Consumo de energía por proceso (EA1 y EA2) en la minería del cobre chilena (2020)	28
Figura 3-4	Distribución porcentual de emisiones de EA3 por macroproceso en la minería del cobre chilena año 2019	28
Figura 3-5	Producción de cobre en Perú	29
Figura 3-6	Desglose de emisiones en la minería del cobre peruana según su alcance (2019)	30
Figura 3-7	Consumo de energía por proceso (EA1 y EA2) en la minería del cobre peruana (2020)	31
Figura 3-8	Competitividad del H2V vs BaU y otras alternativas cero carbono al 2030 en la minería de Chile y Perú	33
Figura 3-9	Proyección de emisiones GEI al 2030 (EA1 y EA3) para la minería del cobre de Chile y Perú	35
Figura 3-10	Potencial demanda de H2V e inversión en capacidad de electrólisis minería chilena del cobre al 2030	38
Figura 3-11	Potencial demanda de H2V e inversión en capacidad de electrólisis minería peruana del cobre al 2030	39
Figura 3-12	Países que cuentan con proyectos de H2V para su uso en minería	40
Figura 3-13	Olas de la Estrategia Nacional de H2V de Chile	45
Figura 3-14	Proyectos de H2V anunciados y en desarrollo a lo largo de Chile	49
Figura 3-15	Principales características de los proyectos de H2V en Chile	51
Figura 3-16	Avances de Perú en temas de H2V	52
Figura 3-17	Socios corporativos de la Asociación H ₂ Perú	53
Figura 3-18	Mapeo de proyectos/iniciativas de H2V en Perú	54
Figura 3-19	Producción de H2V en Industrias Cachimayo	55
Figura 4-1	Etapas de la hoja de ruta (HDR)	57
Figura 4-2	Talleres de la hoja de ruta (HDR)	58
Figura 4-3	Compañías mineras integrantes del directorio de la “Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde”	58
Figura 4-4	Cadena de suministro del H2V simplificada	59
Figura 4-5	Stakeholders a lo largo de la cadena de valor del H2V en Chile y Perú identificados según categorías	60
Figura 4-6	Off-takers de H2V identificados en Chile y Perú	61
Figura 4-7	Potencial de generación fotovoltaica en Chile y Perú	61
Figura 4-8	Ejes de la metodología para la construcción de la “Visión Compartida” de la hoja de ruta	63
Figura 4-9	Objetivos estratégicos de la hoja de ruta	64
Figura 4-10	Núcleos traccionantes y habilitantes de la hoja de ruta de H2V	65
Figura 7-1	Iniciativas priorizadas y líneas de I+D+i-NT1 “Movilidad y Transporte”	88
Figura 7-2	Iniciativas priorizadas y líneas de I+D+i-NT2 “Aplicaciones de H2V en otros procesos mineros”	91
Figura 7-3	Iniciativas priorizadas y líneas de I+D+i-NT3 “Reducción de emisiones de alcance 3 (EA3)”	92



01 Introducción

La actualización de las NDC de 2020 es una obligación establecida por el Acuerdo de París, y contiene los compromisos de Chile y Perú para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) al 2030 y poder así enfrentar los impactos del cambio climático.

A nivel mundial, cada vez son más visibles las consecuencias ambientales producidas por las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El año 2019 fue 0,98 grados Celsius más cálido que la temperatura promedio de 1951 a 1980, según los científicos del Instituto Goddard de Estudios Espaciales (GISS) de la NASA en Nueva York.

En abril de 2020 el Gobierno de Chile presentó la actualización de la Contribución Nacional Determinada (NDC) a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC). Este documento es una obligación establecida por el Acuerdo de París, y contiene los compromisos de Chile para reducir sus emisiones de gases de efecto invernadero al 2030 y poder así enfrentar los impactos del cambio climático de mejor manera.

Por su parte, Perú también avanzó hacia la carbono-neutralidad con un plan ambicioso, participativo y robusto, de conformidad con el Acuerdo de París, actualizando su Contribución Nacional Determinada y la Estrategia Nacional ante el Cambio Climático al año 2050, que incorpora una visión a la carbono-neutralidad y la adaptación a largo plazo, además de llevar a término el Plan Nacional de Adaptación.

La industria minera, por sus grandes dimensiones y complejos procesos, tiene impactos relevantes en los territorios en que se desarrolla. En el caso de Chile y Perú, la industria minera representa un alto grado de contribución a sus economías, con lo cual se ha impulsado su desarrollo, convirtiéndose en los principales productores de cobre y otros minerales a nivel mundial.

El compromiso adquirido por Chile y Perú en relación con los objetivos ambientales abarca a la industria minera, la cual está en la búsqueda de opciones que permitan desarrollar sus procesos con la misma calidad, trazando un camino hacia

la carbono-neutralidad. En esta búsqueda se presenta el hidrógeno verde (H₂V) como alternativa clave para el logro de este objetivo por los múltiples beneficios que representa, entre los cuales se puede destacar el hecho que no emite gases contaminantes ni durante la combustión ni durante el proceso de producción, además de su versatilidad para transformarse en electricidad o combustibles sintéticos y utilizarse con fines domésticos, comerciales, industriales o de movilidad.

En Chile, Corporación Alta Ley, nace en 2018, a partir de la institucionalización del Programa Nacional de Minería Alta Ley, una iniciativa público-privada creada el 2015 como Programa Estratégico de Especialización Inteligente de Corfo, con la participación activa de la industria minera, de sus proveedores, el Estado, la academia y centros de I+D, cuyo objetivo es atender los desafíos de productividad, seguridad y respeto al medio ambiente de la minería, y a su vez crear, fortalecer y dinamizar el ecosistema de innovación minero.

En Perú, SAMMI - Clúster Minero Andino es una iniciativa conjunta impulsada desde el 2018 por la Corporación Andina de Fomento (CAF), Banco de Desarrollo de América Latina y la Cámara de Comercio e Industria de Arequipa (CCIA), la cual tiene como propósito llevar prosperidad a las regiones donde el sector minero opera, a través del desarrollo de

un ecosistema de innovación y emprendimiento que impulse redes de colaboración entre empresas mineras, proveedores, academia y el estado.

Ambas corporaciones, Corporación Alta Ley y SAMMI Clúster Minero Andino, han unido sus esfuerzos para impulsar la visión de una industria minera carbono neutral. En este sentido, en el marco de un webinar binacional realizado en mayo del 2021, denominado “Chile y Perú: Juntos por una minería sostenible”, se presentaron las oportunidades y desafíos que existen en ambos países para la implementación del hidrógeno verde en la minería. La realización de este webinar culminó en la firma de un Convenio de Colaboración entre ambas instituciones, el cual busca potenciar el intercambio de conocimiento como factor clave para el desarrollo de la minería entre Chile y Perú en toda la cadena de valor de la industria.

De la firma de este convenio, nace el proyecto de co-diseño de la hoja de ruta (HDR) del programa “Hidrógeno Verde, Minería Chile y Perú” el cual se desarrolla de manera conjunta y participativa con los actores de la industria de ambos países. En la Figura 1-1, se pueden observar las etapas y acuerdos logrados para impulsar esta hoja de ruta o roadmap.



Figura 1-1

Camino de la hoja de ruta del H2V para la minería de Chile y Perú





02 Objetivos y alcances

El objetivo de este roadmap es desarrollar una estrategia para la adopción e implementación del hidrógeno verde en la minería de Chile y Perú.

El objetivo de este roadmap (“hoja de ruta”) es desarrollar una estrategia para la adopción e implementación del hidrógeno verde en la minería de Chile y Perú, que permita definir una visión consensuada de la ruta a seguir para la implementación de estas tecnologías en la industria, generando una demanda base de hidrógeno verde y su posterior masificación hacia otras industrias; identificando los proyectos tecnológicos y colaborativos necesarios, su priorización, temporalidad, gobernanza, responsables y la coordinación institucional necesaria para su ejecución y financiamiento.

Adicionalmente, este roadmap tiene asociados los siguientes objetivos específicos:

- Desarrollar un diagnóstico y dimensionamiento de las oportunidades y tendencias tecnológicas que permitan estimar la competitividad del hidrógeno verde bajo condiciones específicas del sector minero de ambos países.
- Determinar el potencial de transformación del hidrógeno verde en la industria minera en el corto, mediano y largo plazo.
- Identificar las brechas y desafíos para la adopción de hidrógeno verde en el sector minero de Chile y Perú, considerando la necesidad de fomentar el desarrollo de las aplicaciones junto con la producción de hidrógeno verde y otras tecnologías hoy inexistentes.
- Contar con un mapa de actores claves y factores habilitantes para la adopción del hidrógeno verde en Chile y Perú.
- Identificar un portafolio de proyectos para la implementación del hidrógeno verde en minería en ambos países, con su correspondiente priorización, temporalidad, fuentes de financiamiento potencial y gobernanza asociada.
- Consensuar una visión compartida, sobre la cual se trabajará a partir de la(s) hipótesis de valor y las brechas y desafíos identificado(s).
- Co-diseñar mediante un proceso amplio y participativo, un plan para el despliegue de la tecnología de hidrógeno verde, optimizando los aspectos necesarios mediante la facilitación de las discusiones internas y consenso de los equipos de stakeholders del sector minero de Chile y Perú.
- Identificar fuentes alternativas de financiamiento para el portafolio de proyectos prioritarios.
- Formalizar una hoja de ruta consensuada, para la adopción de hidrógeno verde en el sector minero de Chile y Perú, identificando los proyectos prioritarios y las respectivas recomendaciones para su implementación.



03 Línea base para la hoja de ruta

[3.1] Introducción

Parte de la construcción de una hoja de ruta es el levantamiento de una línea base, es decir, la identificación del escenario base (ingl. *Business as Usual (BaU)*), entendido como la situación actual que corresponde al punto de partida desde el cual se aspira transitar hacia metas (definidas en el ejercicio de la hoja de ruta) e iniciar el proceso de transformación. El levantamiento de la línea base se refiere, en este caso específico, al consumo energético en los diferentes procesos mineros, las emisiones generadas, y el costo actual de la producción y transporte de H₂V en diferentes escenarios. El conocimiento de la línea base permite:

- A.** Definir metas de desarrollo de mercado realistas, basadas en una estimación de tamaño de mercado sólida.
- B.** Comparar avances y mejoras contra el “estatus quo” antes de implementar cualquier mejora o nuevo proyecto de transformación.

Actualmente, en la industria minera se están ejecutando proyectos, los cuales pueden ser considerados como la línea base que permite avanzar en el desarrollo del hidrógeno verde (H₂V). Algunos de estos proyectos son: Hub de Hidrógeno Verde Antofagasta (H₂VA), AES NH₃ Verde, Antofagasta Mining Energy Renewable (AMER), Atacama H₂ HUB y el proyecto Hydra.

Estos proyectos se han ejecutado en función a las brechas que se han ido identificando en la industria minera, con el objetivo fundamental de descarbonizar las operaciones.

Para el desarrollo de la línea base, se realizó una recopilación de antecedentes a partir de información pública y

entrevistas con actores clave del ecosistema minero de Chile y Perú.

Posteriormente, se realizó un levantamiento de información de producción minera y consumos de energía por proceso, y una proyección de consumos energéticos y emisiones de Gases de Efecto Invernadero al año 2030. Además, se analizó el potencial de transformación del mercado de ambos países mediante el uso de hidrógeno verde, desarrollando estimaciones de costos de producción y logística de hidrógeno verde, un análisis de los posibles usos del hidrógeno verde en minería y su competitividad, y una estimación del mercado potencial del hidrógeno verde en la minería del cobre de Chile y Perú.

El levantamiento de la línea base se refiere al consumo energético en los diferentes procesos mineros, las emisiones generadas, y el costo actual de la producción y transporte de hidrógeno verde.

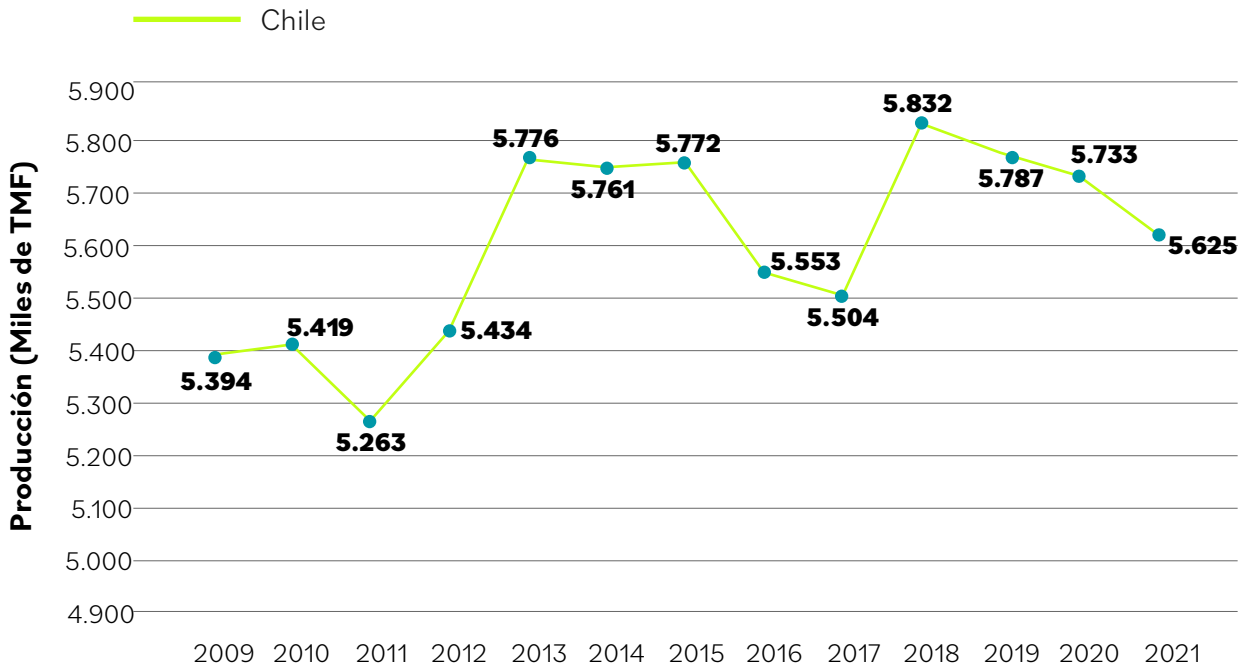
[3.2] Principales antecedentes

[3.2.1] Chile: Producción, consumos energéticos y emisiones

Producción

La producción de cobre en Chile ha aumentado un 9% en los últimos 10 años, y se espera que esta tendencia se mantenga debido al rol que juega el cobre en la transición energética. La intensidad energética de la producción de cobre ha aumentado y lo seguirá haciendo en los próximos años debido a la disminución de las leyes de mineral, aumento de dureza, profundidad de los yacimientos y mayores distancias de acarreo, entre otros. A continuación, en la Figura 3-1 se muestra el perfil anual de producción chilena de cobre desde el año 2009¹.

Figura 3-1
Producción de cobre en Chile



¹ Fuente: Cochilco(2022).

Un 73% de la producción de cobre en Chile, se realiza en plantas concentradoras (80% de este se exporta como concentrado y el restante se funde y refina localmente), y el otro 27% se obtiene por electro-obtención (EW).

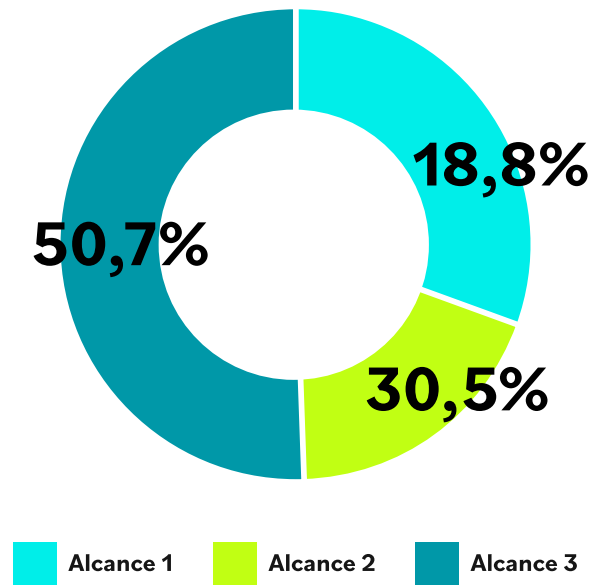
Consumos energéticos y emisiones

El Ministerio del Medio Ambiente de Chile define las emisiones de CO₂ de la siguiente manera:

- **Emisiones directas (Alcance 1-EA1):** son aquellas emisiones de gases de efecto invernadero que provienen de fuentes que son propiedad o son controladas por la empresa, como, por ejemplo, consumo de combustibles fósiles en fuentes fijas y/o móviles, fugas no intencionadas de los equipos de climatización, etc.
- **Emisiones indirectas por consumo y distribución de energía (Alcance 2-EA2):** corresponden a las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas al consumo de electricidad y/o vapores generados por terceros.
- **Otras emisiones indirectas (Alcance 3-EA3):** son aquellas emisiones de gases de efecto invernadero que no son de propiedad, ni están controladas por la empresa, como, por ejemplo, transporte de los funcionarios, viajes aéreos o terrestres por motivos de trabajo, transporte de insumos, generación y transporte de residuos, entre otros.
- De acuerdo con COCHILCO², la minería del cobre en Chile en 2020 emitió 16,4 millones de toneladas de CO₂eq (EA1 y EA2), con un rango de intensidad de emisiones oscilando entre 1,5 y 4 kg CO₂ eq por kg de cobre fino, dependiendo de las faenas.
- Por otro lado, de acuerdo con estimaciones realizadas en el documento que se indica en la referencia³, las emisiones de alcance 3 (EA3) generadas en la cadena de suministro de la minería chilena del cobre en 2019, fueron del orden de 16 millones de toneladas de CO₂ eq, es decir, 2,9 kg CO₂ eq por kg de cobre fino.

Figura 3-2

Desglose de emisiones en la minería del cobre chilena según su alcance (2019)



El 70% de las emisiones corresponden a EA1 y EA3, que es donde existe mayor potencial para hidrógeno verde (H2V).

El reemplazo de combustibles (EA1) en mina rajo (diésel), fundición y refinación (FURE) (fuel oil) y Electro-obtención (EW) (diésel, gas natural) representan los principales desafíos de descarbonización en la minería del cobre.

En la Figura 3-2 se muestra el porcentaje de emisiones de alcance 1, 2 y 3 en la minería del cobre en Chile⁴ (EA1, EA2 y EA3).

Los procesos de concentración y LX/SX/EW⁵ concentran el 70% del consumo eléctrico (alcance 2). Parte de este suministro ya fue descarbonizado por PPAs⁶ verdes y se espera que ésta sea la tendencia en la industria.

² Informe Emisiones GEL en la minería del cobre al año 2020, Dirección de Estudios de COCHILCO.

³ Guía sobre emisiones en la cadena de suministro de la minería: Línea base sectorial y propuestas para la acción, (2022), Ministerio de Minería de Chile, Banco Interamericano de Desarrollo, Corporación Alta Ley, Karungen, EcoDesarrollo, SAMMI Cluster Minero Andino y Linkminers.

⁴ Fuente: Estimación realizada en la preparación de la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú, ref. MINEM (2021) Anuario minero 2020; COCHILCO (2021) Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2001-2020; Alta Ley (2021), Calculadora de emisiones de alcance 3 de la minería del cobre (EA3).

⁵ Lixiviación, Extracción por Solventes y Electro-obtención.

⁶ Contratos de compra de energía (ingl. *Power-Purchase-Agreements* (PPAs)), de electricidad a largo plazo.

Figura 3-3

Consumo de energía por proceso (EA1 y EA2) en la minería del cobre chilena 2020

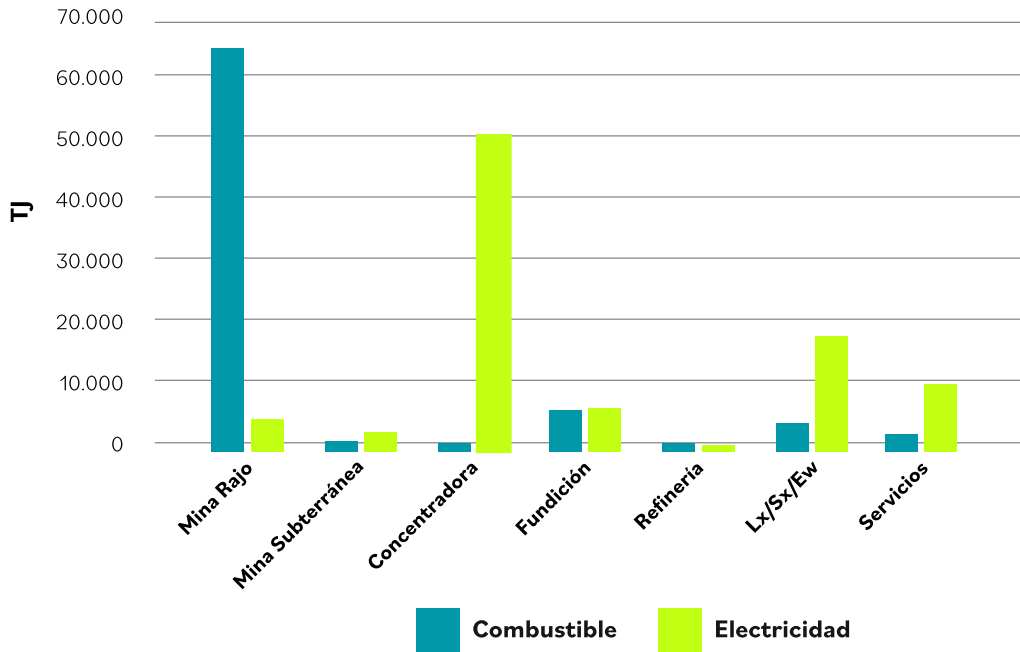


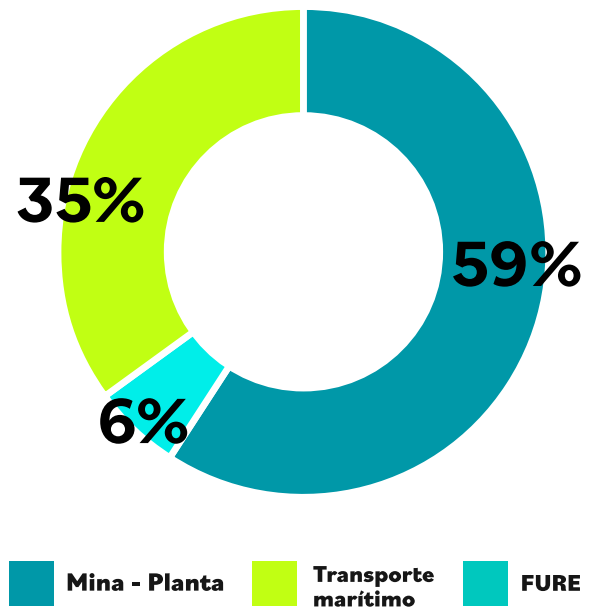
Figura 3-4

Distribución porcentual de emisiones de EA3 por macroproceso en la minería del cobre chilena año 2019

La Figura 3-3 muestra el consumo de energía por proceso y tipo de energético (combustibles y electricidad), ítems que pueden ser asociados directamente a las emisiones de GEI de alcance 1 y alcance 2 (EA1 y EA2)⁷.

En alcance 3 (EA3), el 18 y 24% de las emisiones relacionadas a la mina se deben a los explosivos usados en el proceso de tronadura y a las bolas de molienda respectivamente. El 5% de emisiones de alcance 3 se debe al transporte terrestre de concentrado.

La distribución porcentual de EA3 por macroprocesos (mina-planta, fundición y refinería (FURE), y transporte marítimo) se muestra en la Figura 3-4⁸.



⁷ Fuente: COCHILCO (2021), Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2001-2020.

⁸ Fuente: Alta Ley (2021), Calculadora de emisiones de alcance 3 de la Minería del cobre.

[3.2.2] Perú: Producción, consumos energéticos y emisiones

Producción

La industria del cobre peruana ha crecido un 74% durante los últimos 10 años. Al igual que en el caso de Chile, la intensidad energética de la producción de cobre ha aumentado y lo seguirá haciendo en los próximos años debido a la disminución de las leyes de mineral, aumento de dureza, profundidad de los yacimientos y mayores distancias de acarreo, entre otros factores. Este crecimiento puede verse en la Figura 3-5, donde se muestra la producción de cobre en Perú⁹.

