

NOTA TÉCNICA N° IDB-TN-2862

Acelerando la descarbonización de la industria pesada en América Latina y el Caribe

Nota introductoria

Christiaan Gischler
Fernando Anaya
Michelle Ramírez Bueno
Matilde Urquizo
Julián González
Christian Parra
Patricia Colaferro
José Luís Inglese
Ricardo Pareja
Carlos Pinilla

Banco Interamericano de Desarrollo
División de Energía

Diciembre 2023

Acelerando la descarbonización de la industria pesada en América Latina y el Caribe

Nota introductoria

Christiaan Gischler
Fernando Anaya
Michelle Ramírez Bueno
Matilde Urquizo
Julián González
Christian Parra
Patricia Colaferro
José Luis Inglese
Ricardo Pareja
Carlos Pinilla

Catalogación en la fuente proporcionada por la
Biblioteca Felipe Herrera del
Banco Interamericano de Desarrollo

Acelerando la descarbonización de la industria pesada en América Latina y el Caribe: nota introductoria / Christiaan Gischler, Fernando Anaya, Michelle Ramírez, Matilde Urquizo, Christian Parra, Julian Gonzalez, Patricia Colafero, José Luis Inglese, Ricardo Pareja, Carlos Pinilla.

p. cm. — (Nota técnica del BID ; 2862)

Incluye referencias bibliográficas.

1. Climate change mitigation-Latin America. 2. Climate change mitigation-Caribbean Area. 3. Greenhouse gas mitigation-Latin America. 4. Greenhouse gas mitigation-Caribbean Area. 5. Carbon dioxide mitigation-Latin America. 6. Carbon dioxide mitigation-Caribbean Area. 7. Industries-Environmental aspects-Latin America. 8. Industries-Environmental aspects-Caribbean Area. I. Gischler, Christiaan E. II. Anaya, Fernando. III. Ramírez, Michelle. IV. Urquizo, Matilde. V. Parra, Christian. VI. Gonzalez, Julian. VII. Colafero, Patricia. VIII. Inglese, José Luis. IX. Pareja, Ricardo. X. Pinilla, Carlos. XI. Banco Interamericano de Desarrollo. División de Energía. XII. Serie. IDB-TN-2862

Palabras clave: Descarbonización, Hidrógeno limpio, Industria pesada, Acero, Cemento, Aluminio, Pulpa y papel, América Latina y el Caribe.

Códigos JEL: Q40, Q52, Q58

Diseño y diagramación: Michelle Felguérez

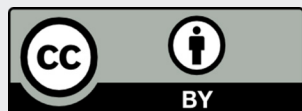
<http://www.iadb.org>

Copyright © 2023 Banco Interamericano de Desarrollo (BID). Esta obra se encuentra sujeta a una licencia Creative Commons CC BY 3.0 IGO (<https://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo/legalcode>). Se deberá cumplir los términos y condiciones señalados en el enlace URL y otorgar el respectivo reconocimiento al BID.

En alcance a la sección 8 de la licencia indicada, cualquier mediación relacionada con disputas que surjan bajo esta licencia será llevada a cabo de conformidad con el Reglamento de Mediación de la OMPI. Cualquier disputa relacionada con el uso de las obras del BID que no pueda resolverse amistosamente se someterá a arbitraje de conformidad con las reglas de la Comisión de las Naciones Unidas para el Derecho Mercantil (CNUDMI). El uso del nombre del BID para cualquier fin distinto al reconocimiento respectivo y el uso del logotipo del BID, no están autorizados por esta licencia y requieren de un acuerdo de licencia adicional.

Note que el enlace URL incluye términos y condiciones que forman parte integral de esta licencia.

Las opiniones expresadas en esta obra son exclusivamente de los autores y no necesariamente reflejan el punto de vista del BID, de su Directorio Ejecutivo ni de los países que representa.