Consumos energéticos y emisiones

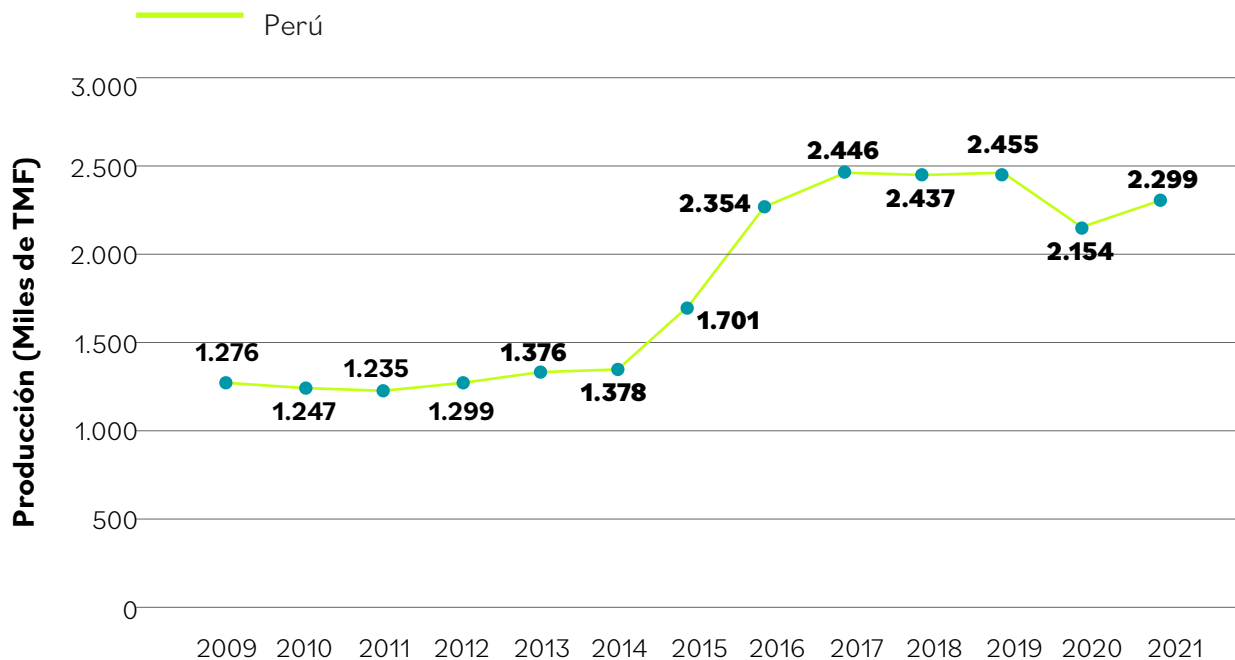
En 2019, la minería del cobre en Perú emitió ~7 millones de toneladas de CO₂eq (EA1 y EA2)¹⁰. Más del 95% de la

producción de cobre se realiza en plantas concentradoras (72% de este se exporta como concentrado y el restante se funde y refina localmente), y el resto se obtiene por procesos hidrometalúrgicos de lixiviación (LX), extracción por solventes (SX) y electro-obtención (EW).

El reemplazo de combustibles (EA1) en mina rajo (diésel), fundición y refinación (fuel oil) y electro-obtención-EW (diésel, gas natural) representa el principal desafío de descarbonización de la minería del cobre.

Los procesos de concentración y LX/SX/EW concentran el 70% del consumo eléctrico (alcance 2-EA2). Al igual que en Chile, se espera que las emisiones de alcance 2 se reduzcan considerablemente mediante el uso de PPAs verdes. La distribución porcentual de las emisiones de alcance 1, 2 y 3 en la minería del cobre peruana pueden verse en la Figura 3-6¹¹ (EA1, EA2 y EA3).

Figura 3-5
Producción de cobre en Perú



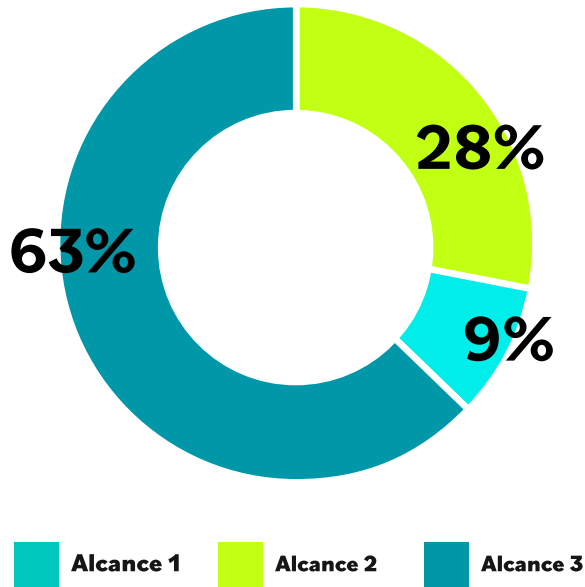
⁹ Fuente: MINEM (2021).

¹⁰ Fuente: estimación realizada en la preparación de la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú., ref. MINEM (2021) Anuario minero 2020; Cochilco (2021) Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2001-2020; Alta Ley (2021) Calculadora de emisiones de alcance 3 de la minería del cobre.

¹¹ Fuente: estimación realizada en la preparación de la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú., ref. MINEM (2021) Anuario minero 2020; Cochilco (2021) Anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2001-2020; Alta Ley (2021), Calculadora de emisiones de alcance 3 de la minería del cobre.

Figura 3-6

Desglose de emisiones en la minería del cobre peruana según su alcance (2019)

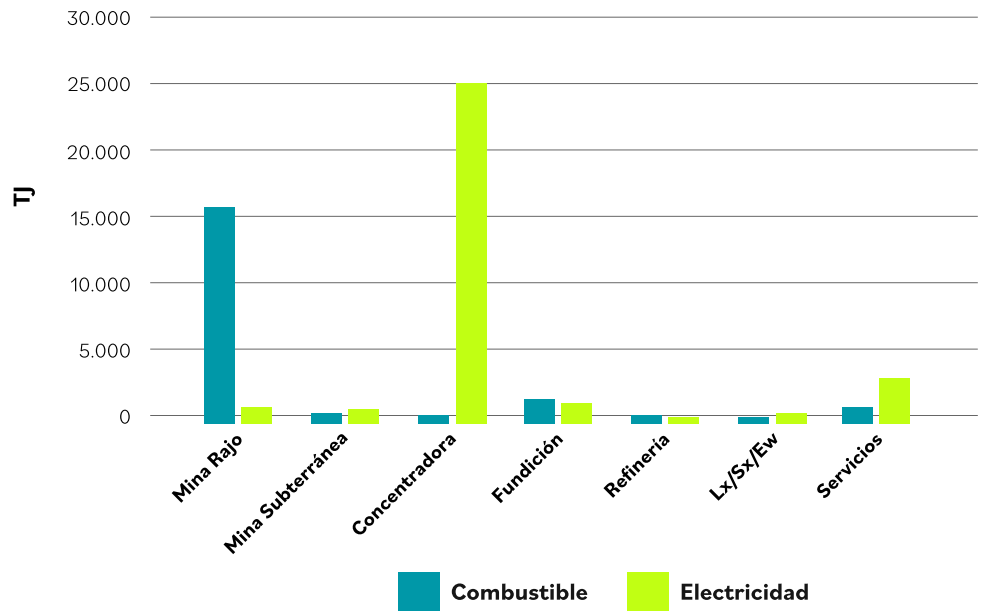


En el caso peruano, las emisiones de alcance 3 en la minería del cobre (EA3) representan un 63% del total de emisiones, principalmente debido a una mayor intensidad en el uso de los servicios de logística. Esto se debe, por ejemplo, a que, en divisiones mineras de Perú, el concentrado frecuentemente es transportado mediante camiones a los puntos de despacho (puertos), a diferencia de Chile donde generalmente se utilizan ductos para transportar el concentrado desde las divisiones mineras hacia los puertos¹². Del total de EA3, El 20 y 30% de las emisiones relacionadas al complejo mina-planta se deben a los explosivos usados en el proceso de tronadura y a las bolas de molienda respectivamente; un 13,4% se explica por las emisiones generadas por cal; y un 11,5% corresponde a emisiones generadas por el transporte de concentrado.

En la Figura 3-7 se muestra el consumo de energía por proceso y tipo de energético (combustibles y electricidad) para la minería del cobre de Perú en el año 2020¹³. Como se mencionó anteriormente cada tipo de energético puede ser asociado directamente a las emisiones de GEI de alcance 1 y alcance 2 de la minería (EA1-diésel y EA2-electricidad). Al igual que en el caso chileno, se destaca el consumo eléctrico en plantas concentradoras y el consumo de combustible en la mina rajo.

Figura 3-7

Consumo de energía por proceso (EA1 y EA2) en la minería del cobre peruana 2020



¹² Datos proporcionados por Hinicio en el marco de la preparación de la Hoja de Ruta H2V para la minería de Chile y Perú.

¹³ Fuente: Elaboración propia en el marco de la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú. Se utilizaron como referencias las estadísticas proporcionadas por MINEM (2021) en su Anuario minero de 2020, COCHILCO (2021), en su anuario de Estadísticas del Cobre y Otros Minerales 2001-2020 y el estudio desarrollado por Alta Ley y otras entidades en torno a la calculadora de emisiones de alcance 3 en la minería del cobre.

[3.2.3] Oportunidades de aplicación del hidrógeno verde (H2V) en la minería

El hidrógeno verde puede ser utilizado en varios procesos y aplicaciones de la minería, aportando principalmente a la descarbonización de emisiones de alcance 1 y 3. Los posibles usos de hidrógeno verde para mitigar emisiones de alcance 1 en la minería son:

- **Movilidad minera:** El hidrógeno verde puede ser usado en varios equipos de movilidad minera (tales como camiones de extracción minera CAEX, palas, perforadoras, camiones aljibe, bulldozers, retroexcavadoras, etc.) y logística en general (montacargas, camiones, camionetas, buses, etc.). La competitividad del hidrógeno verde versus los equipos a diésel y otras alternativas, como baterías, dependerá del tamaño de los equipos y la utilización de estos¹⁴. Mientras mayor sea la capacidad de carga y/o la utilización de los vehículos, aumentará el potencial para el reemplazo del diésel por H2V. Mitigar el total de estas emisiones, es decir, si se reemplazaran los combustibles fósiles usados en el escenario BaU (*Business as Usual*) en estos procesos en su totalidad por H2V u otros combustibles cero carbono, podrían reducirse entre un 70% a 90% las emisiones de alcance 1 de la minería del cobre.
- **Calor:** En procesos como *Electrowining (EW)* y Fundición y Refinación (FURE), el hidrógeno puede ser utilizado como fuente de calor de baja entalpía (calderas y secadores) y de alta entalpía (hornos)¹⁵. La competitividad de este uso dependerá del tipo de proceso y combustible utilizado actualmente. Mitigar el total de estas emisiones, es decir, si se reemplazaran los combustibles fósiles usados en el escenario BaU en estos procesos en su totalidad por H2V u otros combustibles cero carbono, permitiría reducir entre un 8% y 10% las emisiones de alcance 1 de la minería del cobre.
- **Energía eléctrica OFF-GRID:** Si bien la mayoría de las faenas mineras están conectadas a la red eléctrica (ON-GRID), se estima que el hidrógeno verde podría ser usado para apoyar el suministro eléctrico renovable de servicios OFF-GRID como campamentos mineros, infraestructura y estaciones remotas. También el hidrógeno puede ser utilizado en faenas mineras OFF-GRID, para complementar un suministro eléctrico 100% renovable. Mitigar el total de estas emisiones, es decir si se reemplazaran los combustibles fósiles usados en el

escenario BaU en estos procesos en su totalidad por hidrógeno verde u otros combustibles cero carbono, permitiría reducir entre un 8% y 10% las emisiones de alcance 1 de la minería del cobre.

Algunos usos potenciales del hidrógeno verde para mitigar las emisiones de alcance 3 son:

- **Insumo químico:** El hidrógeno verde puede ser utilizado como insumo para producir químicos que se usan en distintos procesos de la minería, como por ejemplo en los explosivos que se producen a partir de amoniaco para el proceso de tronadura; y también en reactivos del proceso de concentración (NaSH). Mitigar estas emisiones en su totalidad implicaría reducir en un 10% a 12% las emisiones de alcance 3 de la minería del cobre (EA3).
- **Transporte marítimo:** Derivados del hidrógeno verde como el amoniaco verde o los combustibles sintéticos podrían descarbonizar este segmento, asegurando una autonomía y disponibilidad del suministro. Mitigar estas emisiones en su totalidad implicaría reducir en un 6% a 8% las emisiones de alcance 3 de la minería del cobre (EA3).
- **Transporte terrestre:** El hidrógeno puede ser usado como combustible para el transporte terrestre de productos, insumos y personal asociados a la minería. Mitigar estas emisiones en su totalidad implicaría reducir en un 3% a 5% las emisiones de alcance 3 de la minería del cobre (EA3).

En el caso de las emisiones de alcance 2 (EA2), no hay gran potencial para el hidrógeno verde, ya que estas emisiones actualmente se están reduciendo mediante PPA de electricidad renovable.

[3.2.4] Alternativas al hidrógeno verde (H2V) para descarbonizar emisiones en minería

Adicionalmente a las aplicaciones basadas en hidrógeno verde, existen otras soluciones cero carbono aptas para la descarbonización de la actividad minera. En la Tabla 3-1, se entrega un resumen de las áreas específicas de aplicación de H2V (2) por proceso minero (1), el caso base, es decir los combustibles y equipos que se ocupan hoy día para suministrar energía al respectivo proceso (3), la posible alternativa basada en H2V (4) y otras alternativas cero carbono al uso de H2V (5)¹⁶.

¹⁴ La utilización es el tiempo en que el equipo realiza su función básica de diseño. Este indicador se calcula como la razón entre las horas de operación del equipo y las horas que el equipo está disponible, expresado como porcentaje.

¹⁵ El H2V también podría ser utilizado en el proceso de reducción requerido en FURE. Algunas mineras en Chile ya han usado el H2V en sus procesos, y existen varios estudios en desarrollo.

¹⁶ Fuente: Realizado en el proceso de preparación de la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú.

Tabla 3-1

Procesos mineros, posibles aplicaciones del H2V y alternativas cero carbono

PROCESO MINERO (1)	APLICACIÓN DE H2V (2)	CASO BASE (BAU) (3)	CASO DE USO/APLICACIÓN CON H2V (4)	ALTERNATIVA CERO CARBONO A LA APLICACIÓN DE H2V (5)
Mina Rajo	Camiones CAEX ¹⁷	Generador diésel ¹⁸ + motor eléctrico	H2V FC + baterías (FCEV ¹⁹)	100% baterías (BEV ²⁰)
	Equipos móviles	Motor diésel (ICE ²¹)	H2V FC + baterías (FCEV)	100% baterías (BEV)
	Equipos de carguío	Motor diésel (ICE)	H2V FC + baterías (FCEV)	Electrificación por cable
FURE	Horno alta temperatura ²²	Combustibles fósiles	Horno a H2V	N/A
EW/FURE	Caldera de baja temperatura	Caldera a combustibles fósiles	Caldera a H2V/Blending	PPA verde + bomba de calor/ termosolar
Servicios	Electricidad para servicios OFF-GRID	Generador diésel	Generación renovable on-site + H2V FC + baterías	PPA verde + línea de transmisión
Tronadura (EA3)	Explosivos (ANFO ²³)	Amoniaco gris	Amoniaco verde (derivado del H2V)	N/A
Transporte Terrestre (EA3)	Transporte de material y personal	Motor diésel (ICE)	H2V FC + baterías (FCEV)	100% baterías
Transporte Marítimo (EA3)	Barcos	Motor diésel (ICE)	Amoniaco verde o e-fuels (derivados del H2V)	N/A

En la mayoría de los procesos mineros existen alternativas cero carbono al hidrógeno verde para descarbonizar dichos procesos, por lo que es necesario realizar un análisis de competitividad para determinar cuál es la opción más interesante en cada caso.

¹⁷ Para los camiones CAEX se considera el sistema de asistencia eléctrica a través de una catenaria (trolley) como una alternativa tecnológica complementaria a todos los casos. La catenaria puede ser utilizada como complemento a equipos móviles con sistema de propulsión eléctrico, de manera de poder reducir el consumo de energía desde los sistemas de almacenamiento a bordo, aumentando la velocidad (en zonas de pendiente positiva) y/o regenerando energía (en zonas de pendiente negativa).

¹⁸ El tipo de camión minero usado en el caso BaU es eléctrico en su mayoría (es decir, cuenta con un motor eléctrico) y tiene además un Generador Diésel On-Board (no es un motor diésel, sino un generador que genera electricidad que va a los motores y acciona las ruedas).

¹⁹ FCEV = Vehículo Eléctrico de Celda de Combustible (*Fuel Cell Electric Vehicle*).

²⁰ BEV = Vehículo Eléctrico de Batería (*Battery Electric Vehicle*).

²¹ ICE = Motor de combustión interna (*Internal Combustion Engine*).

²² Alta temperatura considera temperaturas sobre los 100°C.

²³ El ANFO (*Ammonium Nitrate - Fuel Oil*) es un explosivo de alta potencia utilizado en minería.

[3.2.5] Competitividad del hidrógeno verde (H2V) vs BaU y alternativas cero carbono

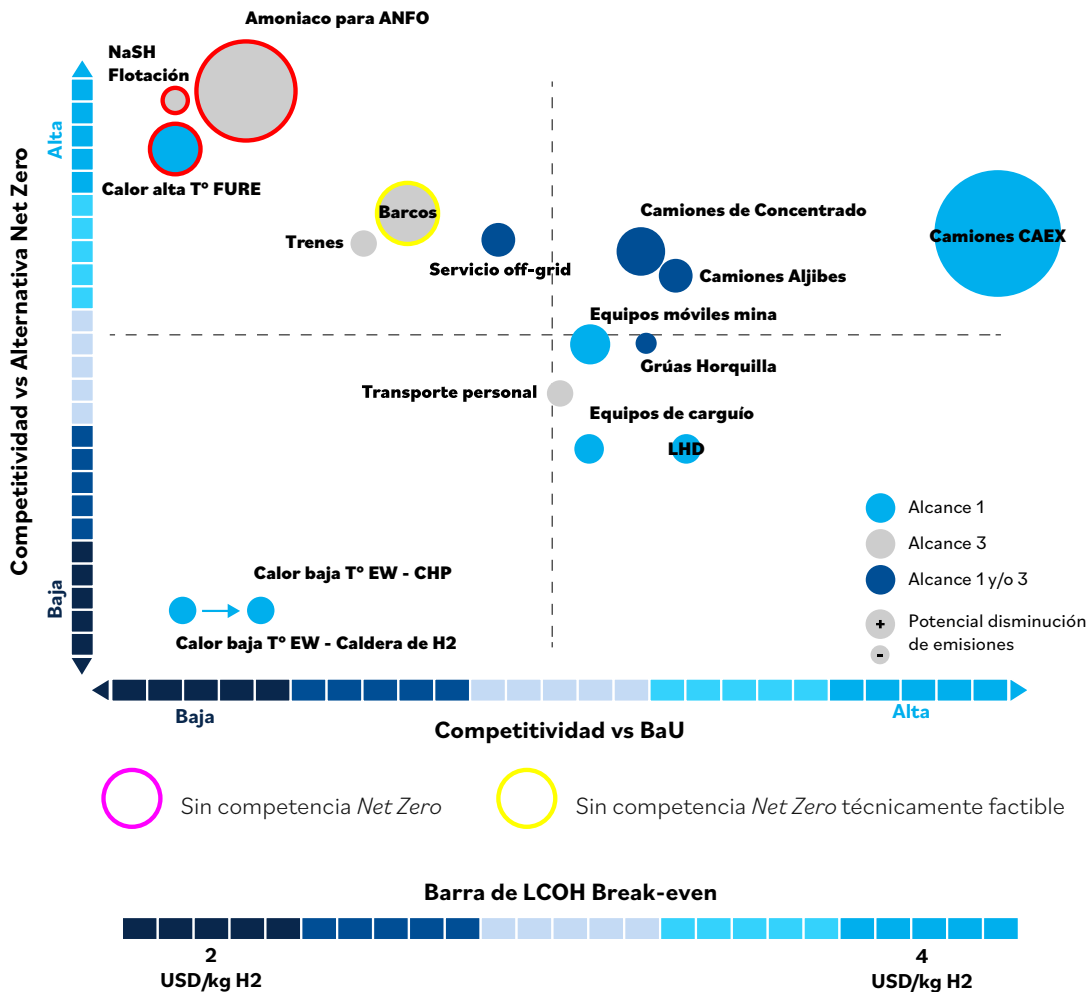
La competitividad del hidrógeno verde puede ser medida, estimando el LCOH *break-even*, es decir, determinando el costo nivelado del hidrógeno verde²⁴ que iguale el costo total de propiedad (TCO) respecto a la alternativa actual (BaU) y respecto a otras alternativas cero carbono en cada potencial uso del hidrógeno verde.

En el siguiente gráfico, se puede observar cómo compiten actualmente las soluciones basadas en hidrógeno verde respecto al caso BaU y también respecto a otras alternativas cero carbono definidas en la Figura 3-8. En el cuadrante superior derecho se pueden ver las aplicaciones donde el hidrógeno verde es competitivo vs caso BaU, y vs otras alternativas cero carbono. En el cuadrante superior izquierdo, se pueden ver las aplicaciones donde el hidrógeno verde es competitivo vs las alternativas cero carbono, pero no es competitivo vs el caso BaU.

En el cuadrante inferior derecho están las aplicaciones donde el hidrógeno verde es competitivo vs el caso BaU, pero no es competitivo vs otras alternativas cero carbono. Finalmente, en el cuadrante inferior izquierdo están las aplicaciones donde el hidrógeno verde no es competitivo ni vs el caso BaU ni versus otras alternativas cero carbono.

El tamaño de cada burbuja representa el potencial de disminución de emisiones si se descarboniza esta aplicación, es decir, mientras más grande es la burbuja, mayor es el potencial de descarbonización (volumen de emisiones que se lograría reducir)²⁵.

Figura 3-8
Competitividad del H2V vs BaU y otras alternativas cero carbono al 2030 en la minería de Chile y Perú



²⁴ Corresponde al costo actualizado de producir 1 unidad másica de hidrógeno verde, teniendo en cuenta los costos estimados de inversión y operación de los activos involucrados en su producción. Habitualmente, el LCOH no incluye los costos de almacenamiento y transporte de hidrógeno.

²⁵ Fuente: Preparado especialmente para la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú.

Aplicaciones de H2V en movilidad

En base al estado del arte actual de las tecnologías asociadas (al momento de redacción de esta hoja de ruta), los camiones CAEX a hidrógeno verde y baterías (FCEV) aparecen como la aplicación de hidrógeno más competitiva en minería. Descarbonizar el 100% este segmento implicaría una disminución de alrededor del 90% de las emisiones de alcance 1 (EA1) en el macroproceso mina. Una alternativa a los camiones CAEX a hidrógeno son los camiones 100% a baterías. Si bien esta última opción puede ser competitiva, en base al estado del arte actual de las tecnologías aplicables de baterías, requeriría un aumento considerable de la flota y gran cantidad de estaciones de recarga, debido a la baja autonomía estimada para estos camiones. Dado el aumento del tráfico en la mina y del costo de capital asociado que esto implicaría, esta alternativa cero-carbono se considera como una tecnología en evolución técnica, en camino a alcanzar su factibilidad, y es también considerada en complemento con otras tecnologías de electrificación. Otros equipos móviles y de carguío a hidrógeno serán competitivos versus el diésel en la medida que se requiera una alta utilización y capacidad de carga.

Aplicación de H2V en suministro de calor (EW, FURE)

Para aplicaciones de calor, el hidrógeno es menos competitivo que los combustibles fósiles. Aun así, existen experiencias de uso del hidrógeno en la Fundición y Refinería (FURE) en la minería chilena. En el caso de FURE, el hidrógeno verde

podría ser utilizado en los procesos que requieren calor de alta temperatura. Dadas las características de estos procesos, no se vislumbra una solución alternativa cero carbono. Para el calor de baja temperatura, soluciones alternativas como la termo solar o bombas de calor alimentadas por energías renovables son las más competitivas.

El hidrógeno verde como complemento a la generación renovable “on-site” para habilitar infraestructura OFF-GRID (a través del almacenamiento energético de larga duración) podría ser una opción competitiva versus la alternativa actual. Especialmente en zonas donde el diésel (para generación) tiene un mayor costo o se requiere instalar una línea de alta tensión.

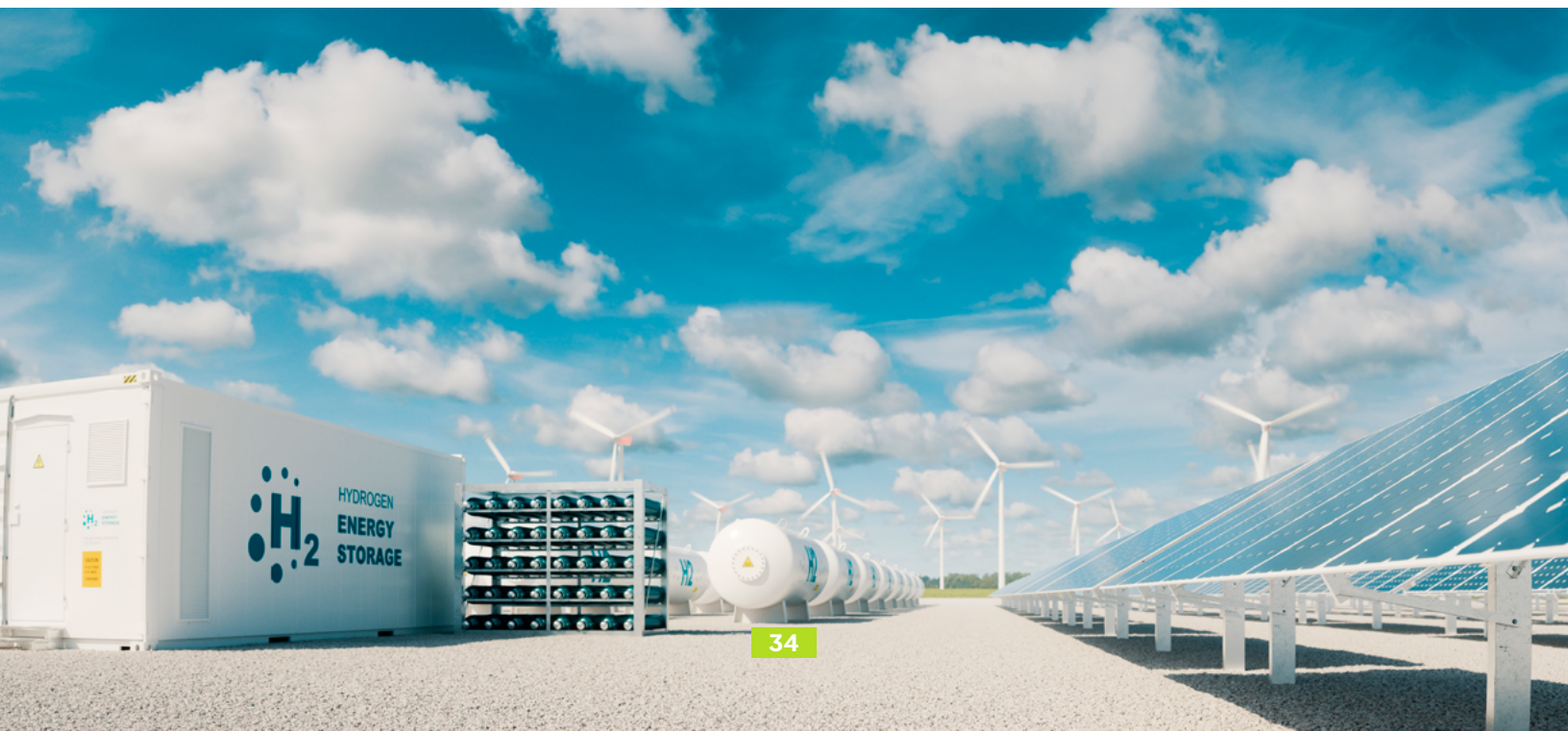
El hidrógeno verde como insumo químico (para producir amoníaco²⁶, NaSH²⁷ u otros) no es competitivo versus la alternativa actual donde el hidrógeno es producido a partir de combustibles fósiles. Sin embargo, no existen otras alternativas cero carbono al hidrógeno verde para descarbonizar este segmento.

En el caso de los barcos podría haber soluciones alternativas cero carbono competitivas a base de bio-combustibles. Sin embargo, este no se considera un energético de suministro seguro, favoreciendo así los derivados del hidrógeno verde (amoníaco o combustibles sintéticos).

A continuación, se presenta el mercado potencial para el H2V en la minería de cada país.

²⁶ El amoníaco verde se utiliza para producir ANFO, un explosivo industrial a granel ampliamente utilizado en minería.

²⁷ NaSH es la fórmula química del reactivo químico sulfhidrato de sodio utilizado en la flotación de minerales de cobre y molibdeno.



[3.3] Potencial uso de H2V en la minería

[3.3.1] Proyección de emisiones de GEI en Chile y Perú al 2030

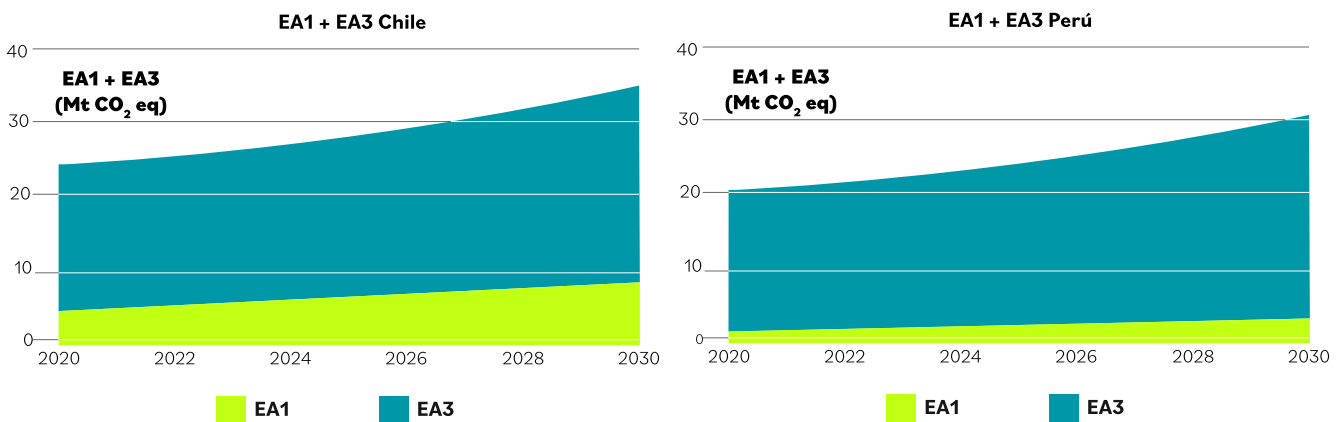
Las aplicaciones de H2V en la minería del cobre de Chile y Perú se focalizan en la reducción de emisiones de GEI de los sectores que se denominan “hard to abate”, es decir, en aplicaciones que son difícilmente electrificables. De ahí la importancia de dimensionar las emisiones de GEI generadas por la minería del cobre de ambos países y su proyección al año 2030.

Como se mencionó en secciones anteriores, el hidrógeno verde puede ser utilizado en varios procesos y aplicaciones de la minería, aportando principalmente a la descarbonización de emisiones de alcance 1 y 3, es decir, aquellas emisiones que son controladas directamente por las compañías mineras (EA1) y aquellas generadas en la cadena de suministro de la minería del cobre por empresas proveedoras de bienes, insumos y servicios mineros (EA3)²⁸.

A partir de la información disponible (COCHILCO, BID - Ministerio de Minería - Alta Ley), se realizó una estimación de las emisiones de GEI de EA1 y EA3 que serían generadas en ambos países en el período 2020-2030. La Figura 3-9 muestra gráficamente esta proyección para Chile y Perú.

El hidrógeno verde puede ser utilizado en varios procesos y aplicaciones de la minería, aportando principalmente a la descarbonización de emisiones de alcance 1 y 3.

Figura 3-9
Proyección de emisiones GEI al 2030 (EA1 y EA3) para la minería del cobre de Chile y Perú



²⁸ Las emisiones de GEI del tipo alcance 2 (EA2) no fueron consideradas en la estimación, ya que se está generando una reducción progresiva de estas a partir de contratos tipo “PPA verdes” que las compañías mineras están suscribiendo con las empresas generadoras.

Los gráficos de la figura anterior muestran que las emisiones de GEI de EA1 para el caso de Chile, podrían incrementarse en el período 2020-2030, desde 6,1 a 9,6 MtCO₂eq y en el caso de Perú, podrían pasar de 1,6 a 4,5 MtCO₂eq en el mismo período.

Las proyecciones de estos gráficos muestran, además, que las EA3 para el caso chileno podrían incrementarse de 16,4 a 24,8 MtCO₂eq en el período 2020-2030 y en el caso peruano, de 9,4 a 26,7 MtCO₂eq.

De ahí la importancia que la industria minera en su conjunto tenga un rol activo para descarbonizar sus procesos productivos y sus cadenas de suministro.

[3.3.2] Estimación del potencial uso de H2V en la minería en Chile e inversión en capacidad de electrólisis asociada

Para calcular la potencial demanda de H2V por la minería en Chile, se estimaron tasas de penetración del H2V al año 2030, considerando las aplicaciones más competitivas que permitirían reducir las EA1 y EA3. En la Tabla 3-2 se muestra el porcentaje estimado de penetración del H2V en sus distintos usos en minería en Chile y Perú: camiones

CAEX, equipos móviles y de logística minera, calor de alta temperatura, servicios OFF-GRID, transporte marítimo de concentrado y cátodos, viajes de trabajadores aéreos y terrestres, servicios de transporte y fabricación de insumos críticos para la minería como explosivos, cal, reactivos químicos, aceros y combustibles, por mencionar algunos²⁹. El porcentaje de penetración para cada aplicación depende de la competitividad de esta vs alternativas BaU.

29 Fuente: estimaciones realizadas en la preparación de la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú.



Tabla 3-2

Porcentaje de penetración del H2V (2030)
estimados en sus distintos usos en la minería para Chile y Perú

APLICACIONES	% PENETRACIÓN AL 2030
% PENETRACIÓN H2V PARA REDUCCIÓN DE EA1	
Camiones CAEX	20%
Otros equipos de movilidad y carguío	15%
Calor de alta Tº FURE	25%
Calor de baja Tº EW y FURE	2%
Servicios (OFF-GRID)	7%
% PENETRACIÓN H2V PARA REDUCCIÓN DE EA3	
Transporte marítimo	35%
Viajes de trabajadores	30%
Transporte de bienes e insumos	30%
LCA ³⁰ explosivos	100%
LCA otros insumos críticos ³¹	25%

Las tasas de penetración para cada aplicación y año se basan en supuestos tomados en base a diferentes factores incidentes como: metas de descarbonización de flotas de equipos propuestas por las compañías mineras, nivel de desarrollo tecnológico (TRL, Technology Readiness Level); límites técnicos de aplicación de H2V; costos de equipos y del suministro de H2V para las diferentes aplicaciones (por ejemplo, el concepto del TCO, Total Cost of Ownership, en caso de camiones CAEX con celdas de combustible versus camiones CAEX funcionando con motores convencionales mediante diésel).

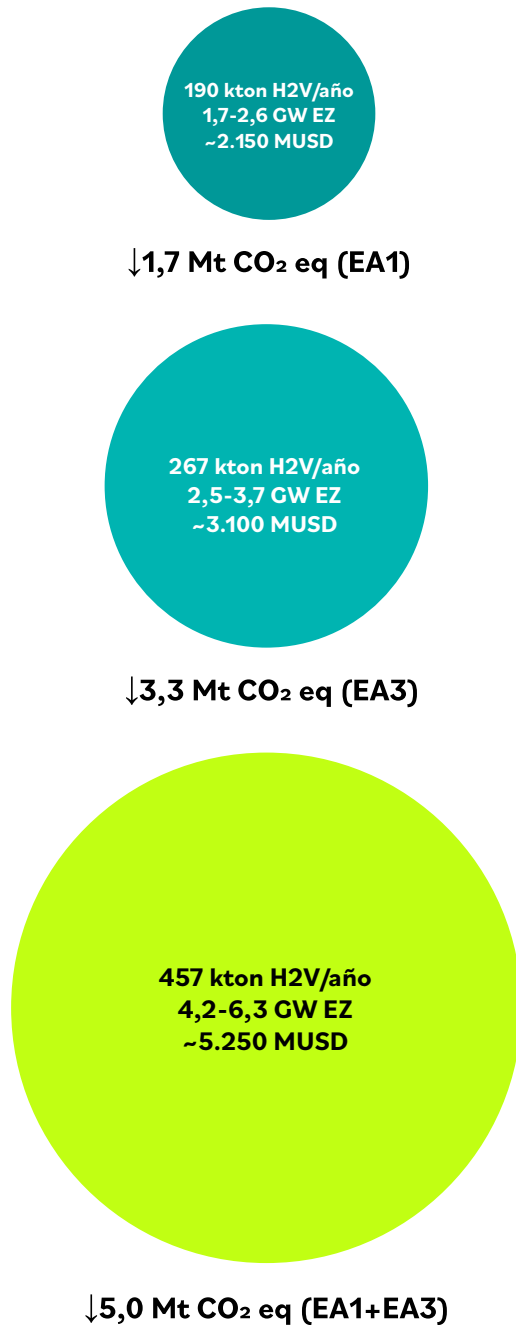
Chile tiene un creciente mercado potencial de H2V para mitigar EA1 y EA3 en la industria minera. Se presenta a continuación una estimación de la demanda de H2V desde la industria minera, capacidad de electrolizadores y plantas de fuentes renovables; y los respectivos montos de inversión estimados para el año 2030.

³⁰ LCA significa Life Cycle Assessment. En este caso, el concepto se relaciona al uso de combustibles fósiles en la fabricación de un bien, insumo o servicio para la minería.

³¹ En otros insumos críticos se incluyen cal, reactivos químicos, bolas de molienda y otros.

Figura 3-10

Potencial demanda de H2V e inversión en capacidad de electrólisis para la minería chilena del cobre al 2030



Según se muestra en la Figura 3-10, se espera que para 2030 la industria minera de Chile demande 457 kton de H2V al año y se requiera una capacidad instalada de electrolizadores (EZ) entre 4,2 y 6,3 GW. Esta capacidad instalada equivale a una inversión media sólo por concepto de electrolizadores del orden de 5.250 millones de dólares³². Asociado a esta inversión en electrolizadores, deberían considerarse las inversiones en plantas de energías renovables y la valorización de la demanda estimada de hidrógeno verde desde la industria minera.

Considerando las proyecciones de inversión unitaria en plantas fotovoltaicas y el costo de producción del hidrógeno verde hacia el año 2030, se estiman montos de inversión en plantas de energías renovables por unos 4.750 millones de dólares y una valorización de la producción de hidrógeno verde de al menos 685 millones de dólares³³. Bajo estas condiciones, la incorporación del H2V hacia 2030 permitiría reducir las emisiones EA1 y EA3 en unos 5 millones de toneladas de CO2 eq, es decir, del orden de un 15% de las emisiones totales proyectadas para el año 2030.

[3.3.3] Estimación del potencial uso de H2V en la minería en Perú e inversión en capacidad de electrólisis asociada

Para el desarrollo de estimaciones asociadas a la demanda de H2V de la industria minera del cobre de Perú, fueron considerados criterios y tasas de penetración de las aplicaciones del H2V similares al caso chileno.

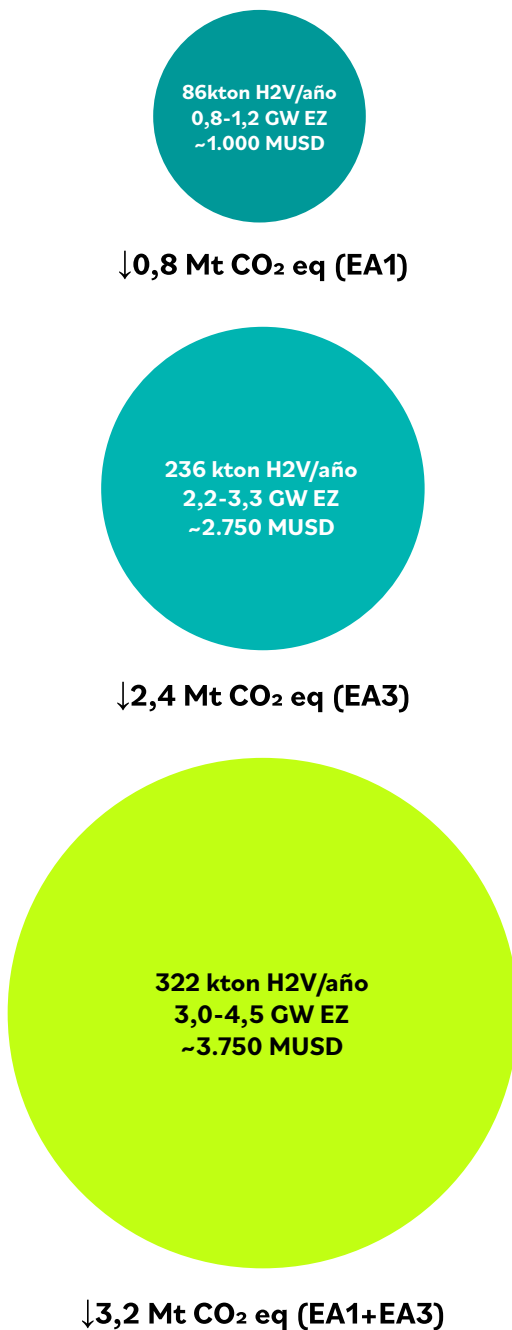
Al igual que Chile, Perú tiene un creciente mercado potencial de H2V para mitigar EA1 y EA3 en la industria minera. En la Figura 3-11, se presenta una estimación de los volúmenes de H2V, capacidad y montos de inversión de electrolizadores para el año 2030.

³² Se estima la inversión media entre la capacidad de electrolizadores máxima y mínima, dependiendo del factor de planta. Para la estimación del valor de inversión de electrolizadores supuesto en este ejercicio, se tomó en cuenta el monto de inversión (CAPEX) en electrolizadores de US\$ 1.000 millones/GW al 2030.

³³ Para la estimación del valor de inversión de plantas fotovoltaicas se tomó en cuenta el monto de inversión (CAPEX) US\$ 700 millones/GW al año 2030. Además, Se estima que hacia el 2030, el costo nivelado de la producción de hidrógeno será de 1,5US\$/kg H2V.

Figura 3-11

Potencial demanda de H2V e inversión en capacidad de electrólisis para la minería peruana del cobre al 2030³⁴



Tal como muestra la Figura 3-11, se espera que para 2030 la industria minera de Perú demande unas 322 kton de H2V verde al año, y una capacidad instalada de electrolizadores entre 3,0 y 4,5 GW. Esta capacidad instalada equivale a una inversión media, sólo por concepto de electrolizadores, del orden de 3.750 millones de dólares.

Asumiendo valores unitarios equivalentes a los indicados para el caso de Chile, se estiman montos de inversión en plantas de energías renovables por unos 3.400 millones de dólares y una valorización de la producción de hidrógeno verde de al menos 485 millones de dólares. Bajo estas condiciones, la incorporación del H2V hacia 2030 permitiría reducir las emisiones EA1 y EA3 en unos 3 millones de toneladas de CO2 eq, es decir, del orden de un 10% de las emisiones totales proyectadas para el año 2030.

[3.4] Iniciativas públicas y privadas en torno al H2V

[3.4.1] Proyectos del ecosistema global de hidrógeno verde (H2V)

El mapeo de proyectos de hidrógeno verde con aplicación en procesos mineros demuestra que existe una cantidad reducida de países que hoy día albergan proyectos de este tipo, todos ellos, con gran actividad minera. Estos países son: Canadá, Australia, Sudáfrica y Chile. La mayoría de estos proyectos de H2V en minería apuntan a dos formas de uso del hidrógeno:

1. Para generación de electricidad (“Power-to-Power”)
2. Para su uso en movilidad (“Power to Mobility”)

A la fecha, tanto Canadá, Chile y Australia cuentan con estrategias o planes nacionales de desarrollo del mercado de hidrógeno verde (países coloreados en azul oscuro en el mapa de la Figura 3-12). Sudáfrica cuenta con una hoja de ruta de H2V (South African Hydrogen Society Roadmap), mientras que Argentina aún no ha publicado tales estrategias ni hojas de ruta, pero ha iniciado discusiones políticas al respecto. Durante el año pasado, Perú desarrolló una hoja de ruta del H2V al 2050 y un grupo de expertos publicó el documento “Bases y recomendaciones para la elaboración de la Estrategia de H2V en Perú”. En la Figura 3-12 se muestran los países que cuentan con proyectos de H2V³⁵.

³⁴ Para estimar la producción de cobre de Chile y Perú al 2030 se utilizó la curva SSP3 de proyección de cobre mundial del paper: “Estimating global copper demand until 2100 with regression and stock dynamics (W. Schipper et al., 2018)” y los porcentajes actuales de producción de cobre vs producción global de Chile y Perú reportados por MINEM. Esto permite ajustar los consumos de combustibles y emisiones a la demanda global estimada de cobre para 2030 y obtener el mercado potencial de H2V para la industria minera del cobre en Chile y Perú al 2030.

³⁵ Fuente: Preparado para la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú, a partir de varias fuentes.



Figura 3-12
Países que cuentan con proyectos de H2V para su uso en minería

A continuación, se detallan los proyectos identificados en los países mencionados, basado en información pública disponible.

Sudáfrica

Proyecto nuGen™ - Anglo American (CAEX a H2V):

En el sitio minero de Mogalakwena, de Anglo American en Sudáfrica, se desarrolló el pilotaje del primer camión minero (CAEX) impulsado por hidrógeno verde. Anglo American, ENGIE, First Mode, Ballard y NPROXX formalizaron una alianza para diseñar y desarrollar este camión que se movilizará en base a hidrógeno verde en faenas mineras de rajo abierto. El proyecto consistió en reemplazar el tanque diésel por un tren de potencia que contempla celdas de combustible para el uso de hidrógeno y baterías de ion-litio. Los testeos del piloto se iniciaron a comienzos del 2022, esperando que para el año 2024 toda la flota de camiones CAEX en Mogalakwena sea impulsada por hidrógeno verde. Estos datos pueden verse en la Tabla 3-3.

Tabla 3-3

Proyecto nuGen™ de Anglo American (CAEX a H2V)

PROYECTO NUGEN™ ANGLO AMERICAN (CAEX A H2V)				
CAPACIDAD DE ELECTRÓLISIS	PRODUCTO/EQUIPO	ESTATUS	VOLUMEN DE PRODUCCIÓN	CAPACIDAD RENOVABLE
3,5 MW Electrolizador	1 camión minero (Power to Mobility)	2022 pilotaje	1 t de H2V al día	75 MW PV

Canadá

Descarbonización de suministro energético mediante H2V:

La empresa Montem Resources aspira a descarbonizar el suministro energético actual de su mina de carbón ubicada en Alberta mediante el uso de hidrógeno verde. El proyecto busca cambiar el actual complejo energético basado en combustibles fósiles de la mina “Tent Mountain”, por uno en base a recursos renovables. La energía renovable para la producción del hidrógeno verde vendrá de una central hidroeléctrica y un parque eólico, para alimentar un electrolizador de hasta 100 MW. Este proyecto podría convertirse en el primer proyecto de producción de hidrógeno verde de gran escala en Canadá. Estos datos pueden verse en la Tabla 3-4.

Tabla 3-4

Descarbonización de suministro energético mediante H2V

DESCARBONIZACIÓN DE SUMINISTRO ENERGÉTICO MEDIANTE H2V				
CAPACIDAD DE ELECTRÓLISIS	PRODUCTO/EQUIPO	ESTATUS	CANTIDAD DE PRODUCCIÓN	CAPACIDAD RENOVABLE
100 MW Electrolizador	Power-to-Power	En evaluación ambiental ³⁶	13 kt de H2V al año	420 MW mixto, compuesto por 320 MW hidro y 100 MW eólico

³⁶ Proyecto en fase de evaluación ambiental por parte del el gobierno canadiense. <https://iaac-aeic.gc.ca/050/evaluations/proj/81436>.

Generación eléctrica de respaldo: En la mina Raglan, la mayor productora de níquel del estado de Quebec, se está desarrollando un sistema híbrido para almacenar electricidad a través de hidrógeno verde. El proyecto consiste en el diseño de un sistema de almacenamiento de energía híbrido para reducir el consumo de diésel en la mina, donde se instalaron aerogeneradores con almacenamiento de energía integrado con generadores diésel. Lo que se busca es reducir las pérdidas de energía a través de sistemas de almacenamiento de respaldo. Una microrred de la empresa Hatch monitorea la demanda del recurso eólico y variaciones en el suministro. En la Tabla 3-5 pueden visualizarse los datos de la generación eléctrica de respaldo.

Tabla 3-5
Generación eléctrica de respaldo Mina Raglan, Canadá

GENERACIÓN ELÉCTRICA DE RESPALDO				
CAPACIDAD DE ELECTRÓLISIS	PRODUCTO/EQUIPO	ESTATUS	CANTIDAD DE PRODUCCIÓN	CAPACIDAD RENOVABLE
200 kW	Power-to-Power	En etapa de monitoreo	200 kW/ 4MWh baterías Li-ion	3 MW eólico

Australia

Reemplazo de 10 buses diésel por celdas de combustible de H2V: La empresa minera Fortescue Future Industries (FFI) busca reemplazar su flota actual de buses diésel por buses a H2V, en su faena minera Christmas Creek ubicada en Pilbara. Los buses a H2V serán desarrollados por Hyzon motors. La energía renovable será producida on-site mediante un sistema híbrido (solar fotovoltaico y gas). BOC, empresa subsidiaria de Linde Plc, será el encargado de proveer la tecnología asociada a la producción de hidrógeno y la infraestructura para la estación de servicios. El Gobierno de Australia entregó un subsidio de USD 1,4 millones para el desarrollo del proyecto que tiene una inversión total estimada de USD 24 millones. La Tabla 3-6 muestra los datos para el reemplazo de 10 buses diésel por celdas de combustible de hidrógeno verde.

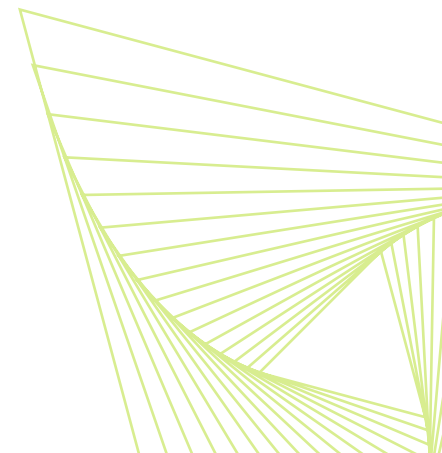


Tabla 3-6

Reemplazo de 10 buses diésel por celdas de combustible de H2V

REEMPLAZO DE 10 BUSES DIÉSEL POR CELDAS DE COMBUSTIBLE DE H2V				
CAPACIDAD DE ELECTRÓLISIS	PRODUCTO/EQUIPO	ESTATUS	CANTIDAD DE PRODUCCIÓN	CAPACIDAD RENO-VABLE
0,7 MW Electrolizador	10 buses	2022 operación	180 kg de H2V al día	60 MW híbrido

Proyectos piloto de equipos mineros bajo carbono (CAEX y Perforadora):

Otro proyecto ejemplar que se está desarrollando en Australia, también por FFI, División Fortescue Metals Group (FMG), es el desarrollo tecnológico y testeo de un camión CAEX y una perforadora bajo/cero carbono en un Centro de Investigación y Testeo en Perth, donde se están considerando tanto soluciones basadas en baterías eléctricas como en H2V. En cuanto al camión CAEX, FMG está trabajando junto con la empresa de ingeniería Williams Advanced Engineering (WAE) para testear el desempeño de un camión con capacidad de 240 t de la marca Liebherr antes de su uso operativo en la División de Fortescue Mining Group en Pilbara. FMG anunció el plan de adquirir alrededor de 120 camiones tras un testeo exitoso, para reemplazar el 45% de su flota y así facilitar el cumplimiento de reducción de sus emisiones.