Acelerando la descarbonización de la industria pesada en América Latina y el Caribe



NOTA INTRODUCTORIA



Índice

<i>Introducción</i>	01
<i>I. Industria pesada en ALC y el cambio climático</i>	03
A. Importancia de la industria pesada	03
Acero	05
Aluminio	05
Cemento	06
Pulpa y papel	06
B. Formas de producción	07
Acero	07
Aluminio	08
Cemento	9
Pulpa y papel	11
C. Intensidad energética y emisiones de CO2	14
Acero	14
Aluminio	16
Pulpa y papel	18
D. Proyección de emisiones al 2050	21
<i>II. Industria pesada con bajas emisiones de carbono al 2050</i>	25
A. Construcción de rutas de descarbonización	25
Hidrógeno limpio o verde y de bajas emisiones	26
Captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS)	28
Grupos industriales	29
Electricidad en base a energías renovables	30
Uso de chatarra o reciclado	31
Eficiencia energética	32
Soluciones basadas en la naturaleza	33
B. Desglose de la participación tecnológica en la mitigación de emisiones	34
Acero	34
Aluminio	36
Cemento	38
Pulpa y papel	39
<i>III. Recomendaciones y reflexiones de política pública</i>	42
A. Estrategias, planes y programas	44
B. Marcos regulatorios	45
C. Incentivos económicos	46
D. Investigación y educación	47
E. Mecanismos de financiamiento y mitigación de riesgos	48
F. Marcos de colaboración	50
<i>IV. Referencias</i>	51

Abreviaturas

ALC	América Latina y el Caribe
AP	Acuerdo de París
BAU	Negocios como de costumbre [<i>Business-as-usual</i>]
BF	Alto Horno [<i>Blast Furnace</i>]
BOF	Horno Básico de Oxígeno [<i>Basic Oxygen Furnace</i>]
BID	Banco Interamericano de Desarrollo
CCUS	Captura, utilización y almacenamiento de carbono [<i>Carbon Capture, Usage and Storage</i>]
CO2	Dióxido de Carbono
DRI	Reducción Directa de Mineral de Hierro [<i>Direct Reduction of Iron Ore</i>]
EAF	Horno de Arco Eléctrico [<i>Electric Arc Furnace</i>]
GEI	Gases Efecto Invernadero
GJ	Gigajulio
Gt	Gigatonelada
IAI	Instituto Internacional de Aluminio [<i>International Aluminum Institute</i>]
kWh	Kilovatio hora
PMR	Pulpa Mecánica Refinada
PMT	Pulpa de Madera Triturada
PQTM	Pulpa Quimitemomecánica
PTM	Pulpa Termomecánica

Introducción

De acuerdo con el International Energy Outlook 2021 (IEA, 2021), sin cambios significativos en la política o la tecnología, el consumo global de energía aumentará casi un 50% durante los próximos 30 años. Después de que se confirmara que julio de 2023 ha sido el mes más caluroso registrado hasta esa fecha, el secretario general de la ONU, António Guterres, comentó que es urgente acelerar los esfuerzos de descarbonización de las economías ya que “La era del calentamiento global ha terminado y ha llegado la era de la ebullición global”. Sin embargo, una acción climática coordinada e inmediata todavía puede limitar el aumento de la temperatura global a 1,5 °C, por encima de los niveles preindustriales.



La industria pesada tiene un rol fundamental en la economía global, abarcando una vasta infraestructura dedicada a la transformación de materias primas en productos, equipos e instalaciones de nivel industrial, como acero, aluminio, cemento, pulpa y papel. Sin embargo, esta industria también es una fuente considerable de emisiones de dióxido de carbono (CO₂) difíciles de mitigar, que representan aproximadamente el 29% de las emisiones globales totales.

En este contexto es necesario reflexionar sobre las alternativas de descarbonización que tienen los sectores que integran la industria pesada e integrarse a los esfuerzos hacia la transición energética y acción climática que contribuyan a mitigar los efectos del cambio climático. Para ello, es esencial identificar las necesidades tecnológicas, **de política pública** y financieras de la región para que la industria pesada transite a prácticas bajas en carbono y mitigue los efectos del cambio climático, sin afectar su competitividad.