[3.4.2] Chile

[3.4.2.1] Iniciativas públicas

La Figura 3-7 muestra un listado de iniciativas, la entidad que la lidera, el objetivo de la iniciativa y una breve descripción. El sector público chileno ha lanzado múltiples iniciativas para promover el desarrollo del mercado del hidrógeno verde. A continuación, se muestra la tabla que resume las iniciativas más importantes.



Tabla 3-7

Resumen de las principales iniciativas en torno al H2V en Chile

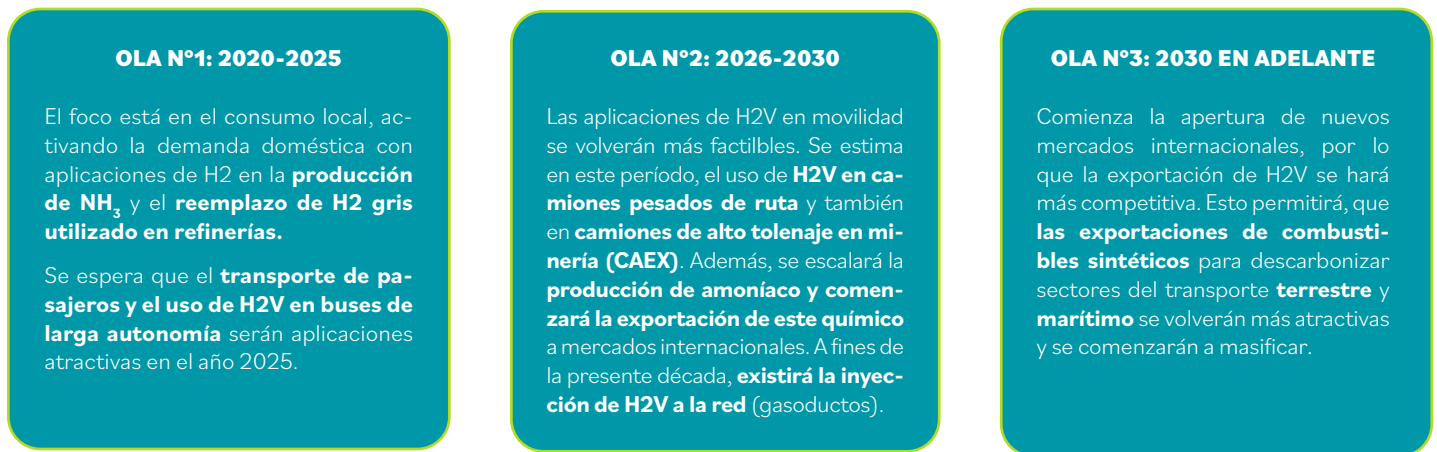
INICIATIVA	LIDERADO POR	OBJETIVO	DESCRIPCIÓN
Estrategia Nacional de H2V	Ministerio de Energía	Contar con una hoja de ruta como carta de navegación para la industria	Hoja de ruta que posiciona a Chile como un actor clave del desarrollo del mercado de H2V a nivel global
Financiamiento para proyectos de H2V	CORFO	Incentivar desarrollo de mercado	Fondo (50 millones de USD) para cubrir gastos en plantas de electrólisis > 10MW
Co-financiamiento Estudios de Pre-inversión	Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID)	Incentivar desarrollo de mercado	Subsidio para financiar proyectos de H2V en Chile
Ventana al Futuro	Ministerio de Energía + Ministerio de Bienes Nacionales	Incentivar desarrollo de mercado	Cesión de terrenos nacionales para proyectos de producción de H2V
Instituto de Tecnologías Limpias	CORFO	Formación de capital humano / I+D	Creación del primer instituto I+D en Chile, incluyendo actividades investigativas alrededor del H2V
Curso de H2V	CORFO	Formación de capital humano	Primer curso abierto al público en temas de H2V
Misión Cavendish	Club de Innovación	Formación de Capital Humano	Espacio para generar conocimientos asociados a temas de H2V en Chile
Aceleradora H2V	Agencia de Sostenibilidad Energética	Incentivar desarrollo de mercado	Cofinanciamiento para estudios de pre-factibilidad, para incentivar el desarrollo de proyectos de H2V
Hub de H2V Antofagasta	CORFO REGIONAL	Mejorar la competitividad y el desarrollo sostenible del ecosistema innovador energético de la zona, a partir del desarrollo y creación de un Hub regional de H2V	Proyecto de bien público orientado al levantamiento de casos de uso y servicios tecnológicos para el desarrollo y creación de un Hub de H2V en la región de Antofagasta

1. Estrategia nacional de H2V

En noviembre de 2020, el Gobierno de Chile presentó una ambiciosa estrategia nacional de desarrollo del mercado del hidrógeno verde que lo posiciona como protagonista a nivel mundial. Esta estrategia plantea metas de desarrollo específicas a corto, mediano y largo plazo y prevé un desarrollo del mercado en tres principales oleadas (Ver Figura 3-13)³⁷.

Figura 3-13

Olas de la Estrategia Nacional de H2V de Chile



Las metas específicas formuladas en la estrategia nacional de H₂V de Chile son las siguientes:

Periodo 2020 - 2025: Tener 5GW de capacidad instalada de Electrolizadores (EZ), ya sea construida y en desarrollo. Convertirse en el país top 1 en inversiones de H₂V en Latam, y producir 100 kton/año en dos polos de H₂V (Antofagasta y Magallanes).

Periodo 2025 - 2030: Producir el H₂V más barato del mundo a costos menores a 1,5 USD/kg H₂V y estar entre los top 3 exportadores de H₂V y derivados a nivel global.

Para alcanzar este desarrollo de mercado y estas metas, la estrategia define 8 ejes estratégicos de trabajo:

- Objetivos estratégicos
- Regulación
- Incentivos y financiamiento
- Coordinación y alianzas
- Cadena de suministro
- Investigación y desarrollo
- Infraestructura
- Capital humano

2. Financiamiento para proyectos de H2V

En abril de 2021, CORFO lanzó un fondo de financiamiento por un total de 50 millones de dólares para acelerar el desarrollo de proyectos de H₂V. El fondo está orientado a cubrir gastos en electrolizadores, donde el monto máximo a repartir por proyecto fue de 30 millones de dólares. Los requisitos para aplicar al fondo es que la planta de electrólisis tenga una capacidad mínima de 10 MW y que

³⁷ Fuente: Preparado para la Hoja de Ruta del H₂V para la minería de Chile y Perú, basado en la Estrategia Nacional de Hidrógeno (2020).

esté operando a más tardar en diciembre de 2025. Se declararon admisibles 6 de 10 proyectos que postularon, incluyendo entre ellos, el proyecto “HyEx” de producción de amoníaco verde (NH₃) para explosivos para la minería y el proyecto “Green Steel” de la empresa minera-siderúrgica chilena CAP. En la Tabla 3-8 se muestran los proyectos adjudicados por el Fondo CORFO³⁸.

Tabla 3-8

Proyectos adjudicados
por el Fondo CORFO

PROYECTOS SELECCIONADOS	EMPRESA	FINANCIAMIENTO (USD MILLONES)	ESTADO ACTUAL ³⁹
Proyecto Faro del Sur	Enel Green Power Chile	16,9	Proyecto en stand by. Empresas decidieron retirar el estudio de impacto ambiental que fue ingresado en agosto de 2022 al SEA
AMER E-Methanol	Air Liquide	11,8	No se dispone de antecedentes sobre su estado actual
Hy-Ex	Engie S.A./Enaex	9,6	Proyecto en desarrollo con aprobación ambiental
H2V Bahía de Quinteros	GNL Quintero S.A.	5,7	Proyecto en búsqueda de OFF-TAKERS
Green Steel	CAP S.A.	3,6	No se dispone de antecedentes sobre su estado actual
HyPro Aconcagua	Linde Gmbh	2,4	No se dispone de antecedentes sobre su estado actual

3. Cofinanciamiento para estudios de H2V

La Agencia Chilena de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AGCID), en cooperación con la Unión Europea, en 2021 anunció un programa para financiar estudios de pre-inversión de proyectos de producción, almacenamiento, transporte y/o uso de H2V. El monto total del fondo asciende a 300.000 euros, y los postulantes deben financiar al menos un 50% del estudio de pre-inversión. En la Tabla 3-9 se muestran las empresas adjudicadas con co-financiamiento de la AGCID.

³⁸ Fuente: Preparado para la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú.

³⁹ Descripción del estado actual de los proyectos, realizada a partir de información extraída del siguiente enlace: <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2022/10/estado-actual-seis-proyectos-hidrogeno-verde-seleccionados-corfo>.

Tabla 3-9

Empresas adjudicadas con co-financiamiento de la AGCID⁴⁰

EMPRESAS POSTULANTES	FINANCIAMIENTO
Sociedad de Inversiones Albatros	EUR 60.178
CVE Energía Renovable	EUR 50.000
Statkraft	EUR 40.000
Cerro Dominador	EUR 38.034
Mowi	EUR 30.000
FreePower	EUR 23.000
RWE	EUR 26.500
Collahuasi	EUR 16.703
Antuko	EUR 15.855

4. Ventana al futuro

La iniciativa “Ventana al futuro” nace como consecuencia del trabajo desarrollado por la mesa técnica de hidrógeno verde compuesta por los Ministerios de Energía y de Bienes Nacionales además de CORFO. La iniciativa consiste en disponer terrenos fiscales a través de concesiones para la instalación de plantas de producción de hidrógeno verde. Normalmente, estas concesiones se realizan a través de licitaciones públicas, pero de forma excepcional el Ministerio de Bienes Nacionales ha puesto a disposición esta asignación de terrenos de forma directa para fomentar el desarrollo de proyectos de H2V en Chile. Las concesiones se entregarán para un período de 40 años, y estipulan la producción de hidrógeno verde y sus derivados. Los requisitos más importantes son que las plantas de electrólisis deben disponer de una capacidad mayor a 20 MW; su construcción debe comenzar en el año 2025, y debe estar operativa en el año 2030.

5. Instituto de Tecnologías Limpias (ITL)

La inversión estimada del Instituto será de al menos 276 millones de dólares⁴¹, distribuidos en los próximos 10 años, para proyectos que investiguen y desarrollen tecnologías “limpias”, es decir cero carbono. De esta inversión total, se dispondrá de un financiamiento base máximo de 193,5 millones de dólares, provenientes de los aportes I+D administrados por CORFO; y el monto restante, será aportado por las entidades adjudicadas. El objetivo de este centro

I+D será potenciar el desarrollo regional y nacional con foco en materias de energía renovable, minería sustentable, materiales avanzados de litio y el fomento del hidrógeno verde.

6. Curso de H2V

Gracias al patrocinio del programa Euroclima+, liderado por la Unión Europea, CORFO lanzó un curso de hidrógeno verde 100% gratuito para formar interesados en conceptos de hidrógeno verde. El curso es abierto sin requisitos de postulación y busca mejorar los conocimientos locales acerca de las oportunidades de este nuevo mercado a nivel nacional y global.

7. Misión Cavendish

Liderado por el Club de Innovación y en conjunto con “H₂ Chile”, se creó “Misión Cavendish”, un espacio de discusión y aprendizaje de profesionales para fomentar el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde en Chile. El objetivo principal es disminuir asimetrías de información a través de seminarios y talleres para incentivar y preparar al sector público, privado y académico para el desarrollo del mercado del hidrógeno verde en Chile. El curso “Profesor Cavendish”, que trata sobre materias de hidrógeno verde, ya se encuentra disponible en el sitio web.

⁴⁰ Fuente: Preparado para la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú a partir de varias fuentes.

⁴¹ Estimación realizada en función de lo estipulado en el documento “Procedimiento de Solicitud de Propuestas (RFP) para la conformación del Instituto Chileno de Tecnologías Limpias, preparado por CORFO”.

8. Aceleradora de hidrógeno verde

El objetivo principal de esta iniciativa es incentivar el desarrollo de proyectos de hidrógeno verde y brindar apoyo en etapas iniciales de proyectos. Para esto, el apoyo se divide en dos etapas:

- a. **Etapa 1:** Apoyar el desarrollo de proyectos en etapas iniciales para aplicar a fondos de co-financiamiento. El proyecto “Locomotora a H2V de FCAB” fue uno de los proyectos seleccionados.
- a. **Etapa 2:** Se entregará financiamiento a aquellos proyectos admisibles. El presupuesto total del fondo es de 300 millones de pesos.

[3.4.2.2] Iniciativas privadas

Gracias al fuerte impulso de las iniciativas públicas mencionadas anteriormente y las ventajas comparativas que presenta Chile en términos de recursos renovables, múltiples proyectos de H2V ya se encuentran en articulación y desarrollo.

La Figura 3-14 muestra un resumen con los principales proyectos promovidos por el sector privado que se están desarrollando a lo largo de Chile⁴².

La mayoría de los proyectos de hidrógeno verde en desarrollo, se ubican en la zona sur, gracias al excelente recurso eólico que se encuentra en la Patagonia Austral, y en el norte de Chile, zona donde se registran mediciones de radiación solar de las más altas del mundo. En la zona norte del país, la minería se ve como un *driver* muy importante de demanda.

El Ministerio de Energía (2021) estimó que la inversión en proyectos de hidrógeno verde para el año 2030 superará los 15.000 millones de dólares. Los proyectos mapeados comparten denominadores en común, los cuales son:

- **Implementación gradual:** Desde una fase piloto con poca capacidad instalada, mediante un aumento de capacidad progresivo hacia una escala industrial.
- **Recursos energéticos renovables con planta desalinizadora:** La producción de hidrógeno verde se da en base a recursos renovables ya sea eólico o solar. La

mayoría de los proyectos consideran plantas desaladoras para su uso en el proceso de electrólisis.

- **Cooperación:** Todos los proyectos están siendo desarrollados por una o más compañías en conjunto, principalmente para reducir el riesgo que conlleva el desarrollo de este tipo de proyectos con tecnologías nuevas, y en su mayoría de alta capacidad instalada. Además, se ve que las compañías se asocian de manera de sumar diferentes experticias, por ejemplo, un desarrollador de proyectos de energía renovable que se asocie con una empresa proveedora de servicios de tratamiento y transporte de sustancias peligrosas (gases y combustibles líquidos, entre otros).



⁴² Fuente: Preparado para la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú a partir de información del Ministerio de Energía (2021).

Figura 3-14
Proyectos de H2V anunciados y en desarrollo a lo largo de Chile



Se describen a continuación algunos de los proyectos que se están desarrollando en Chile.

H2V para descarbonizar insumos para procesos mineros: El proyecto HyEx de las empresas Enaex (empresa dedicada a la producción de nitrato de amonio y explosivos para la minería); y Engie, producirá amoníaco verde (NH₃) en el Norte de Chile, como insumo para la producción de explosivos que serán usados en la industria minera. El amoníaco es un producto fundamental para los procesos de tronadura en la minería, que requieren el uso de explosivos – por ende, el uso de NH₃ producido mediante H2V, aporta a la descarbonización, reduciendo las emisiones de alcance 3. El proyecto contempla dos fases:

- **Piloto:** Todo el hidrógeno verde producido será destinado para producir NH₃ verde en la planta Prillex de Enaex.
- **Industrial:** Esta fase considera un significativo aumento de los volúmenes de producción para una exportación de NH₃ verde a mercados internacionales.

El proyecto piloto fue sometido a la Declaración de Impacto Ambiental (DIA) en agosto 2021 y recibió la Resolución de Calificación Ambiental (RCA) favorable por parte del Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) en abril de 2022. En la Tabla 3-10 se pueden ver los detalles del Proyecto HyEx (fase piloto).

Locomotoras 100% impulsadas mediante hidrógeno verde: Ferrocarriles de Antofagasta a Bolivia (FCAB), que es la División de Transporte de la empresa minera Antofagasta Plc, está desarrollando un proyecto para transformar su actual flota de más de 70 locomotoras diésel a hidrógeno verde en la región de Antofagasta. El proyecto consiste en reacondicionar las locomotoras del Terminal Ferroviario de Mejillones, que actualmente provee servicios a varias mineras como Escondida, Spence, El Abra, Zaldívar, Codelco Chuquicamata, Codelco Gabriela Mistral, San Cristóbal, Sierra Gorda y Altonorte, haciéndolas aptas para usar hidrógeno verde y así reemplazar el consumo de diésel. Este proyecto fue seleccionado en el marco del programa de fomento “Aceleradora de Hidrógeno Verde” de la Agencia de Sostenibilidad Energética. FCAB tiene la opción de convertirse en la primera empresa del rubro de transporte de carga en Sudamérica en contar con locomotoras a hidrógeno verde.

Transporte de carga: En el año 2021, Anglo American produjo la primera molécula de hidrógeno verde en Chile para alimentar una grúa horquilla en su sitio minero Las Tórtolas. A través de un electrolizador y agua reutilizada y desmineralizada del mismo sitio minero, este proyecto piloto está produciendo 2 kg de H2V/día para impulsar una grúa horquilla a través de una celda de combustible y así descarbonizar procesos logísticos de la compañía. Este piloto también incorpora una celda de combustible estacionaria⁴³ que inyecta energía limpia a la red (ver Tabla 3-11).

Tabla 3-10
Proyecto HyEx (fase piloto)

PROYECTO HYEX (FASE PILOTO)				
CAPACIDAD DE ELECTRÓLISIS	PRODUCTO/EQUIPO	ESTATUS	CANTIDAD DE PRODUCCIÓN	CAPACIDAD RENOVABLE
26 MW EZ	Amoníaco (NH ₃)	En proceso de evaluación ambiental	18,000 t NH ₃ /año	36 MW PV

Tabla 3-11
Pilotaje de grúa horquilla en sitio minero Las Tórtolas

PRODUCTO/EQUIPO	ESTATUS	PRODUCCIÓN DE H2V	CAPACIDAD RENOVABLE
1 grúa horquilla	Pilotaje (2021)	2 kg de H2V/día	186 kW

⁴³ La grúa horquilla funciona mediante una celda de combustible, pero además el piloto incorpora una celda de combustible estacionaria que reinyecta energía a la red de electricidad de la mina para sus operaciones. Las pilas o celdas de combustible estacionarias son una tecnología de generación distribuida capaces de generar electricidad y calor cerca del punto de consumo.

Por otro lado, en Chile se desarrollaron algunos proyectos piloto para testear tecnologías de hidrógeno verde en vehículos mineros con apoyo de CORFO, Corporación Chilena de Fomento de la Producción, dependiente del Ministerio de Economía. Dos proyectos iniciaron su desarrollo, pero tuvieron término anticipado. Estos proyectos son los siguientes:

1. Combustión dual (H2V-diésel) en camiones CAEX:

Este proyecto tuvo por objetivo desarrollar el primer prototipo de un camión CAEX dual a H2V - diésel en faenas mineras. El costo del proyecto alcanzó del orden de 20 millones de dólares, con un co-financiamiento de 5,5 millones de dólares por parte de CORFO. El desarrollador del proyecto fue Alset.

2. Electromovilidad mediante celdas de H2V:

La Universidad Técnica Federico Santa María lideró, junto a un consorcio internacional, la adaptación de equipos mineros que actualmente funcionan en base a diésel, a hidrógeno verde; mediante celdas de combustible. El proyecto original contemplaba dos etapas: la primera tenía una duración de 2 años, y tenía por objetivo testear los primeros prototipos, mientras que, en la segunda fase de duración de 3 años, se buscaba poner a prueba los dispositivos en camionetas que serían utilizadas en faenas mineras.

En general, los proyectos de hidrógeno verde con aplicaciones en la minería están enfocados en aquellos procesos y equipos que son difíciles de electrificar. Entre los proyectos de aplicación de hidrógeno verde en minería existentes a la fecha, destacan aplicaciones relacionadas con la movilidad y el almacenamiento de energía.

Para el caso de Chile y Perú, el desafío más grande es demostrar la factibilidad tecnológica en alturas geográficas elevadas y bajos niveles de oxígeno.

Se puede concluir que las aplicaciones más atractivas para incorporar hidrógeno verde en la minería son:

- **Generación de electricidad de respaldo:** Es una de las aplicaciones más atractivas para disminuir el consumo de combustibles fósiles (generadores diésel) en las minas; y así reducir las emisiones de gases de efecto invernadero.
- **Transporte de minerales, insumos y personal, especialmente equipos de movilidad pesada (camiones CAEX a H2V):** Proyectos con foco en movilidad tienen el potencial de disminuir drásticamente las emisiones directas asociadas al proceso productivo de minerales.

Muchos de los 40 proyectos más serios que se encuentran actualmente en desarrollo en Chile, están orientados a producir amoníaco verde (NH3V) para fines de exportación, ya que este derivado del hidrógeno verde, al estado del desarrollo tecnológico actual, permite ser transportado a costos menores que el hidrógeno verde puro licuado. En la Figura 3-15 se muestran las principales características de los proyectos de hidrógeno verde en Chile⁴⁴.

Figura 3-15
Principales características
de los proyectos de H2V en Chile



44 Fuente: Preparado para la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú a partir de varias fuentes.

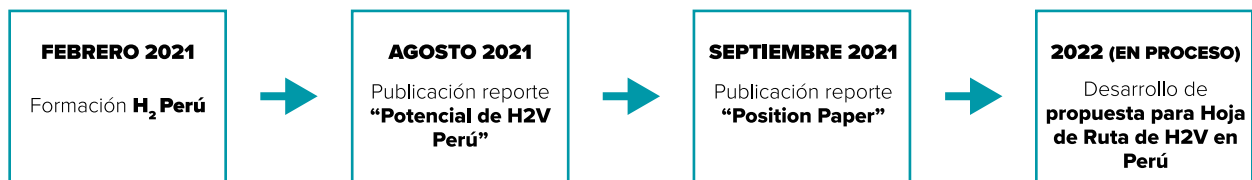
[3.4.3] Perú

[3.4.3.1] Iniciativas públicas

Perú aún no cuenta con un fuerte apoyo gubernamental como en el caso de Chile. Sin embargo, la industria del H₂V en Perú ha comenzado a tomar acciones concretas desde la formación de la Asociación Peruana de Hidrógeno “H₂ Perú”. En la Figura 3-16 se muestran los avances en temas de hidrógeno verde en Perú⁴⁵.

Figura 3-16

Avances de Perú en temas de H₂V



1. Asociación Peruana del Hidrógeno

La asociación peruana de hidrógeno se formó con el objetivo de representar al ecosistema del hidrógeno verde en Perú. H₂ Perú es una organización sin fines de lucro que reúne los actores de distintos sectores con la ambición de una descarbonización del Perú a largo plazo a través del uso de hidrógeno verde. La Asociación actualmente cuenta con 3 comités de trabajo, 8 aliados estratégicos y más de 20 socios corporativos.

2. Publicación Potencial del H₂V en Perú

Junto a la empresa Engie Impact, la Asociación Peruana de Hidrógeno publicó en agosto de 2021, el estudio “Potencial de hidrógeno verde en Perú”, que muestra las ventajas que presenta el país para producir hidrógeno verde con proyecciones para los años 2030, 2040 y 2050. El documento concluye que se podrían llegar a demandar 9 GW de capacidad de electrólisis instalada y 15 GW de renovables en el año 2050⁴⁶.

3. Publicación “Position Paper”

En septiembre del 2021, H₂ Perú publicó un *Position Paper* que busca crear una visión de prosperidad compartida y sostenible en torno al hidrógeno verde, resaltando el potencial de mercado que tiene Perú y su legitimación para combatir el cambio climático.

Además, en el primer semestre de 2022, H₂ Perú entregó una propuesta para la elaboración de una hoja de ruta nacional al gobierno peruano, cuyo resumen puede descargarse de la página web de H₂ Perú⁴⁷. En la Figura 3-17 se muestran los socios corporativos de la Asociación Peruana de Hidrógeno (H₂ Perú)⁴⁸.

⁴⁵ Fuente: Preparado para la Hoja de Ruta del H₂V para la minería de Chile y Perú a partir de varias fuentes.

⁴⁶ <https://www.energiaestrategica.com/H2-peru-propondra-una-normativa-del-hidrogeno-durante-el-primer-trimestre-del-año/>.

⁴⁷ <https://bit.ly/3MsiWEu>.

⁴⁸ Fuente: H₂ Perú (2021).

Figura 3-17
Socios corporativos de la Asociación H₂ Perú

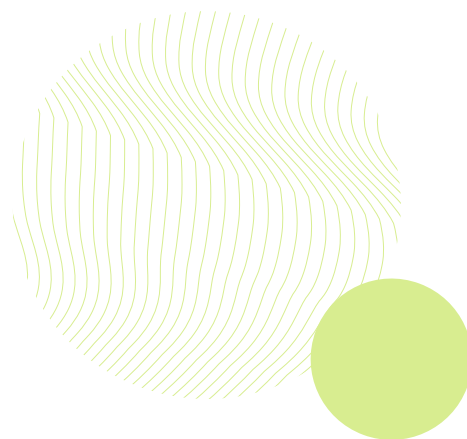


[3.4.3.2] Iniciativas privadas

Existen tres iniciativas privadas concretas asociadas a la producción y consumo de hidrógeno verde en Perú. El país tiene la peculiar característica que desde el año 1965 ha sido precursor en la producción de hidrógeno verde basado en energía hídrica, con la planta industrial Cachimayo, que es el único proyecto de hidrógeno verde en operación. En este sentido, Perú es un vanguardista en la producción de hidrógeno verde, ocupando electricidad proveniente de energía hídrica, lo cual es asegurado por un PPA contratado por la empresa hasta el año 2023. En la Figura 3-18 se muestra el mapeo de proyectos o iniciativas de hidrógeno verde en Perú⁴⁹. En la Figura 3-19 se presentan algunos datos técnicos asociados a la producción de hidrógeno verde de la planta industrial de Cachimayo.

La minería (punto 2 en el mapa) se asoma como el sector con mayor potencial para consumir hidrógeno verde, y actualmente actores relacionados a la industria del hidrógeno están evaluando proyectos con foco en la industria minera de Perú (detalles sobre las empresas correspondientes son confidenciales).

Aparte de esto, desarrolladores de proyectos de energías renovables están estudiando la posibilidad de almacenar hidrógeno para energía de respaldo e inyectar electricidad limpia a la red (detalles sobre las empresas correspondientes son confidenciales).



⁴⁹ Fuente: Preparado para la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú a partir de varias fuentes.

Figura 3-18

Mapeo de proyectos/iniciativas de H2V en Perú



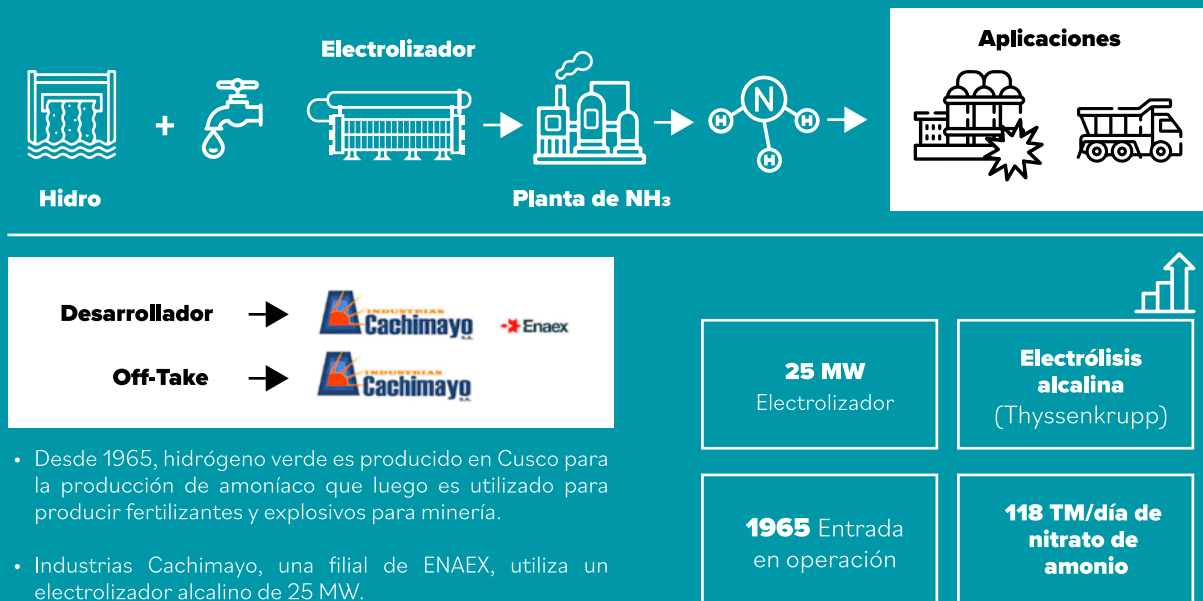


Figura 3-19
Producción de H₂V
en Industrias Cachimayo⁵⁰

⁵⁰ Fuente: basado en información pública disponible.



04 Contexto y alcance de la hoja de ruta

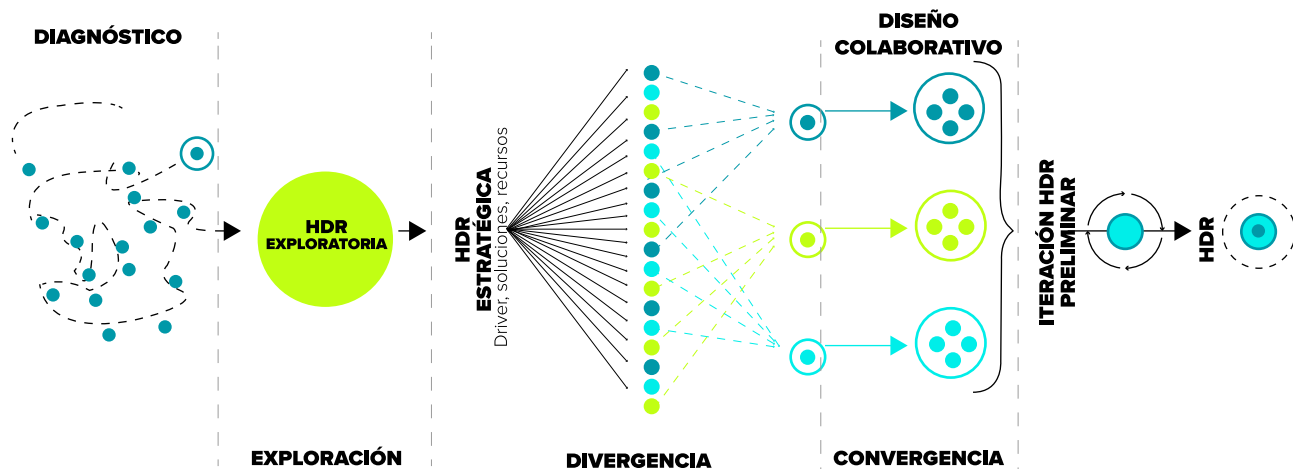
[4.1] Descripción del proceso

La “hoja de ruta” o “roadmap”, es una herramienta de planificación que permite que las capacidades tecnológicas disponibles cumplan con los objetivos establecidos, alineando los recursos y evitando el desperdicio en temas que no aportan al foco estratégico. Además, permite consolidar la información referente a las temáticas relevantes para el desarrollo de la industria de hidrógeno verde, a la vez que incluye los plazos de implementación o desarrollo de éstas, la visión del programa; los elementos y las brechas correspondientes.

El desarrollo de la hoja de ruta se realizó siguiendo cinco etapas que permitieron obtener información y facilitar la convergencia de ideas, desde lo más general, hasta lo más específico.

La primera etapa busca desarrollar, primeramente, un proceso de diagnóstico para conocer fortalezas y debilidades en la implementación del proyecto. Seguidamente, se realiza un proceso de exploración donde se busca identificar la situación actual y la línea base de donde parte el proyecto, la tecnología y actores claves para su desarrollo. Posteriormente, a través de procesos colaborativos y divergentes se genera información involucrando a los distintos actores que tienen interés en desarrollar el hidrógeno verde. Luego, en mesas de trabajo, con personal calificado, se genera un proceso de convergencia de ideas en lo que será el producto que se irá iterando hasta el resultado definitivo de la hoja de ruta. Este proceso puede verse en la Figura 4-1.

Figura 4-1
Etapas de la hoja de ruta (HDR)

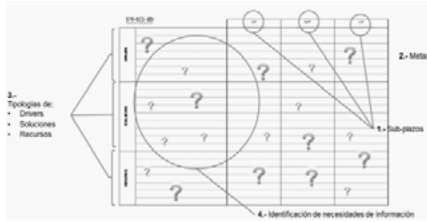


El co-diseño de la hoja de ruta consideró tres talleres principales, realizados por medio de jornadas colaborativas y participativas que aseguran la representatividad del ecosistema y las partes de interés. En la Figura 4-2, se muestra la secuencia en que fueron realizados estos talleres durante el desarrollo de esta hoja de ruta.

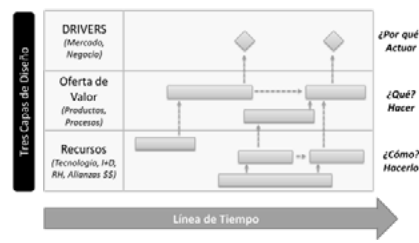
Figura 4-2

Talleres de la hoja de ruta (HDR)

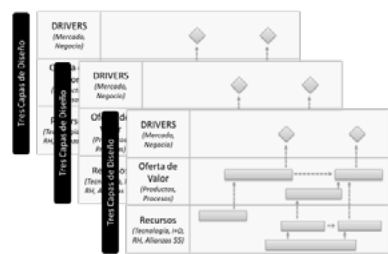
1. Taller HDR Exploratorio



2. Taller HDR Estratégico (Plan S)



3. Taller HDR Táctico (Plan T)



[4.2] Directorio y participación cadena de valor

En la primera jornada, se realizó un taller exploratorio con un grupo acotado de personas con visión estratégica. Este grupo de personas aportó sus ideas para la construcción de la visión, valores y objetivos que serán el marco referencial para esta hoja de ruta. También se identificaron las brechas centrales que podrían dificultar el cumplimiento de la visión compartida.

En la segunda jornada se realizó un taller ampliado con la inclusión de diferentes actores de la industria minera, buscando detectar información de las necesidades y desafíos del mercado, así como las potenciales oportunidades de iniciativas que permitan el cierre de brechas. En esta etapa, se conocieron cuáles podrían ser las iniciativas que permitirían cerrar las brechas identificadas anteriormente.

En la tercera y última jornada se realizó un diseño de proyectos tácticos a partir de las iniciativas priorizadas. Además, se indicaron los lineamientos para la implementación y se obtuvo como resultado la hoja de ruta con los diferentes proyectos estipulados y su respectiva temporalidad. Posteriormente se propuso una “Gobernanza” que asegure la implementación de la hoja de ruta y el logro de los objetivos definidos para esta.

Corporación Alta Ley y SAMMI Clúster Minero Andino coordinaron un trabajo colaborativo con representantes de 10 compañías mineras y el ecosistema de Chile y Perú, orientado al desarrollo de la hoja de ruta binacional que busca implementar aplicaciones de hidrógeno verde (H2V) en minería.

La Figura 4-3 muestra las compañías mineras de Chile y Perú que formaron parte del directorio de la hoja de ruta.



Figura 4-3

Compañías mineras integrantes del directorio de la hoja de ruta del hidrógeno verde

tes a todas las categorías de la cadena de suministro⁵¹ del H2V representadas en la Figura 4-4.



Figura 4-4
Cadena simplificada de suministro del H2V

Las categorías a las cuales pueden pertenecer los actores en los ecosistemas de Chile y Perú son:

- **Desarrolladores:** Se encuentran desarrollando o evaluando proyectos de H2V en Chile y/o Perú (eslabón No. 1 de la cadena de suministro).
- **Proveedores de tecnología:** Empresas fabricantes de equipos requeridos para la realización de un proyecto de H2V o derivados, por ejemplo: fabricantes de electrolizadores, o proveedores de unidades de separación de aire (ingl. *Air Separation Unit, ASU*), requeridas para el proceso de producción de NH_3 (eslabón No. 2 de la cadena de suministro). Su expertise y presencia en la región juegan un rol clave para la realización de los proyectos.
- **Proveedores de servicios de conversión, almacenamiento, transporte, distribución y reconversión:** Empresas que forman parte de los eslabones N°3, 4, 5 y 6 de la cadena de suministro.
- **Instituciones transversales:** Apoyan a desarrolladores de proyectos con sus conocimientos en temas de hidrógeno verde.

- **Academia / I+D:** Instituciones internacionales o nacionales que apoyan el desarrollo y la realización de proyectos piloto de tecnologías asociadas al hidrógeno verde.
- **Instituciones públicas:** Ministerios o agencias gubernamentales que están impulsando activamente la industria del hidrógeno verde a través de distintas instancias.
- **Off-takers:** Actuales y posibles futuros consumidores de hidrógeno verde. Este grupo pertenece al eslabón No. 7 de la cadena de suministro y se presenta separado por país, ya que la cantidad de posibles consumidores de hidrógeno verde, sus derivados y su demanda, tiene influencia directa en el tamaño de mercado esperado para cada país.

La Figura 4-5 muestra algunos de los stakeholders para Chile y Perú en las 6 categorías mencionadas anteriormente.

⁵¹ Una cadena de suministro está formada por todos aquellos procesos involucrados de manera directa o indirecta en la acción de satisfacer las necesidades de los consumidores finales, considerando cada uno de los eslabones.

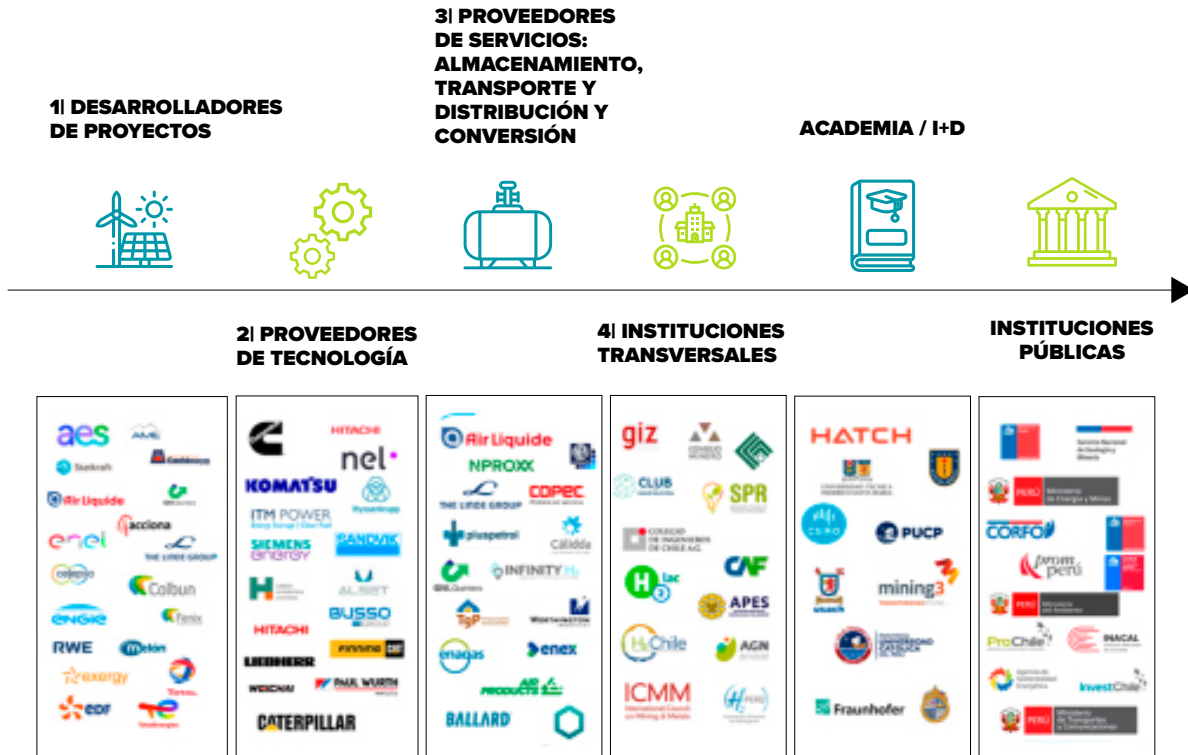


Figura 4-5

Stakeholders a lo largo de la cadena de valor del hidrógeno verde en Chile y Perú identificados según categorías

Para el caso de los off-takers⁵², estos se muestran separados por país, ya que este grupo de actores influye directamente en la demanda de hidrógeno verde en cada país – diferenciando entre el principal mercado objetivo, la minería – y otros sectores de consumo que puedan involucrarse en proyectos (especialmente “Hubs” de producción con múltiples actores y consumidores) y participar de proyectos de H2V y/o verse beneficiados por éstos.

La Figura 4-6 muestra algunos de los off-takers de hidrógeno verde identificados en Chile y Perú⁵³.

[4.3] Alcance y marco de acción

Una de las principales ventajas competitivas en la aplicación de hidrógeno verde en la minería es que los principales distritos mineros de Chile y Perú se ubican en zonas de alto potencial renovable solar (ver la Figura 4-7) y también eólico, lo que reduce el costo de la producción del hidrógeno. Debe tenerse presente que el costo de la electricidad representa entre un 60-70% de los costos totales de la producción de hidrógeno verde.

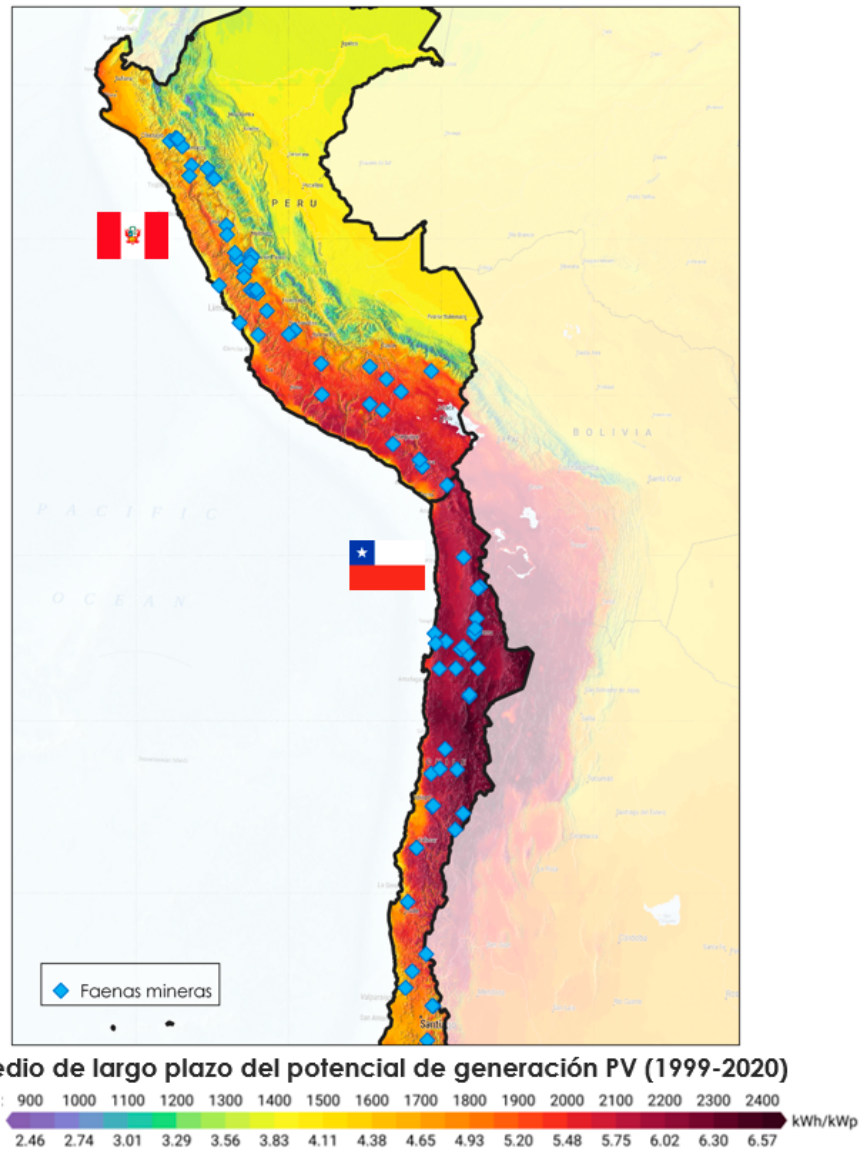
⁵² Los off-takers identificados se dividen en dos categorías: i) mineras y ii) otros sectores que incluye a las industrias de cemento, siderúrgica, transporte, metalurgia, industrias químicas.

⁵³ Fuente: Preparado especialmente para la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú.



Figura 4-6
Off-takers de H2V identificados en Chile (izquierda) y Perú (derecha)

Figura 4-7
Potencial de generación fotovoltaica (PV) en Chile y Perú



Según muestra la Figura 4-7, el potencial de generación de electricidad mediante energía solar fotovoltaica (PV) en ambos países es superior a los 2.000 kWh/kWp de capacidad instalada al año, posicionando al Norte de Chile y al Sur del Perú dentro de las zonas geográficas más atractivas en términos de recurso solar a nivel global y regional⁵⁴.

Además, las principales faenas mineras se concentran en distritos mineros donde una agregación de demanda favorece la creación de los denominados HUBs⁵⁵ de producción de hidrógeno verde.

El hidrógeno verde es una gran oportunidad para la descarbonización especialmente de la industria del cobre, debido a múltiples factores:

- Los nuevos mercados de minerales “verdes”, a nivel global, demandarán un cobre carbono neutral, debido a criterios de sustentabilidad de productos y sus procesos productivos cada vez más exigentes.
- La escala productiva de las faenas mineras de cobre tanto chilenas como peruanas podrían inducir una demanda de hidrógeno verde relevante y que resulte clave para el desarrollo de capacidades productivas y capital humano para ambos países.
- El reemplazo de combustible con alternativas carbono neutrales distintas al H₂V, no son competitivas debido a características y volúmenes operacionales, su extensión y dinamismo⁵⁶.
- La larga vida útil de las minas de cobre (+25 años) permite amortizar los importantes volúmenes de inversión y, a partir de las economías de escala, reducir los costos operacionales. En este sentido existe una diferencia con la minería del oro donde las faenas habitualmente tienen una vida útil menor (del orden de 10 años).

[4.4] Visión y valores esenciales

Para la construcción de la “Visión Compartida” se realizó un taller de carácter estratégico, en el cual se identificaron las ideas esenciales para establecer la visión, estrategia y objetivos en el corto y largo plazo, en relación con la evolución y adaptabilidad de las tecnologías de hidrógeno verde en la industria minera de Chile y Perú. La siguiente sección explica la metodología seguida para esta etapa.

[4.4.1] Visión compartida

La “Visión Compartida” constituye el marco referencial de la “Hoja de Ruta de hidrógeno verde en la minería de Chile y Perú”. Para poder construir esta visión compartida se utilizó una adaptación de la metodología de Collins y Porras⁵⁷, que permite identificar los “Valores Esenciales”, el “Sueño” y los “Objetivos Audaces”. La Figura 4-8 grafica los ejes de la metodología y su interrelación.

⁵⁴ Fuente: SOLARGIS (2021), Mapas de recursos solares de Chile. Recuperado desde <https://solargis.com/es/maps-and-gis-data/download/chile> en diciembre de 2021.

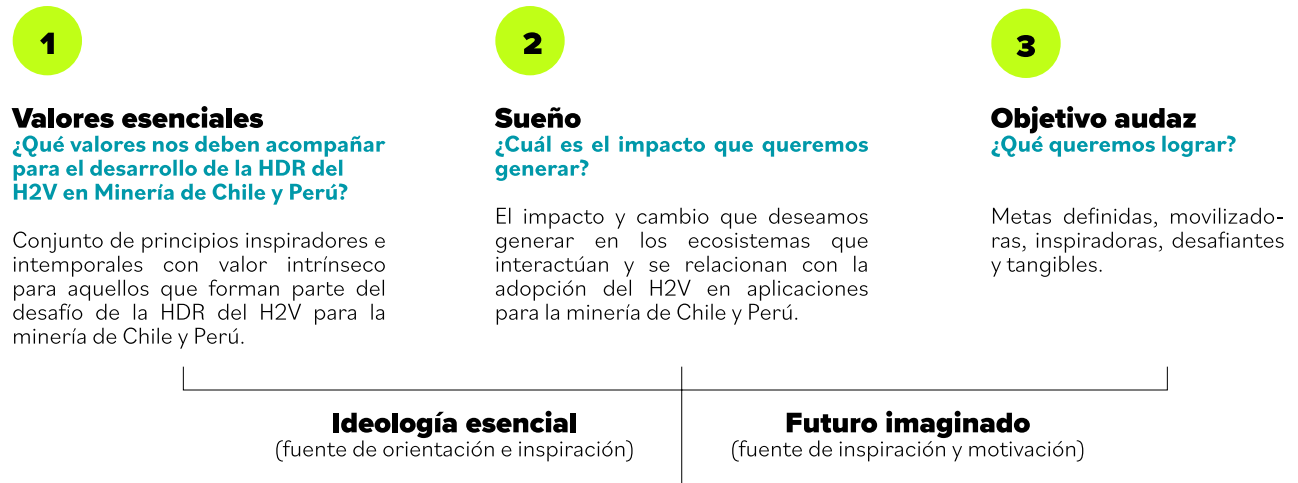
⁵⁵ Un HUB de producción se refiere a una planta de producción de H₂V que agrega demandas de varias mineras que se encuentran cercanas a la planta de producción. La agregación de demandas permite economías de escala para reducir el costo de producción de hidrógeno. En Chile, tres de las cinco principales faenas mineras (Escondida, Collahuasi y Chuquibambilla) se ubican en una zona de un radio de distancia de solamente 200 kilómetros.

⁵⁶ Por ejemplo, soluciones a base de baterías eléctricas para camiones de extracción minera (CAEX) de más de 300 toneladas, no son factibles técnicamente dado el impacto en la autonomía y el espacio requerido por la infraestructura de recarga. Esto se traduce en un aumento considerable de la flota y por ende un decrecimiento de la productividad en la mina.

⁵⁷ J. Collins, J. Porras (1995), “Empresas que perduran”.

Figura 4-8

Ejes de la Metodología para la construcción de la “Visión Compartida” de la hoja de ruta



1 Valores esenciales

¿Qué valores nos deben acompañar para el desarrollo de la HDR del H2V en Minería de Chile y Perú?

Conjunto de principios inspiradores e intemporales con valor intrínseco para aquellos que forman parte del desafío de la HDR del H2V para la minería de Chile y Perú.

2 Sueño

Sueño

¿Cuál es el impacto que queremos generar?

El impacto y cambio que deseamos generar en los ecosistemas que interactúan y se relacionan con la adopción del H2V en aplicaciones para la minería de Chile y Perú.

3

Objetivo audaz

¿Qué queremos lograr?

Metas definidas, movilizadoras, inspiradoras, desafiantes y tangibles.

Ideología esencial
(fuente de orientación e inspiración)

Futuro imaginado
(fuente de inspiración y motivación)

La visión que guiará la implementación de la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú es la siguiente:

“Convertir a las industrias mineras de Chile y Perú en el principal HUB minero carbono neutral del mundo, en torno al desarrollo competitivo del hidrógeno verde, la I+D+i, y el valor socioeconómico y calidad de vida de la Región Andina”

[4.4.2] Valores esenciales

A continuación, se muestran los valores esenciales, los cuales representan un conjunto de principios inspiradores e intemporales con valor intrínseco para aquellos que forman parte del desafío de la hoja de ruta.