La movilización del financiamiento para la descarbonización de la industria pesada presenta un desafío significativo, ya que la demanda de capital para una transición hacia cero emisiones excede los recursos disponibles en fuentes tradicionales. La solución requiere un enfoque integral que combine elementos clave, incluyendo la asistencia técnica para preparar y evaluar proyectos adecuadamente. En este sentido, el BID busca canalizar nuevas fuentes de financiamiento para sus países beneficiarios de manera que se puedan rediseñar los modelos de préstamos, reestructurar criterios de inversión y desarrollar estrategias **de política pública** que aceleren la descarbonización de los sectores que producen emisiones de carbono difíciles de abatir.

Identificar las oportunidades que representa la descarbonización de la industria pesada en América Latina y el Caribe (ALC) es crítico, pues fomentará la innovación, la inversión en nuevas tecnologías y promoverá del desarrollo sostenible, competitivo y resiliente al cambio climático.

La presente publicación tiene cuatro secciones, la primera describe la industria pesada en ALC en el contexto del cambio climático, destacando su importancia, formas de producción, intensidad energética y emisiones CO₂, así como una proyección de las emisiones al 2050. Por su parte, la sección 2 propone las posibles rutas de descarbonización de la industria pesada en ALC y un desglose de la mitigación de emisiones para cada sector de la industria pesada. La sección tercera, provee una serie de recomendaciones para los encargados de generar políticas públicas en el marco de la descarbonización de la industria pesada.

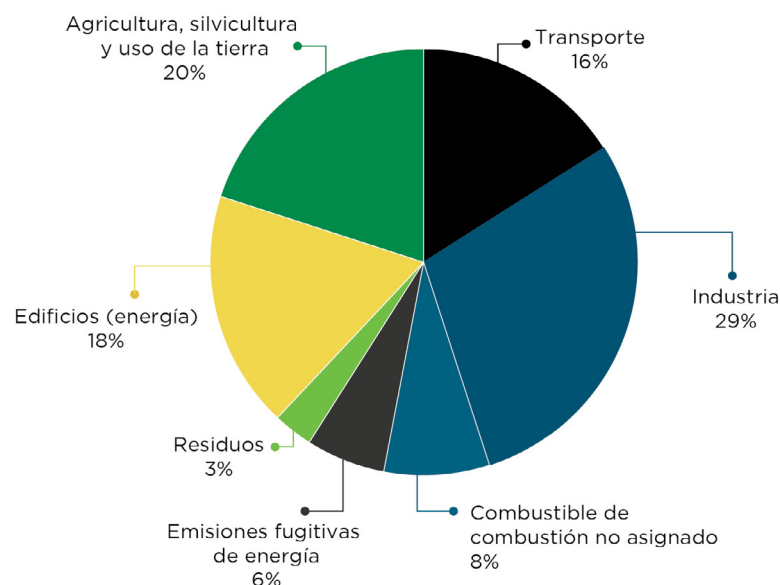
I. Industria pesada en ALC y el cambio climático

A. Importancia de la industria pesada

La industria pesada abarca una infraestructura de gran envergadura dedicada a la fabricación de productos, equipos e instalaciones para consumidores industriales, así como cualquier actividad de transformación de materias primas en procesos de producción a nivel industrial. Este documento se centra en los procesos asociados a la producción de acero, aluminio, cemento, pulpa y papel.

Las industrias del acero, aluminio, cemento y pulpa & papel, entre otras, contribuyen colectivamente con un porcentaje significativo de las emisiones globales de CO₂. Según estimaciones recientes, las industrias representan aproximadamente 29% de las emisiones globales totales. Sus procesos intensivos en carbono y consumo de energía tienen como resultado emisiones sustanciales de CO₂ y otros gases de efecto invernadero, lo que contribuye a la actual crisis climática. Como pilares principales de la economía global, abordar las emisiones de estos sectores se vuelve imperativo para lograr un futuro sostenible y bajo en carbono. Los esfuerzos para descarbonizar e implementar tecnologías más limpias en estas industrias son pasos esenciales para mitigar el impacto de sus emisiones en el medio ambiente y combatir el cambio climático a escala global.