Sustentabilidad

La producción y consumo de H2V se desarrollan bajo estándares que permiten asegurar un proceso sostenible y comprometido con el medio ambiente, aportando a la descarbonización de los procesos de producción del cobre y otros minerales para asegurar un suministro responsable ante los mercados internacionales.

Valor Compartido

El desarrollo de la industria de H2V para su aplicación en la minería de Chile y Perú asegura el crecimiento de las comunidades locales, cumpliendo estándares internacionales

y creando valor socioeconómico para la Región Andina de Chile y Perú.

Competitividad

La descarbonización de procesos mineros, en los que se utilizan aplicaciones de H2V, permite lograr un mercado regional competitivo a nivel global.

Innovación

La aplicación del H2V en la minería en Chile y Perú crea valor a través de la innovación, desarrollando una industria que lidera el mercado global.

Colaboración

La colaboración de los diferentes actores en la industria es la base para lograr el desarrollo de un HUB regional de H2V, mediante el desarrollo de conocimiento compartido sobre diversas tecnologías y plataformas que se utilizan para obtener mejores resultados individuales y colectivos.

Liderazgo

El desarrollo de una industria de H2V para la minería en Chile y Perú busca asegurar el liderazgo de la región, destacando a nivel mundial en el proceso de transición a energías limpias que contribuyan a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

[4.5] Metas de la hoja de ruta

Los objetivos estratégicos fueron agrupados y consolidados desde la información entregada por los participantes del taller. Estos se establecen como “misiones” que estimulan el progreso de la hoja de ruta y se aplican a todos los que participan para sacar adelante estos desafíos. Cuentan con una meta definida, que es tangible, energizante y orientada al logro, en el plazo establecido para la Hoja de Ruta del Hidrógeno Verde para la minería de Chile y Perú. A continuación, se muestran los objetivos y metas definidas para esta hoja de ruta:

- Fomentar la transición del 20% de la flota CAEX a cero emisiones, hacia el 2030, en Chile y Perú.
- Reducir el 30%, 60% y 100% el uso de combustibles fósiles en los años 2030, 2040 y 2050 respectivamente, en operaciones mineras y servicios asociados, con base al año 2021, en Chile y Perú.

- Generar 100 proyectos piloto de H2V al 2040 en la minería de Chile y Perú.
- Generar 10 iniciativas de colaboración público-privado y/o privado-privado en Chile al 2030 para acelerar la adopción de tecnologías de H2V mediante la creación de infraestructura habilitante asociada a la cadena de suministro.
- Generar 5 iniciativas de colaboración público-privado y/o privado-privado en Perú al 2030 para acelerar la adopción de tecnologías de H2V, mediante la creación de infraestructura habilitante asociada a la cadena de suministro.
- Consolidación de un HUB binacional del H2V para aplicaciones en minería, con un financiamiento público-privado mínimo de 300 millones de dólares hacia el 2030, para la implementación de la Hoja de Ruta en Chile y Perú.

Los objetivos y metas pueden verse de forma esquemática en la Figura 4-9 mostrada a continuación.

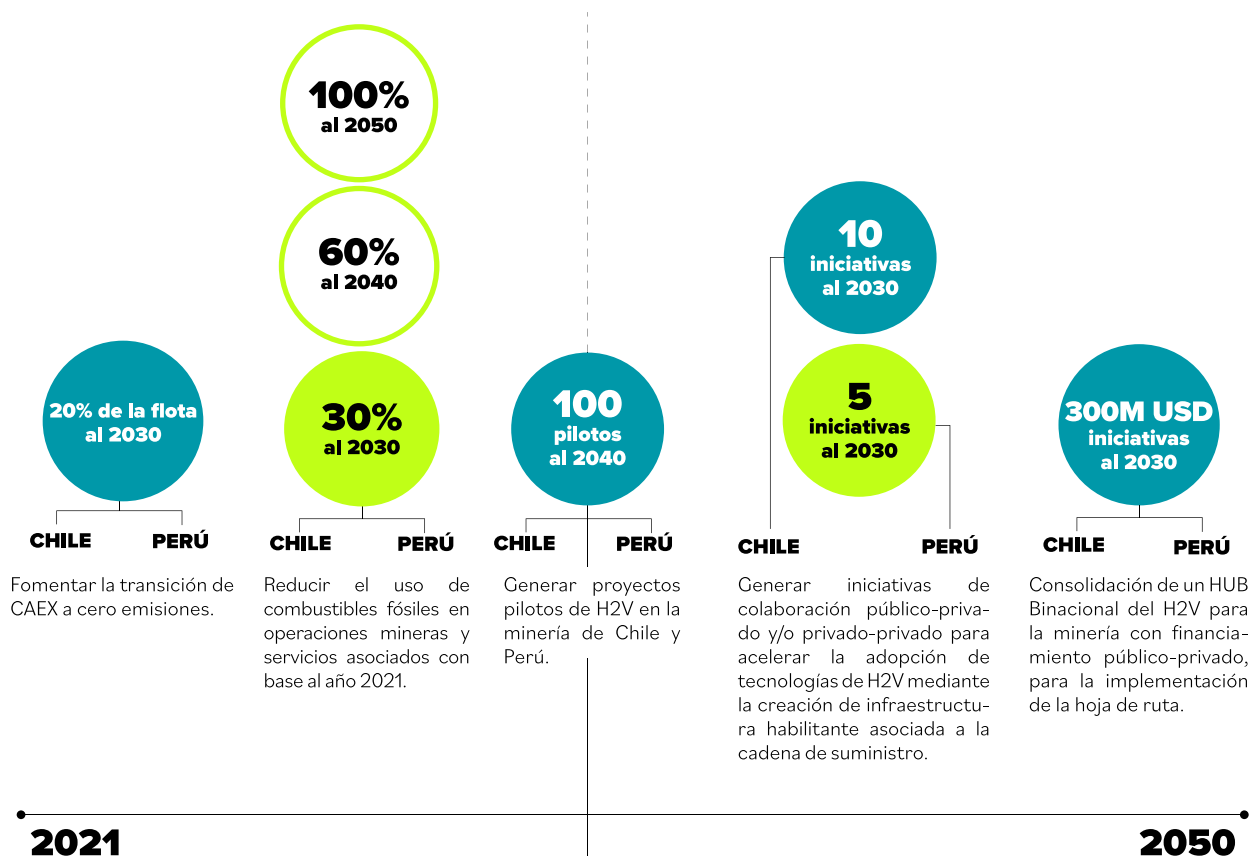


Figura 4-9
Objetivos estratégicos de la hoja de ruta

[4.6] Núcleos traccionantes y habilitantes

A partir de las actividades desarrolladas en los talleres y sesiones de trabajo de esta hoja de ruta, se procedió a establecer un marco estructurante mediante ejes estratégicos denominados “núcleos”, sobre los cuales deben definirse planes de acción para alcanzar las metas y objetivos propuestos.

Estos núcleos fueron segmentados en dos categorías o tipos:

- Núcleos traccionantes:** Son aquellos núcleos o ejes estratégicos vinculados a la cadena productiva de la industria minera y sus proveedores, en los cuales se visualizan oportunidades para incorporar tecnologías asociadas a H2V para la descarbonización de diferentes procesos mineros, considerando iniciativas que pueden ser traccionadas desde esta industria.

- Núcleos habilitantes:** Son aquellos elementos transversales que permitirían el desarrollo de los proyectos tecnológicos asociados al H2V vinculados a los núcleos traccionantes. En esta categoría, se agrupan aquellas iniciativas que son fundamentales y habilitantes para la implementación de la hoja de ruta, pero que involucran otros actores del ecosistema, como participantes del sector público y la academia; de la sociedad civil y las comunidades.

En la Figura 4-10 se muestra de forma gráfica, la conformación de los núcleos traccionantes y habilitantes para el desarrollo de la hoja de ruta del H2V en la industria minera.

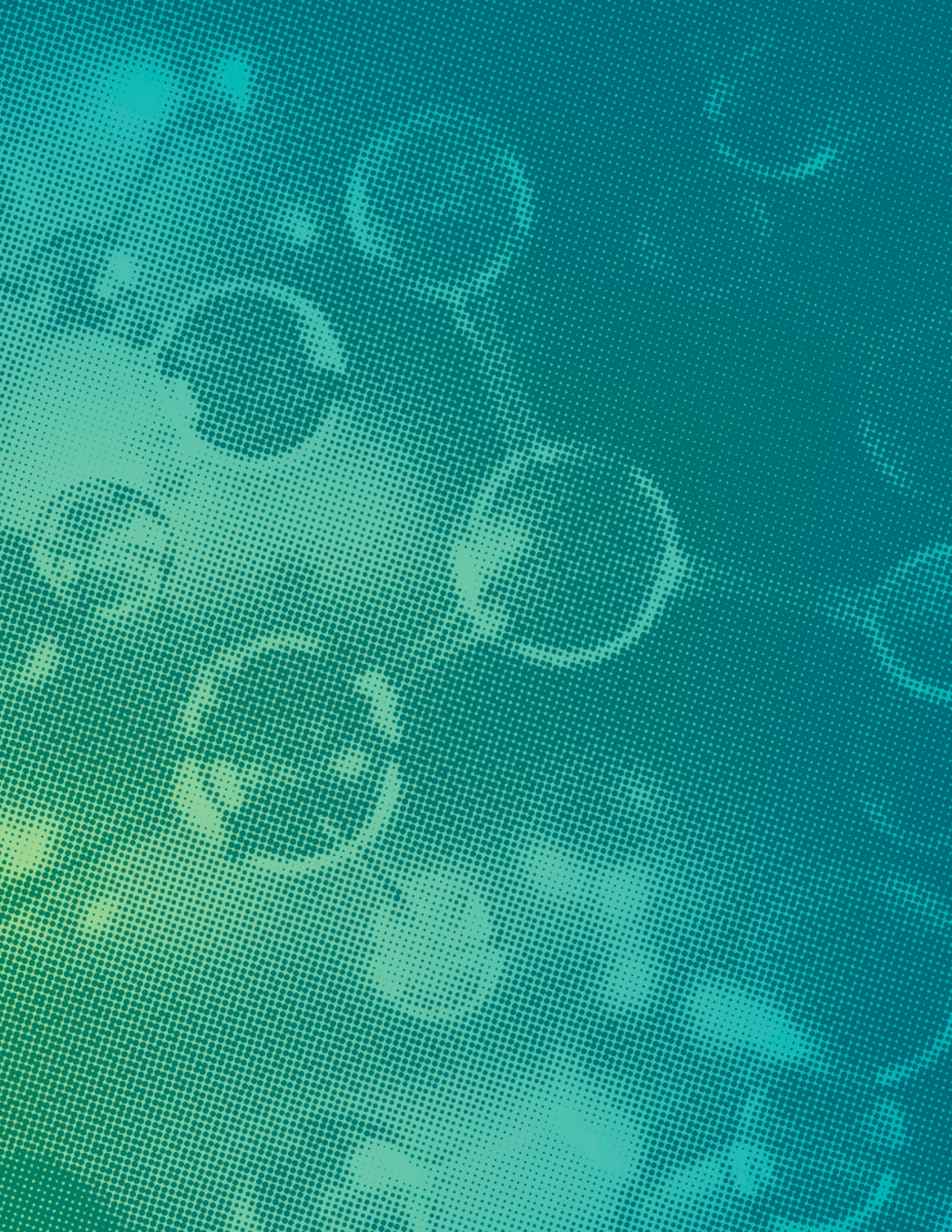


Figura 4-10
Núcleos traccionantes y habilitantes de la hoja de ruta del H2V para la minería de Chile y Perú⁵⁸

A partir del desarrollo de la línea base; entrevistas con representantes de las empresas mineras y talleres realizados en el proceso de co-creación de esta hoja de ruta, se identificaron y categorizaron brechas de distinta naturaleza que fueron agrupadas por núcleo.

A continuación, se describen, por cada núcleo, las brechas e iniciativas que fueron propuestas.

⁵⁸ Fuente: Elaboración propia en el marco de la Hoja de Ruta del H2V para la minería de Chile y Perú.



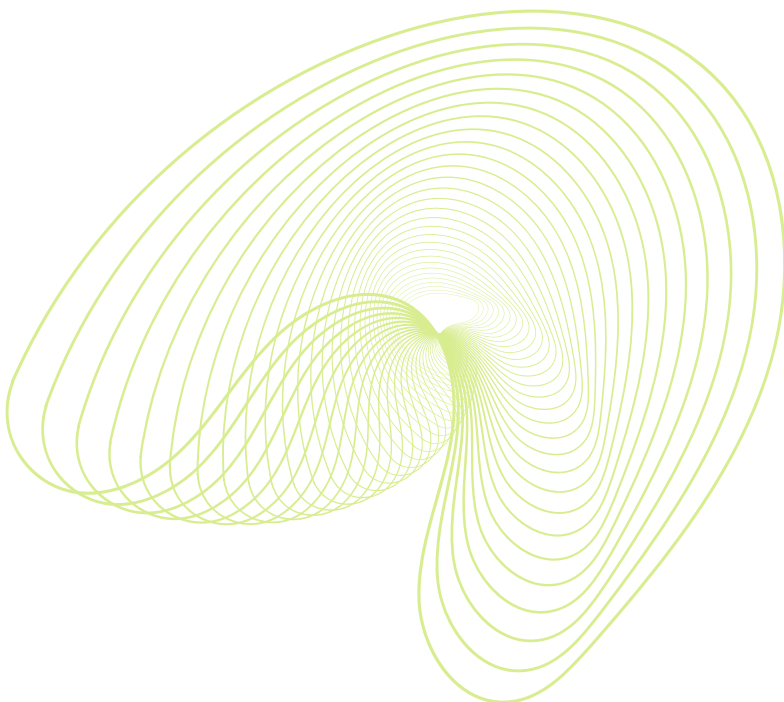
05 Núcleos traccionantes

[5.1] Núcleo traccionante 1 (NT1): Movilidad y Transporte

[5.1.1] Descripción

Este núcleo busca desarrollar iniciativas que permitan identificar y mitigar todas aquellas emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) que provienen de fuentes que son propiedad o son controladas por la industria minera (emisiones alcance 1), particularmente en la movilidad y transporte.

Los núcleos traccionantes son aquellos núcleos o ejes estratégicos vinculados a la cadena productiva de la industria minera y sus proveedores, en los cuales se visualizan oportunidades para incorporar tecnologías asociadas a H2V para la descarbonización de diferentes procesos mineros.



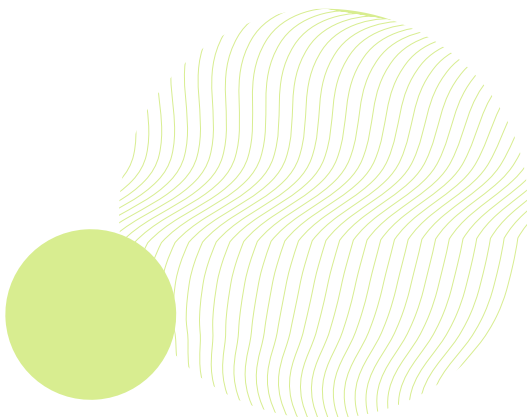
[5.1.2] Brechas que aborda

En la Tabla 5-1 se describen las brechas identificadas para el núcleo Movilidad y Transporte.

BRECHA IDENTIFICADA	DETALLE
Altura geográfica y condiciones extremas dificultan operación y funcionamiento óptimo de celdas de combustible (Fuel Cells/FC) accionadas a hidrógeno verde.	Baja densidad del aire y condiciones extremas (bajas temperaturas, baja humedad, polvo, vibraciones, nieve, barro) dificultan la operación de fuel cells. No existe garantía de proveedores de funcionamiento óptimo.
Enfriamiento de celdas de combustible “on-board”.	Enfriamiento de celdas de combustible “on-board” afectado por espacio limitado.
Almacenamiento de H2V “on-board” limitado.	Cantidad de H2V almacenable en equipos móviles es limitada; requerimiento de presión es un desafío tecnológico. En minería subterránea existen desafíos de seguridad asociados a la explosividad.
Demoras en recarga de equipos y altos tiempos de recarga.	Hoy día existe un límite de infraestructura de recarga de camiones; el estándar existente es para operaciones de transporte urbano, lo que implica un tiempo de carga de estanque de CAEX muy elevado. La recarga es más lenta que la operación de recarga diésel, pero más rápida que cargar baterías. Se requieren cargadores más rápidos para equipos con estanques grandes.
Incerteza acerca de operabilidad de equipos (falta de confiabilidad) / falta de pilotajes y escalabilidad.	Falta de pilotos / proyectos que demuestren que los equipos operan adecuadamente.
Incerteza acerca de la interoperabilidad / complementariedad óptima de diferentes tecnologías.	Ejemplo:Trolley, celdas de combustible, e-fuels, baterías y CAEX: ¿Cómo se integran? ¿Cuál es la configuración de equipos óptima? ¿Cómo las tecnologías carbono-neutrales se potencian, adoptando varias tecnologías? Se requieren análisis en sitios específicos para determinar aplicaciones, más la combinación óptima de tecnologías.

Tabla 5-1

Brechas del núcleo traccionante NT1
“Movilidad y Transporte”



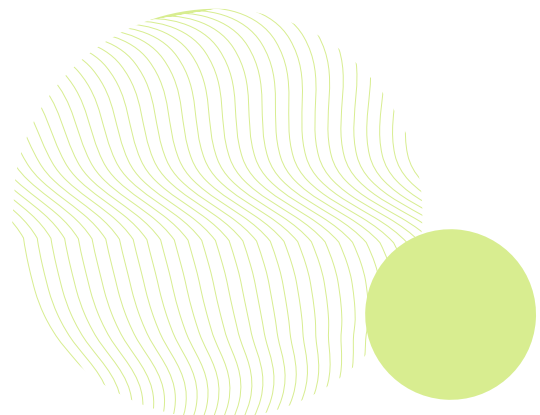
[5.1.3] Iniciativas y plazos

A partir del levantamiento de brechas tecnológicas agrupadas en este núcleo, se identificó un grupo de iniciativas estratégicas y posibles soluciones o líneas de I+D, identificando su temporalidad en el corto (<3 años), mediano (entre 3 y 6 años) y largo plazo (>6 años). La Tabla 5-2 muestra un resumen con las brechas identificadas, las iniciativas estratégicas y las soluciones propuestas en cada caso.

BRECHA IDENTIFICADA	INICIATIVA ESTRATÉGICA	SOLUCIÓN	PLAZO
Altura geográfica y condiciones extremas dificultan operación y funcionamiento óptimo de Fuel Cells (FC) en sitios mineros.	<ul style="list-style-type: none"> ● Incentivar el desarrollo de la demanda/uso de corto plazo a partir de la oferta de equipos menores accionados a H2V. ● Fomentar el desarrollo de pilotajes de CAEX cero carbono y asegurar su escalabilidad por medio de alianzas privadas y público-privadas. ● Uso de e-fuels como opción de transición hacia descarbonización en movilidad y transporte. 	Usos y aplicaciones de FC en equipos mineros móviles on site (vibraciones, polvo, altura, gradientes de temperatura, humedad, otros).	Corto
Enfriamiento de Fuel Cells (FC) on-board afectado por espacio limitado.		Nuevas tecnologías y materiales para almacenamiento de H2V-on board en equipos mineros móviles.	Corto
Almacenamiento de H2V on-board limitado.		Estaciones de recarga rápida de H2V en equipos mineros móviles.	Corto
Demoras en recarga de equipos / altos tiempos de refueling.		Recarga en paralelo (simultánea) de H2V en equipos mineros móviles.	
Incerteza acerca de operabilidad de equipos (falta de confiabilidad) /falta de pilotajes y escalabilidad.		Testbed on site para aplicaciones de H2V en equipos mineros móviles e integración con otras tecnologías (combustión dual, boosters, uso de e-fuels, FC & baterías, full baterías, trolley).	Mediano
Incerteza acerca de la interoperabilidad/complementariedad óptima de diferentes tecnologías.			

Tabla 5-2

Iniciativas estratégicas y líneas de I+D núcleo traccionante NT1 “Movilidad y Transporte”



[5.2] Núcleo traccionante 2 (NT2): Aplicaciones de H2V en otros procesos mineros

[5.2.1] Descripción

Este núcleo busca desarrollar iniciativas cuyo objetivo es mitigar las emisiones GEI que provienen de procesos de la industria minera como la Fundición y Refinación (FURE), Lixiviación (LX), Extracción por Solventes (SX), Electroobtención (EW) y otras aplicaciones vinculadas con la operación.

[5.2.2] Brechas que aborda

En la Tabla 5-3 se describen las brechas identificadas para el núcleo aplicaciones en procesos mineros.

Tabla 5-3

Brechas del núcleo traccionante NT2 “Aplicaciones de H2V en otros procesos mineros”

BRECHA IDENTIFICADA	DETALLE
Fundición y Refinería (FURE): incerteza acerca de adaptaciones requeridas tanto en calderas como hornos para funcionamiento de la mezcla de H2V con gas natural (aplicaciones de calor de alta entalpía).	Incerteza acerca de adaptaciones requeridas en quemadores y hornos para aplicaciones de H2V considerando temperaturas distintas que la situación actual y el impacto de mezclas de gas natural con H2V en la productividad de los procesos de Fundición y Refinería (FURE).
1. Electro-obtención (EW): incerteza acerca de adaptaciones requeridas + impacto en producción en calderas de Electro-obtención (aplicaciones de calor de baja entalpía). 2. Falta de Pilotajes para incorporar H2V en calderas de Electro-obtención (EW).	Falta información acerca del comportamiento de calderas y modificaciones requeridas al usar H2V en calderas en el proceso de Electro-obtención (EW). Además, no se dispone de pilotajes para escalar la tecnología.
Uso intensivo de combustibles fósiles en las operaciones unitarias de Fundición y Refinería.	Algunas de las operaciones de los procesos de Fundición y Refinería tienen un alto consumo de combustibles fósiles (ejemplo: reducción).
Falta de demostración de confiabilidad y monitoreo de aplicación de nuevas tecnologías.	Falta de un mayor número de pilotajes para demostrar el funcionamiento de nuevas tecnologías en condiciones extremas sin alteraciones en procesos.
Garantías reducidas para equipos operados en alturas extremas.	Brecha que tiene que ver con las garantías ofrecidas por proveedores de equipos y maquinaria.
Incerteza sobre complementariedad óptima de tecnologías para suministro y almacenamiento eléctrico renovable OFF GRID.	Específicamente, en cuanto al uso de colectores solares en el día y uso de H2V en la noche para un suministro de energía 24/7, existe incerteza acerca de la configuración y complementariedad óptima. Se busca responder la siguiente pregunta: ¿Cómo el H2V puede complementar otras soluciones cero carbono que presentan limitaciones?

[5.2.3] Iniciativas y plazos

A partir del levantamiento de brechas tecnológicas agrupadas en este núcleo, se identificó un grupo de iniciativas estratégicas y posibles soluciones o líneas de I+D, identificando su temporalidad en el corto (<3 años), mediano (entre 3 y 6 años) y largo plazo (>6 años). La Tabla 5-4 muestra un resumen con las brechas identificadas, las iniciativas estratégicas y las soluciones propuestas en cada caso.

Tabla 5-4

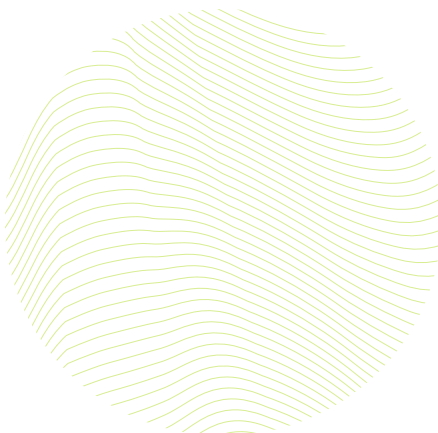
Iniciativas estratégicas y líneas de I+D núcleo traccionante NT2
“Aplicaciones en otros procesos mineros”

BRECHA IDENTIFICADA	INICIATIVA ESTRATÉGICA	SOLUCIÓN	PLAZO
Fundición y Refinería (FURE): incerteza acerca de adaptaciones requeridas tanto en calderas como hornos para funcionamiento de la mezcla de H2V con gas natural (aplicaciones de calor de alta entalpía).	<ul style="list-style-type: none"> ● Estudiar la producción y uso de e-fuels e H2V para su aplicación en calderas y hornos. ● Promover la aplicación de H2V en procesos de FURE y EW, reemplazando combustibles fósiles para el suministro de calor. ● Integración de H2V y energías renovables (solar-eólica) para suministro continuo en faenas mineras. 	Evaluación comportamiento “blending” (mezcla) de H2V y gas natural con distintos porcentajes en quemadores y hornos de la Fundición y Refinería (eficiencia productiva, mantenibilidad, costos, otros).	Mediano
Uso intensivo de combustibles fósiles en las operaciones unitarias de Fundición y Refinería.		Evaluación comportamiento “blending” (mezcla) de H2V y gas natural con distintos porcentajes en secadores y calderas de las naves de Electro-obtención (eficiencia productiva, mantenibilidad, costos, otros).	Mediano
1. Electro-obtención (EW): incerteza acerca de adaptaciones requeridas + impacto en producción en calderas de Electro-obtención (aplicaciones de calor de baja entalpía).		Uso de H2V en procesos de reducción / cero carbono en el complejo FURE.	Corto
2. Falta de pilotajes para incorporar H2V en calderas de Electro-obtención (EW).		Suministro y almacenamiento eléctrico renovable off grid para campamentos mineros, infraestructura y estaciones remotas y/o faenas mineras OFFGRID.	Mediano
Incerteza sobre óptima complementariedad de tecnologías para suministro y almacenamiento eléctrico renovable OFF GRID.			

[5.3] Núcleo traccionante 3 (NT3): Reducción de emisiones de alcance 3 en la cadena de suministro de la minería (EA3)

[5.3.1] Descripción

Este núcleo agrupa todas las iniciativas cuyo objetivo es mitigar las emisiones GEI que no son de propiedad, ni están controladas por la industria minera, con foco principal en las emisiones generadas por los proveedores de la minería, tanto en sus propias instalaciones, como en los productos y servicios que operan en faena. Las iniciativas propuestas buscan reducir principalmente emisiones de alcance 3 (EA3).



[5.3.2] Brechas que aborda

En la Tabla 5-5 se describen las brechas identificadas para el núcleo “Reducción de emisiones de alcance 3 en la cadena de suministro de la minería (EA3)”.

Tabla 5-5

Brechas del núcleo traccionante NT3
“Reducción de emisiones de alcance 3(EA3)”

BRECHA IDENTIFICADA	DETALLE
Insumos y servicios mineros críticos que incorporan tecnologías de H2V no son económicamente competitivos en la actualidad.	Insumos críticos de la minería, como bolas de molienda y revestimientos de molinos, cal, reactivos químicos, combustibles, explosivos; y servicios como transporte de carga y pasajeros, transporte marítimo y aéreo, que incorporan aplicaciones de H2V, no son económicamente competitivos frente a tecnologías actuales.
Mercado de aplicaciones del H2V para minería con pocos proveedores (OEMs, servicios) / falta de mayor oferta de productos y servicios basados en el hidrógeno verde.	Existencia de muy pocos proveedores (OEMs, servicios) a la fecha en el mercado. Empresas mineras preferirían tener diferentes opciones de ofertas para seleccionar, y para no depender de solo 1 o 2 proveedores, para minimizar riesgos de disponibilidad tecnológica.
Garantías reducidas/limitadas para tecnologías de H2V.	Proveedores tienden a disminuir la garantía de las tecnologías que ofrecen, debido al uso de equipos en altura y que puedan ser afectadas por condiciones sísmicas.
Incerteza acerca de disponibilidad asegurada de tecnologías y materiales requeridos para implementar proyectos y aplicaciones de H2V en minería.	Existen dudas acerca de la capacidad de entrega del mercado emergente. Si todas las compañías mineras empezaran a realizar proyectos al mismo tiempo, por ende, la demanda de varias empresas aumentara al mismo tiempo, los costos de paneles fotovoltaicos o sistemas intercambiadores de calos (HRS) podrían subir y generar cuellos de botella de producción, así como aumentos de precios de equipos y componentes.
Incerteza acerca de tiempos y disponibilidad de servicios de mantenimiento de equipos.	Existe incertidumbre respecto a los tiempos de mantención de los equipos y disponibilidad de los servicios de mantención en el país.
Falta de incentivos desde las compañías mineras para que proveedores incorporen tecnologías cero emisiones en producción de bienes, insumos y servicios mineros.	Reducción de EA3 no considerados en licitaciones y contratos entre proveedores de bienes, insumos y servicios, y, las compañías mineras.
En caso de subcontratación/arrendamiento, acceso a tecnologías limpias depende de terceros (proveedores).	En caso de que camiones / equipos son arrendados a terceros, la oferta de tecnologías limpias y nuevos desarrollos tecnológicos dependen, en gran medida, de las empresas contratistas.
Contratos de compra de combustibles fijados.	Existencia de contratos de compra de combustibles comprometidos a 5 años dificulta el “fuel switch” en el corto plazo (dificultando hacer cambios de combustibles).

[5.3.3] Iniciativas y plazos

A partir del levantamiento de brechas tecnológicas agrupadas en este núcleo, se identificó un grupo de iniciativas estratégicas y posibles soluciones o líneas de I+D, identificando su temporalidad en el corto (<3 años), mediano (entre 3 y 6 años) y largo plazo (>6 años). La Tabla 5-6 muestra un resumen con las brechas identificadas, las iniciativas estratégicas y las soluciones propuestas en cada caso.

Tabla 5-6

Iniciativas estratégicas y líneas de I+D núcleo traccionante NT3 “Reducción de emisiones de alcance 3 en la cadena de suministro de la minería (EA3)”

BRECHA IDENTIFICADA	INICIATIVA ESTRATÉGICA	SOLUCIÓN	PLAZO
Insumos y servicios mineros críticos que incorporan tecnologías de H2V no son económicamente competitivos en la actualidad (Ej: Bolas de molienda y revestimientos de molinos, cal, reactivos químicos, combustibles, explosivos, transporte de carga y pasajeros, transporte marítimo y aéreo).	<ul style="list-style-type: none"> ● Nuevas tecnologías y procesos que utilizan H2V para reducir GEI de proveedores. ● Desarrollo local de aplicaciones en H2V para la minería. ● Formación de capital humano servicios de mantenimiento equipos H2V. ● Sistemas de incentivos para promover la reducción de EA3. 	Aplicaciones de H2V (e-fuels y/o H ₂ O ₂) y NH ₃ verde para fabricación de insumos críticos (explosivos, reactivos químicos, cal, otros).	Corto
		Aplicaciones de H2V como combustible en servicios de transporte aéreo, terrestre y marítimo (NH ₃ , metanol, e-fuels).	Corto
Mercado con pocos proveedores (OEMs, servicios) / falta de mayor oferta de productos / servicios basados en el hidrógeno verde.		Programa de atracción de empresas tecnológicas nacionales e internacionales para el desarrollo de aplicaciones de H2V en minería.	Corto
Incerteza sobre disponibilidad de servicios de mantenimiento de equipos H2V.		Centros tecnológicos de entrenamiento para la mantenibilidad de equipos accionados a H2V.	Mediano
		Licitaciones y contratos ponderan positivamente soluciones tecnológicas que incorporan H2V y/o alternativas cero emisiones para reducir las EA3.	Corto
Reducción de EA3 no considerados en licitaciones y contratos entre proveedores de bienes y servicios y las compañías mineras.		Compromisos de compra por bajas cantidades de insumos verdes para viabilizar pilotos de tecnologías cero emisiones.	Corto a mediano



06 Núcleos habilitantes

Los núcleos habilitantes son aquellos elementos transversales que permitirían el desarrollo de los proyectos tecnológicos asociados al H2V vinculados a los núcleos traccionantes. En esta categoría, se agrupan aquellas iniciativas que son fundamentales y habilitantes para la implementación de la hoja de ruta, pero que involucran otros actores del ecosistema, como participantes del sector público y de la academia; de la sociedad civil y las comunidades.

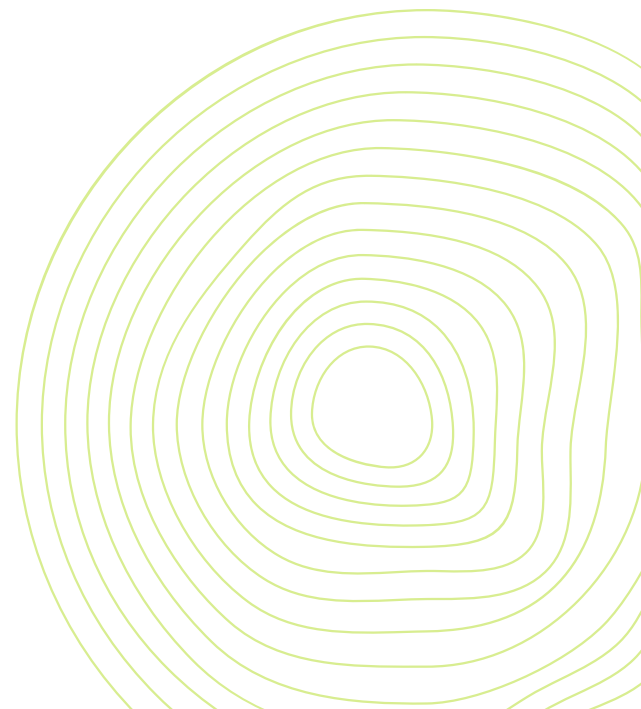
[6.1] Núcleo habilitante 1 (NH1): Infraestructura y cadena de suministro

[6.1.1] Descripción

Este núcleo agrupa los desafíos de la industria minera para desarrollar el H2V, considerando aspectos de infraestructura y cadena de suministro que deben ser habilitados para alcanzar este objetivo.

[6.1.2] Brechas que aborda

En la Tabla 6-1 se describen las brechas identificadas para el núcleo “Infraestructura y cadena de suministro”.



BRECHA IDENTIFICADA	DETALLE
Falta de infraestructura habilitante y altos costos asociados.	La infraestructura habilitante es intensiva en capital y conlleva altos requerimientos de financiamiento especialmente en el caso de producción de H2V en un “HUB” (forma centralizada). Esto implica plantas de energía renovable, electrólisis, y ductos de gas aptos para H2V, entre otros.
Escasez de agua para producir H2V y alto costo de energía para desalar.	Los costos sistémicos asociados a la producción de electricidad on-grid para proyectos de H2V y agua desalada son elevados debido a costos de transmisión y potencia. Esto impacta significativamente en el costo de producción de H2V, ya que el costo de electricidad es el ítem con mayor impacto en el LCOH (Costo nivelado del hidrógeno).
Inexistencia / Escasez de medios de transporte para distribución de hidrógeno verde líquido (H2VL) desde un HUB al punto de consumo.	Se requiere de camiones específicos para la distribución de H2V en estado líquido desde un HUB al punto de consumo (faena minera). Aún no existen, o existen muy pocos proveedores para realizar estos servicios.
Falta de tecnologías robustas de respaldo para soluciones renovables OFF-GRID.	Diseño de proyectos de producción de H2V OFF-GRID requieren tecnologías de respaldo robustas que minimicen/compensen fluctuaciones de producción eléctrica renovable; y que requieran ser renovables también.
Altos costos de inversión.	En comparación con tecnologías convencionales, el recambio de equipos requiere inversiones intensivas en capital, aumentando el TCO de las nuevas tecnologías.
Life of Mine (LoM) acotados dificultan amortización de CAPEX.	En minas de oro y plata se dificulta la amortización de CAPEX debido a que el LoM de las minas de oro y plata es mucho más corto que en minas de cobre. Esto significa períodos de recuperación de la inversión mucho más acotados en el caso de la minería del oro y plata.
Largos períodos de amortización de CAPEX en infraestructura de suministro para recarga de H2V.	<p>Infraestructura de abastecimiento para aplicaciones de H2V, como son las hidrolineras que suministran H2V a equipos móviles conllevan una alta inversión. Esta se amortiza de forma óptima cuando las hidrolineras tienen una alta utilización (es decir, dispensando H2V la mayor cantidad de tiempo posible). Los equipos mineros principales que podrían funcionar con celdas de combustible (Por ej: CAEX), se reemplazan acorde a su ciclo de vida, no todos al mismo tiempo.</p> <p>Esto significa que la inversión en la infraestructura habilitante no se amortiza de forma óptima, sino en un mayor plazo, en la medida de que se vayan reemplazando los equipos a diésel por nuevos equipos a H2V y aumente la utilización de las hidrolineras.</p>

Tabla 6-1

Brechas del núcleo habilitante

NH1 “Infraestructura y cadena de suministro”

[6.1.3] Iniciativas y plazos

A partir del levantamiento de brechas agrupadas en este núcleo, se identificó un grupo de iniciativas estratégicas y posibles soluciones, o líneas de I+D, identificando su temporalidad en el corto (<3 años), mediano (entre 3 y 6 años) y largo plazo (>6 años). La Tabla 6-2 muestra un resumen con las brechas identificadas, las iniciativas estratégicas y las soluciones propuestas en cada caso.

BRECHA IDENTIFICADA	INICIATIVA ESTRATÉGICA	SOLUCIÓN	PLAZO
Inexistencia/escasez de medios de transporte para distribución de hidrógeno verde líquido (H2VL) desde un HUB al punto de consumo.	<ul style="list-style-type: none"> ● Desarrollar nuevas tecnologías para almacenamiento, distribución y transporte de H2V para largas distancias. ● Incentivar alianzas estratégicas entre proveedores y la gran minería, para reducir costos de implementación de infraestructura de la cadena de suministros del HUB Minero de H2V. 	Almacenamiento, distribución y transporte de H2V en medios sólidos.	Mediano
Escasez de agua para producir H2V y alto costo de energía para desalar.		Desarrollo de proyectos energéticos OFF-GRID (generación y respaldo) y plantas desaladoras para uso compartido.	Corto
		Infraestructura compartida para producción de H2V y pruebas de electrolizadores (EZ).	Mediano
Falta de tecnologías robustas de respaldo y almacenamiento para soluciones renovables OFF-GRID.		Tecnologías renovables de respaldo robustas que minimicen fluctuaciones de producción eléctrica (ej: H2V-baterías).	Mediano

Tabla 6-2

Iniciativas estratégicas y líneas de I+D núcleo habilitante NH1 “Infraestructura y cadena de suministro”

[6.2] Núcleo habilitante 2 (NH2): Gobernanza y financiamiento

[6.2.1] Descripción

Este núcleo contiene los desafíos e iniciativas de la industria minera desde la óptica de establecer un liderazgo claro, que permita fomentar la colaboración entre actores del ecosistema y genere alternativas de financiamiento que aseguren el desarrollo del H2V en el corto plazo, y den continuidad y sostenibilidad a la hoja de ruta.

[6.2.2] Brechas que aborda

En la Tabla 6-3 se describen las brechas identificadas para el núcleo “Gobernanza y financiamiento”.

Tabla 6-3
Brechas del núcleo habilitante
NH2 “Gobernanza y financiamiento”

BRECHA IDENTIFICADA	DETALLE
Bajo nivel de colaboración entre compañías mineras y baja sinergia Chile-Perú (metas de descarbonización y proyectos independientes).	Bajo nivel de colaboración entre empresas, con metas de descarbonización y proyectos independientes en vez de buscar sinergias para proyectos intensivos en capital. Las empresas mineras indican que existe poca o insuficiente colaboración en temas de innovación con H2V, que podría facilitar el desarrollo de proyectos piloto y reducir riesgos asociados, sobre todo considerando inversiones considerables. Un trabajo en conjunto puede reducir riesgos y costos de inversión.
Falta de instrumentos financieros para I+D de nuevas tecnologías de H2V en minería.	Falta de instrumentos financieros que apoyen el desarrollo y la investigación de nuevas tecnologías en torno al H2V en minería.
Baja colaboración entre compañías mineras y sector académico.	No existen muchas iniciativas de colaboración para proyectos de H2V en minería.

[6.2.3] Iniciativas y plazos

A partir del levantamiento de brechas agrupadas en este núcleo, se identificó un grupo de iniciativas estratégicas y posibles soluciones, o líneas de I+D, identificando su temporalidad en el corto (<3 años), mediano (entre 3 y 6 años) y largo plazo (>6 años). La Tabla 6-4 muestra un resumen con las brechas identificadas, las iniciativas estratégicas y las soluciones propuestas en cada caso.

Tabla 6-4

Iniciativas estratégicas y líneas de I+D núcleo habilitante NH2
“Gobernanza y financiamiento”

BRECHA IDENTIFICADA	INICIATIVA ESTRATÉGICA	SOLUCIÓN	PLAZO
Bajo nivel de colaboración entre compañías mineras y baja sinergia Chile-Perú (metas de descarbonización y proyectos independientes).	Habilitar en el corto plazo la implementación de la hoja de ruta binacional para potenciar y acelerar el desarrollo del HUB minero de H2V.	Definición de la gobernanza para la implementación de la hoja de ruta binacional.	Corto
Falta de instrumentos financieros para I+D de nuevas tecnologías de H2V en minería.	Fomentar instrumentos y programas de financiamiento para proyectos de I+D en H2V en minería.	Incentivos tributarios a proyectos de H2V (más allá de las exenciones tributarias).	Corto
		Acuerdos público-privados (apps) y ley de concesiones.	Mediano
		Definición de royalties.	Corto
		Modificación a la ley de donaciones para que se prioricen proyectos de hidrógeno verde.	Mediano
Baja colaboración entre compañías mineras y sector académico.	Fomentar alianzas para desarrollo de proyectos I+D+i entre entidades académicas, compañías mineras y proveedores.	Consortios entre universidades, centros de formación técnica, compañías mineras, empresas proveedoras, gobiernos locales y otros actores.	Corto



[6.3] Núcleo habilitante 3 (NH3): Capital humano

[6.3.1] Descripción

Este núcleo busca el desarrollo del conocimiento y capital humano que permite contar con personal altamente capacitado, permitiendo el desarrollo de la industria de H2V en la minería.

[6.3.2] Brechas que aborda

En la Tabla 6-5 se describen las brechas identificadas para el núcleo “Capital humano”.

Tabla 6-5

Brechas del núcleo habilitante
NH3 “Capital humano”

BRECHA IDENTIFICADA	DETALLE
Falta de capital humano capacitado/preparado.	Existe la inquietud por parte el ecosistema sobre las capacidades de personal local existente para realizar proyectos de H2V en minería (duda si hay que traer expertos del extranjero).
Desconocimiento de aspectos de seguridad requeridos al aplicar H2V en transporte y procesos.	A nivel de desarrollo de capital humano se identificó esta brecha de estudios asociado al desconocimiento de aspectos de seguridad requeridos al aplicar H2V en transporte y procesos.
Incerteza y desconocimiento sobre las soluciones óptimas.	Brecha de estudios: incerteza / desconocimiento acerca de cuáles son las soluciones óptimas para descarbonización (baterías, H2V, celdas de combustible, integración de tecnologías, etc.).
Falta de mapeo de iniciativas de aplicación de H2V en procesos mineros a nivel global para desarrollo de capital humano.	Brecha de estudios: desconocimiento de iniciativas / proyectos piloto a nivel global, como insumo de mejores prácticas (benchmark) o “lecciones aprendidas”.
Falta de información acerca de costos de mantención de equipos operando con H2V.	Brecha de estudios / información: desconocimiento de costos de mantención de equipos específicos que operen con H2V.
Falta de información acerca de almacenamiento y transporte de H2V, costos y tecnologías requeridas ⁵⁹ .	Brecha de estudios / información: desconocimiento de tecnologías específicas disponibles y costos asociados (en general).

⁵⁹ Brecha levantada en conversaciones con representantes de las empresas mineras entrevistadas. Cabe mencionar que existen hoy día estudios con costos de estas tecnologías, careciendo sí, de detalles acerca de costos de uso final.

[6.3.3] Iniciativas y plazos

A partir del levantamiento de brechas agrupadas en este núcleo, se identificó un grupo de iniciativas estratégicas y posibles soluciones, o líneas de I+D, identificando su temporalidad en el corto (<3 años), mediano (entre 3 y 6 años) y largo plazo (>6 años). La Tabla 6-6 muestra un resumen con la brecha identificada, las iniciativas estratégicas y las soluciones propuestas en cada caso.

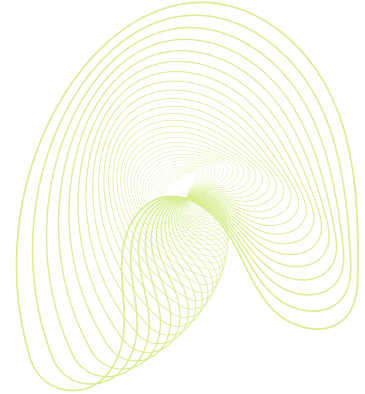


Tabla 6-6

Iniciativas estratégicas y líneas de I+D Núcleo habilitante NH3 “Capital humano”

BRECHA IDENTIFICADA	INICIATIVA ESTRATÉGICA	SOLUCIÓN	PLAZO
Falta de capital humano capacitado/preparado.	<ul style="list-style-type: none"> ● Generar instancias de coordinación a nivel académico entre Chile y Perú, con el objetivo de homologar capacidades en el ámbito de aplicaciones de H2V para la minería. ● Promover la formación y capacitación para nuevas capacidades requeridas en el uso de H2V, seguridad y certificación para técnicos y profesionales. 	Creación de programas técnicos, profesionales e investigación para desarrollo de capital humano en H2V.	Corto
		Creación de centros tecnológicos binacionales (norte de Chile y sur de Perú) para el desarrollo de aplicaciones y formación de capital humano en H2V en diferentes procesos mineros.	Mediano
Desconocimiento de aspectos de seguridad requeridos al incorporar H2V en movilidad, transporte y otros procesos mineros.		Desarrollar un marco de cualificaciones, perfiles y competencias asociadas a capacidades técnicas y certificación sobre aplicaciones de H2V en minería.	Corto

[6.4] Núcleo habilitante 4 (NH4): Regulaciones, políticas, permisos y estandarización

[6.4.1] Descripción

Este núcleo agrupa las iniciativas que impulsen la industria de H2V, considerando las regulaciones, políticas, permisos y estandarizaciones que son necesarias para fomentar iniciativas y programas asociados al hidrógeno verde.

[6.4.2] Brechas que aborda

En la Tabla 6-7 se describen las brechas identificadas para el núcleo “Regulaciones, política, permisos y estandarización”.

Tabla 6-7

Brechas del núcleo habilitante NH4 “Regulaciones, políticas, permisos y estandarización”

BRECHA IDENTIFICADA	DETALLE
Dificultad para obtención de permisos para el desarrollo de proyectos de H2V.	Percepción de alto grado de dificultad de obtención de permisos para proyectos de H2V y plantas desaladoras, debido a la gran escala de los proyectos.
Falta de regulación para impuestos al carbono (<i>carbon tax</i>) y revisiones a los créditos del impuesto al diésel.	Regulación como impuestos al carbono y exención del crédito del impuesto específico al diésel para industrias, aumentaría la necesidad de invertir en nuevas tecnologías (con costos elevados) e impulsaría este tipo de proyectos como incentivo y driver para realizar proyectos.
Falta de regulación para emisiones de fuentes móviles y la producción de H2V OFF-GRID.	Hoy día existe regulación de emisiones para fuentes fijas, pero no existe regulación para equipos móviles. La regulación para emisiones de equipos móviles podría ser un incentivo importante para impulsar cambios hacia tecnologías más limpias, cero carbono (o bajas en emisiones). Además, se indica que no existe regulación ad-hoc para la producción “OFF-GRID” de H2V.
Escasez de fuentes de agua para proceso de electrólisis.	Falta de claridad sobre los impactos de la creciente desalación en el medio ambiente terrestre y marítimo, y falta de información acerca de alternativas a la desalación viables para el proceso de electrólisis.
Impactos ambientales de desalación no están claros.	
Falta de estándares relacionados con el uso de agua desalada y tratamiento de sus residuos (salmuera).	Esta brecha influye en el “desempeño ambiental” de los proyectos de H2V.
Falta de tecnologías y procedimientos para mitigar impactos negativos de captura de agua salada y tratamiento de salmuera.	La salmuera requiere un tratamiento especial para evitar impactos en el medio ambiente a mediano-largo plazo, así como el procedimiento de captación de agua, que aún carece de regulación adaptada al incremento en la frecuencia de uso de estos procedimientos y amenaza con impactos en el equilibrio biológico marítimo.

BRECHA IDENTIFICADA	DETALLE
Larga duración de procesos de tramitación de permisos (ambientales y otros).	Existencia de permisos ambientales y no-ambientales con larga duración de tramitación, por ejemplo, concesión marítima para construcción de plantas desaladoras (en el caso de Chile). Grado de complejidad de permisos depende de ubicación y condiciones medio ambientales de los proyectos.
Existencia de barreras normativas para facilitar el desarrollo de pilotajes.	La normativa actual no distingue la diferencia de alcance e impacto entre proyectos de implementación y desarrollo de pilotajes, inhibiendo el desarrollo de éstos últimos.

[6.4.3] Iniciativas y plazos

A partir del levantamiento de brechas agrupadas en este núcleo, se identificó un grupo de iniciativas estratégicas y posibles soluciones, o líneas de I+D, identificando su temporalidad en el corto (<3 años), mediano (entre 3 y 6 años) y largo plazo (>6 años). La Tabla 6-8 muestra un resumen con las brechas identificadas, las iniciativas estratégicas y las soluciones propuestas en cada caso.

Tabla 6-8

Iniciativas estratégicas y líneas de I+D núcleo habilitante NH4 “Regulaciones, política, permisos y estandarización”

BRECHA IDENTIFICADA	INICIATIVA ESTRATÉGICA	SOLUCIÓN	PLAZO
Dificultad para obtención de permisos para desarrollo de proyectos de H2V.	Promover la normalización y homologación de normas internacionales aplicadas a la cadena de suministro del H2V en Chile y Perú.	Revisión y adaptación de estándares internacionales.	Corto
		Incentivar la tramitación especial de proyectos de H2V, contando con un gremio o asociación sectorial para agilizar la tramitación.	Corto
Falta de regulación para impuestos al carbono.	Promover marcos regulatorios que favorezcan la disponibilidad de agua e introducción de aplicaciones de H2V en minería.	Modificaciones al impuesto verde.	Corto
Falta de regulación para emisiones de fuentes móviles.		Revisión de marco regulatorio sobre emisiones de fuentes móviles y diésel, transporte de carga y otros.	Mediano
Escasez de fuentes de agua para procesos de electrólisis.		Incentivos al desarrollo de proyectos energéticos OFF-GRID (generación y respaldo) y plantas desaladoras para uso compartido.	Corto
Poca claridad sobre impactos de la desalación de agua de mar.			
Barreras normativas para facilitar el desarrollo de pilotajes.		Desarrollar marco normativo ad-hoc para pilotajes de H2V en su cadena de suministro y para aplicaciones en minería.	Corto

[6.5] Núcleo habilitante 5 (NH5): Mediana minería

[6.5.1] Descripción

Este núcleo considera las iniciativas de la hoja de ruta que permitan impulsar a la mediana minería como un actor relevante para contribuir en el camino de la carbono neutralidad, e identificar su rol en el mediano y largo plazo.

[6.5.2] Brechas que aborda

En la Tabla 6-9 se describen las brechas identificadas para el núcleo “Mediana minería”.

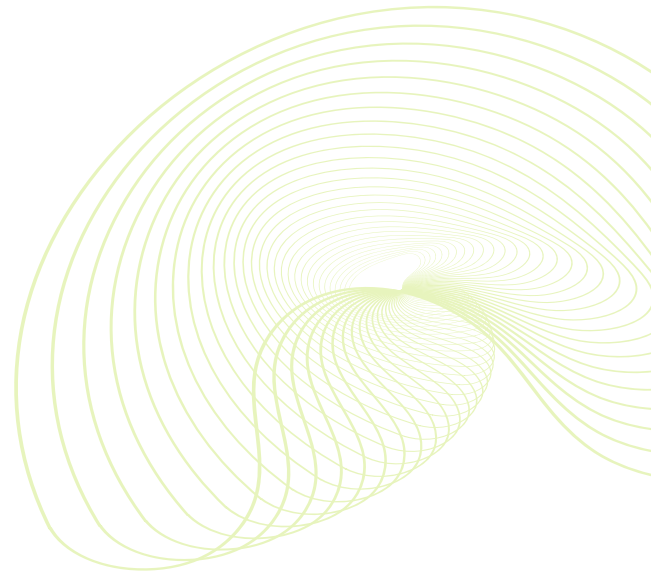


Tabla 6-9

Brechas del núcleo habilitante
NH5 “Mediana minería”

BRECHA IDENTIFICADA	DETALLE
Menor capacidad de inversión (CAPEX) que la Gran minería.	Mineras de tamaño menor no tienen la misma capacidad de inversión en nuevas tecnologías que la Gran minería.
Baja capacidad de negociación con proveedores.	Al no demandar volúmenes de insumos/productos o servicios equivalentes a los de la Gran minería, las empresas mineras de mediano tamaño tienen una capacidad relativamente baja de negociación con proveedores, acerca del tipo de servicios, productos, rebajas en precios o exclusividades. Puede ocurrir, en este contexto, que OEMs desarrollen soluciones (más) aplicables a la Gran minería que no sean adecuadas para la Mediana o Pequeña minería.
Menores recursos para desarrollar su propia “hoja de ruta” corporativa.	Empresas mineras de mediano tamaño disponen de menores recursos que las del segmento de la Gran minería para desarrollar iniciativas, programas o una hoja de ruta de descarbonización.

[6.5.3] Iniciativas y plazos

A partir del levantamiento de brechas agrupadas en este núcleo, se identificó un grupo de iniciativas estratégicas y posibles soluciones, o líneas de I+D, identificando su temporalidad en el corto (<3 años), mediano (entre 3 y 6 años) y largo plazo (>6 años). La Tabla 6-10 muestra un resumen con las brechas identificadas, las iniciativas estratégicas y las soluciones propuestas en cada caso.

Tabla 6-10

Iniciativas estratégicas y líneas de I+D núcleo habilitante NH5 “Mediana minería”

BRECHA IDENTIFICADA	INICIATIVA ESTRATÉGICA	SOLUCIÓN	PLAZO
Menor capacidad de inversión que Gran minería.	Aplicaciones para Mediana minería con foco en movilidad y procesos mineros.	Conversión de camión CAEX de potencia media (1.450 kW) de diésel a eléctrico alimentado con H2V a través de FC.	Mediano
		Conversión de equipos utilitarios diésel a celdas de combustible (ej: manipulador telescópico diésel a FC).	Corto
		Pilotos en equipos auxiliares y estacionarios (de tamaño menor y más fáciles de implementar) sin interferir con la operación.	Corto
Menores recursos para desarrollar hoja de ruta para descarbonización corporativa.	Desarrollo de pilotos en movilidad en equipos menores.	Hoja de ruta para la descarbonización de la pequeña y mediana minería.	Corto
Menor poder de negociación con proveedores en comparación a Gran minería.		Fomentar alianzas entre compañías de la Gran y Mediana minería para proyectos de H2V.	Mediano





07

Iniciativas tecnológicas priorizadas y líneas de I+D+i

En base a las iniciativas estratégicas identificadas en la hoja de ruta, se consolidaron y priorizaron algunas de estas iniciativas, incorporando líneas de I+D+i o potenciales desarrollos para cada iniciativa, por cada núcleo traccionante. Los diagramas siguientes incorporan en la parte superior la iniciativa estratégica; en la parte central, las líneas de I+D+i; y en la parte inferior, las actividades o iniciativas habilitantes en el ámbito del capital humano, regulaciones, estándares e infraestructura y cadena de suministro, considerando la temporalidad estimada en cada caso (corto y mediano plazo). A la derecha del diagrama, se identificaron las entidades responsables, eventuales desarrolladores y aquellas entidades que podrían resultar claves en el financiamiento de los proyectos.

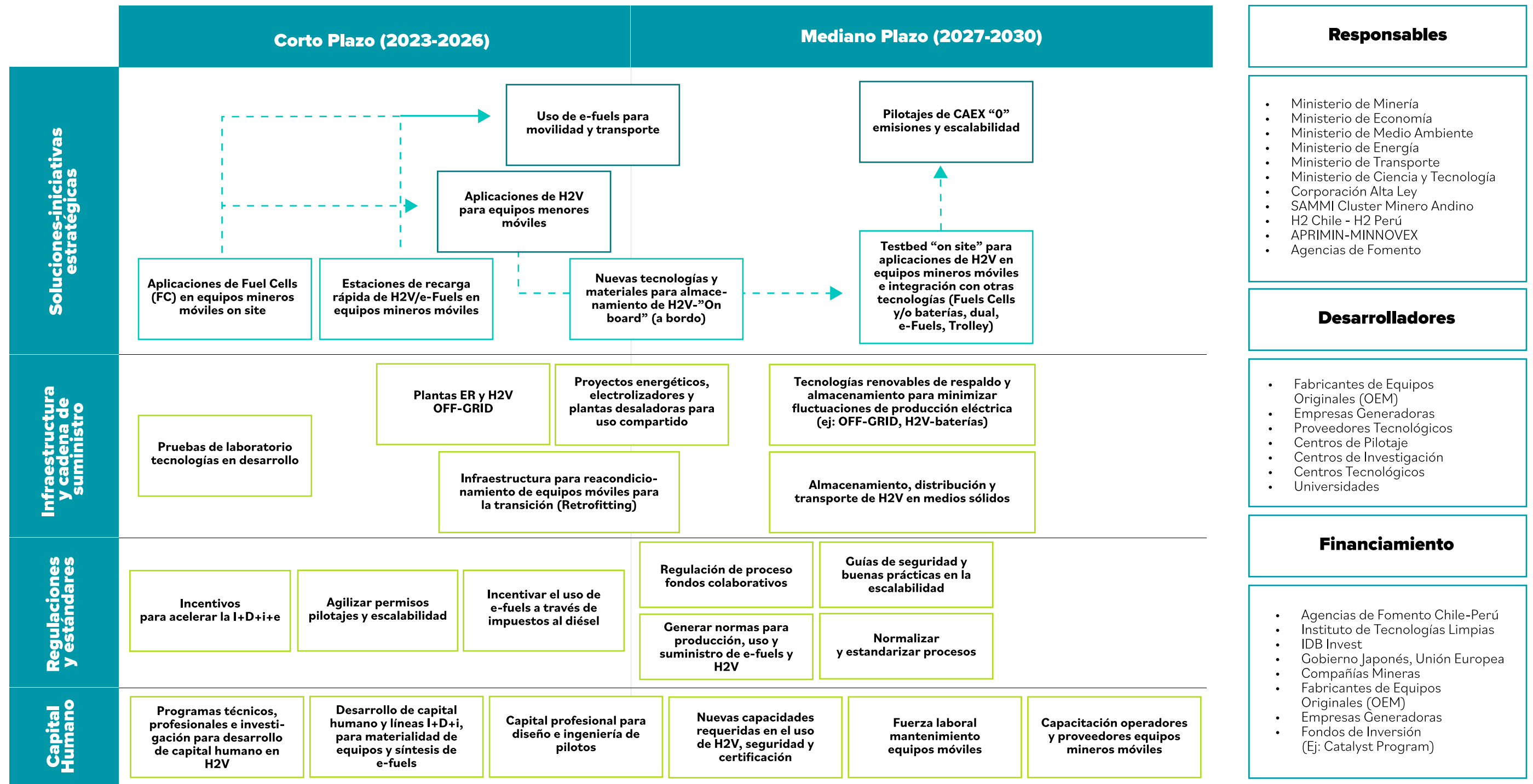
[7.1] Núcleo traccionante 1 (NT1): Movilidad y Transporte

En este caso, las iniciativas priorizadas estratégicas a desarrollar tienen como eje principal el desarrollo de pilotajes de tecnologías de H2V (y/o e-fuels) y su escalabilidad para equipos móviles, considerando la integración con otras tecnologías bajas en emisiones o cero carbono, que permitirían incorporar gradualmente las aplicaciones de H2V a los equipos mineros mediante una transición tecnológica hacia la descarbonización. Esto, considerando la vida útil de los equipos mineros actuales, además de la disponibilidad, productividad y competitividad de las aplicaciones de H2V con respecto a la situación actual.

Tal como se muestra en la Figura 7-1, resulta muy relevante implementar en el corto a mediano plazo elementos habilitantes como infraestructura compartida para la producción de H2V, como también la infraestructura y la asociatividad necesaria para realizar retrofitting a los equipos

mineros. En forma paralela, se hace necesario avanzar en la generación de guías y estándares, reducir los tiempos de evaluación para el desarrollo de pilotajes; la definición de incentivos para el desarrollo de proyectos de I+D+i+e; y la revisión del sistema tributario que rige actualmente para el diésel. Lo anterior, debe complementarse con un plan muy bien coordinado para la formación y capacitación de técnicos, profesionales y operadores que serán claves para el desarrollo de esta industria.

Figura 7-1
Iniciativas priorizadas y líneas de I+D+i-NT1 “Movilidad y Transporte”



[7.2] Núcleo traccionante 2 (NT2): Aplicaciones de H2V en otros procesos mineros

En este caso, las iniciativas priorizadas estratégicas propuestas están orientadas al uso de H2V en aplicaciones de calor que puedan reemplazar los combustibles fósiles en los procesos pirometalúrgicos (FURE) o hidrometalúrgicos (LX-SX-EW), y el uso de H2V aplicado al suministro eléctrico renovable continuo de faenas mineras (OFF GRID).

Tal como se muestra en la Figura 7-2, se destacan líneas de desarrollo en el ámbito del uso de H2V en procesos pirometalúrgicos de reducción cero emisiones, en la evaluación de mezcla (*blending*) de H2V y gas natural (GN) en hornos, quemadores, secadores y calderas con el fin de evaluar eficiencia productiva, mantenibilidad, costos y otras variables; y el uso de H2V para suministro eléctrico renovable continuo OFF GRID.

Al igual que en el caso del núcleo de Movilidad y Transporte, deben considerarse elementos habilitantes como proyectos de infraestructura compartida para la producción y suministro de H2V; la definición de incentivos para el desarrollo de proyectos de I+D+i+e y el uso de e-fuels; vincular los estudios de producción, uso de H2V y *blending* con ámbitos regulatorios; la revisión del sistema tributario que rige actualmente para el diésel; y la definición de guías, normas y estándares. Lo anterior, debe complementarse con un plan muy bien coordinado para la formación y capacitación de técnicos, profesionales y operadores que serán claves para el desarrollo de esta industria.

[7.3] Núcleo traccionante 3 (NT3): Reducción de emisiones de alcance 3 en la cadena de suministro de la minería (EA3)

En este caso, las iniciativas priorizadas estratégicas propuestas están orientadas al desarrollo de sistemas de incentivos para promover la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero de alcance 3 (EA3) de la industria minera, la incorporación de tecnologías de H2V para la fabricación y logística asociada a insumos críticos para la minería, o bien, que puedan integrarse estas tecnologías de H2V en los servicios de proveedores mineros con el fin de reducir sus emisiones. Uno de los elementos relevantes para la implementación del H2V en la minería se relaciona con el desarrollo de know-how local para la mantenibilidad de equipos que utilizan el H2V como combustible, o bien, en los procesos mineros.



Entre las líneas de desarrollo a considerar, se propone la revisión de contratos y licitaciones en el suministro de bienes o prestación de servicios entre proveedores y compañías mineras, el uso de H₂V para fabricación de insumos críticos, y el uso de H₂V o e-fuels en servicios de transporte de personal o carga.

Como elementos habilitantes para desarrollar estas iniciativas, se considera relevante habilitar en el corto plazo una plataforma para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), habilitar infraestructura y asociatividad necesarias para el retrofitting de equipos mineros, y proyectos energéticos, electrolizadores y plantas desaladoras para uso compartido.

En el corto plazo, se propone impulsar la creación de una metodología de medición y estandarización para las EA3, el fomento al uso de e-fuels a través de impuestos al carbono, incentivos tributarios para la importación y transferencia de tecnologías de H₂V para proveedores y otros actores con metas de descarbonización. En el mediano plazo, será necesario el desarrollo de guías de descarbonización para proveedores, normas, estándares y el desarrollo de aspectos regulatorios para el uso de H₂V en empresas proveedoras.

Al igual que en los núcleos anteriores, el desarrollo de capital humano en H₂V es de alta relevancia, considerando el fomento a la formación de capital humano para diseño e ingeniería de proyectos de H₂V, nuevas capacidades requeridas para el uso de H₂V, como, por ejemplo, en aspectos de seguridad y certificación de proveedores; generar una fuerza laboral de servicios de mantenimiento de equipos de H₂V y la capacitación de empresas proveedoras en el ámbito de aplicaciones de H₂V.

Figura 7-2
Iniciativas priorizadas y líneas de I+D+i-NT2 "Aplicaciones de H2V en procesos mineros"

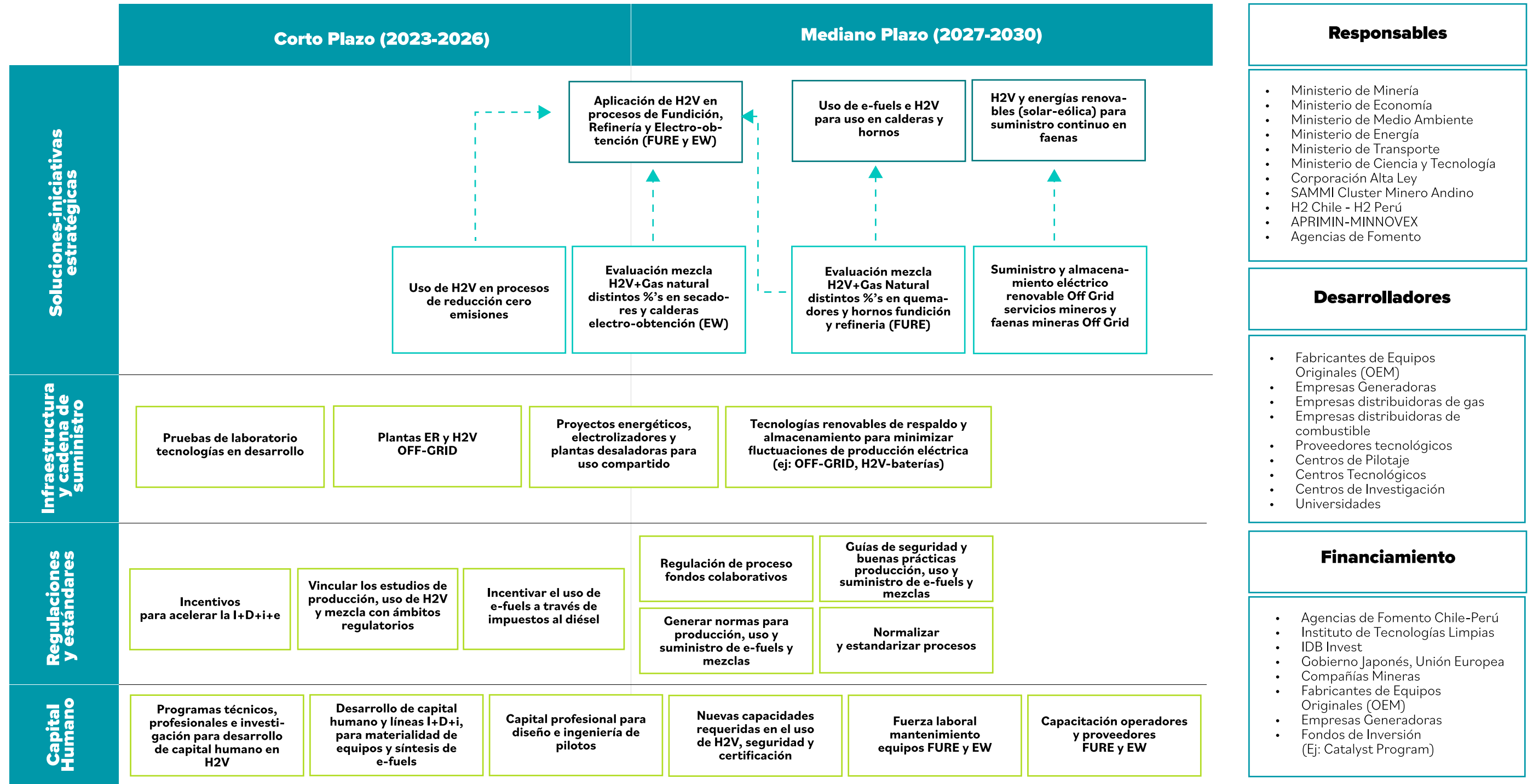
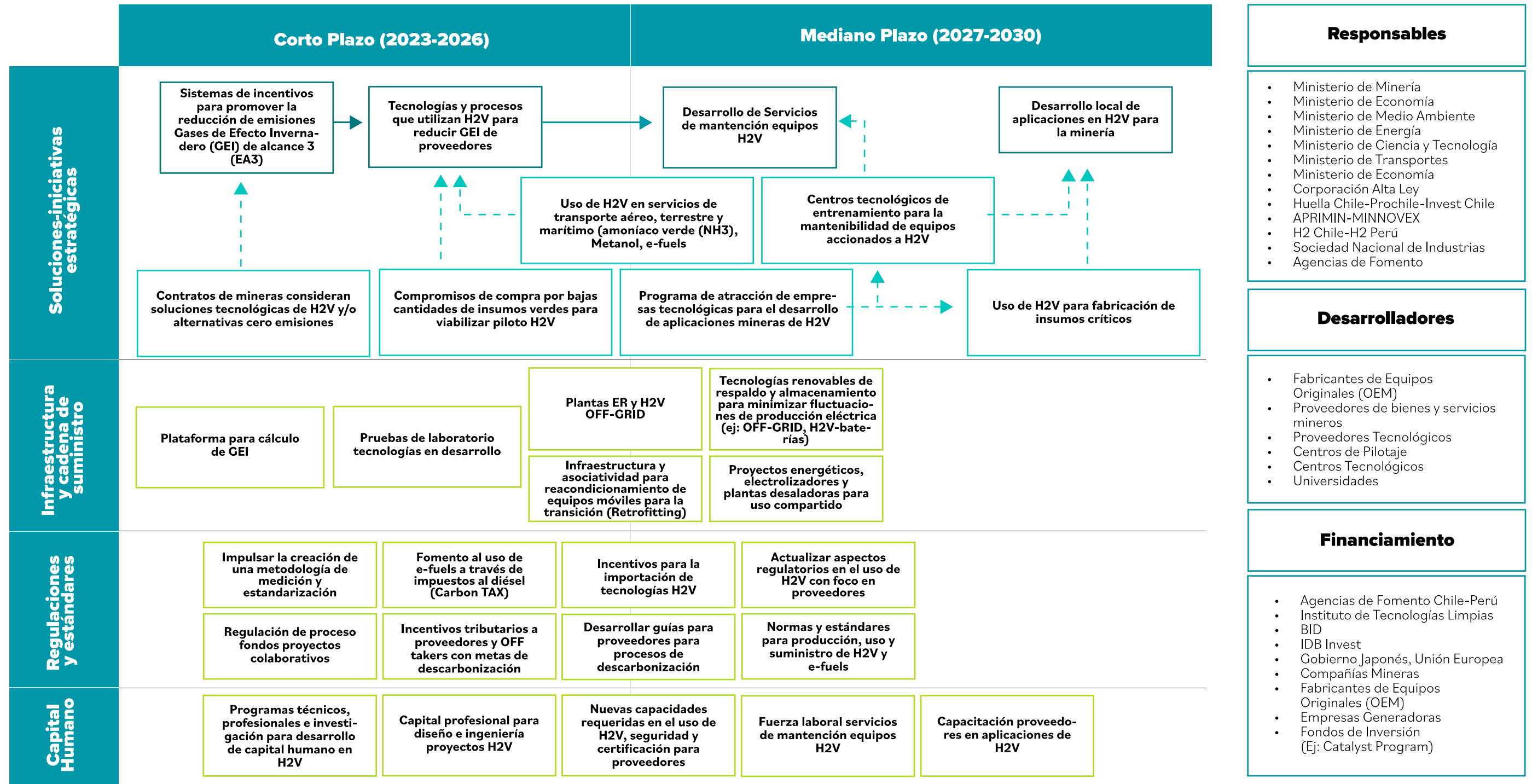


Figura 7-3
Iniciativas priorizadas y líneas de I+D+i
NT3- "Reducción de emisiones de alcance 3 (EA3)"



08

Glosario de términos técnicos

SIGLA/ACRÓNIMO	SIGNIFICADO
BaU	Business as Usual
BEV	Battery Electric Vehicle (esp. Vehículo Eléctrico de Batería)
CAEX	Camión de extracción (minería)
Catenaria (Trolley)	Línea eléctrica suspendida sobre una ruta (o parte de esta), para alimentar/ regenerar energía eléctrica a/desde equipos móviles circulantes
CO₂	Carbon Dioxide (esp. Dióxido de Carbono)
COCHILCO	Comisión Chilena del Cobre
CORFO	Corporación de Fomento de la Producción
EA1	Emisiones GEI de Alcance 1
EA2	Emisiones GEI de Alcance 2
EA3	Emisiones GEI de Alcance 3
e-fuels	Combustibles sintéticos fabricados a partir de la captura de dióxido de carbono desde la atmósfera (o desde gases de procesos); electricidad e hidrógeno renovables (verdes)
EZ	Electrolyzer (esp. Electrolizador)
FCEV	Fuel Cell Electric Vehicle (esp. Vehículo Eléctrico de Celda de Combustible)
FURE	Fundición y Refinería
FV	Fotovoltaico
GHG	Greenhouse Gas (esp. Gas de efecto invernadero, GEI)
GNL	Gas Natural Licuado
GW	Giga Watt (esp. Gigavatio)
H₂	Hidrógeno
H2G	Hidrógeno gaseoso
H2L	Hidrógeno líquido
H2V	Hidrógeno verde (producido mediante electricidad renovable)
HDR	Hoja de ruta (o "Roadmap")
HIF	Highly Innovative Fuels (esp. combustibles altamente innovadores)

SIGLA/ACRÓNIMO	SIGNIFICADO
HRS	Hydrogen Refueling Station (esp. hidrolinera)
I+D	Investigación y Desarrollo
ITL	Instituto de Tecnologías Limpias
kg	Kilogramo
kV	Kilo Volt
kWh	kilovatios por hora
kWp	Kilowatt-Peak
LCOE	Levelized Cost of Energy (esp. costo nivelado de energía)
LCOH	Levelized Cost of Hydrogen (esp. costo nivelado de hidrógeno). Corresponde al costo actualizado de producir 1 kg de hidrógeno, teniendo en cuenta los costos estimados de inversión y operación de los activos involucrados en su producción. Habitualmente, el LCOH no incluye los costos de almacenamiento y transporte de hidrógeno.
LH₂	Liquefied Hydrogen (esp. hidrógeno licuado)
M	Millón
MEN	Ministerio de Energía de Chile
MINEM	Ministerio de Energía y Minas Perú
MINSAL	Ministerio de Salud de Chile
MoU	Memorandum of Understanding (esp. memorando de entendimiento)
MVP	Minimum Viable Product (esp. producto mínimo viable)
MW	Mega Watt (esp. Megavatio)
NaSH	Sulfhidrato de Sodio
NDC	Nationally Determined Contribution (esp. contribución determinada a nivel nacional)
NEC	National Electrical Code (esp. Código Eléctrico Nacional)
NFPA2	National Fire Protection Association (esp. Asociación Nacional de Protección contra Incendios)
NG	Natural Gas (esp. gas natural)
NH₃	Amoníaco
OFF-GRID	Infraestructura energética que opera sin conexión a la red de transmisión eléctrica
OEM	Original Equipment Manufacturer (esp. Fabricante Original de Equipo)
ON-BOARD	Sistema que está integrado a bordo de los equipos
OSHA	Occupational Safety and Health Administration (esp. Administración de seguridad y salud ocupacional)
P2G	Power-to-Gas (esp. energía a gas)
PDL	Proyecto de Ley
PELP	Planificación Energética de Largo Plazo
PEM	Proton Exchange Membrane (esp. Membrana de intercambio de protones)

SIGLA/ACRÓNIMO	SIGNIFICADO
PIB	Producto Interno Bruto
PPA	Power-Purchase-Agreement (esp. Acuerdo de compra de energía)
PV	Photovoltaic (esp. Fotovoltaica, FV)
R&D	Research and Development (esp. Investigación y Desarrollo, I+D)
RE	Renewable Energy (energía renovable)
RER	Recursos Energéticos Renovables
RETROFITTING	Rehabilitación o reacondicionamiento de equipos
RGTO	Reglamento
SEC	Superintendencia de Electricidad y Combustibles (de Chile)
SEN	Sistema Eléctrico Nacional
SEA	Servicio de Evaluación Ambiental
SERNAGEOMIN	Servicio Nacional de Geología y Minería
t	Tonne (esp. Tonelada métrica)
tmf	Toneladas métricas finas
tpd	Toneladas por día
USD	United States Dollars (esp. dólares americanos)



ALTALEY®



SAMMI
CLÚSTER MINERO ANDINO