Figura 1. Emisiones GEI globales por sector

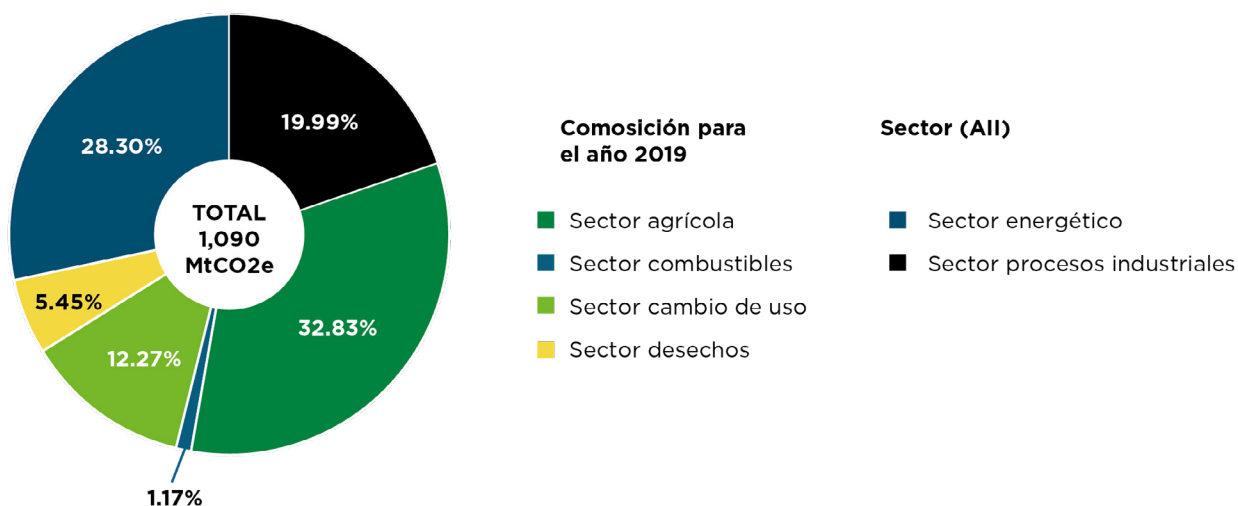


Fuente: (Gischler et al., 2023, p. 1)

En ALC las industrias del **acero, aluminio, cemento y pulpa & papel** han desempeñado un rol históricamente importante en el desarrollo regional. Durante las últimas dos décadas los sectores de canteras y construcción han mantenido una contribución estable al Producto Interno Bruto (PIB) regional en términos absolutos, representando el 3.8 % y el 5 %, respectivamente, en 2021¹.

En ALC, estas industrias son cruciales en la economía, pero también representan un porcentaje significativo de las emisiones regionales, al ser las principales contribuyentes a la huella de carbono de la región, emitiendo aproximadamente 19,99 % de las emisiones regionales totales de CO2. La naturaleza intensiva en carbono de sus procesos de producción y la dependencia de los combustibles fósiles contribuyen a los desafíos climáticos de la región.

Figura 2. Emisiones GEI en ALC por sector en 2019



Fuente: BID (2019)

Incluido el acero, los productos provenientes de la industria pesada son pilares fundamentales para la descarbonización a nivel global, dada su importancia en la creación de infraestructuras sostenibles, avances en tecnologías limpias y más. La transición hacia métodos de producción más sostenibles y la adaptabilidad para impulsar innovaciones representan factores decisivos en la lucha contra el cambio climático.

¹ CEPALSTAT https://statistics.cepal.org/portal/cepalstat/dashboard.html?indicator_id=2207&area_id=131&lang=es

Acero

El **acero** es el tercer material más producido a nivel mundial, después del cemento y la madera. Su uso es fundamental para el desarrollo de infraestructura, transporte, maquinaria y bienes de consumo. Según estimaciones de la CEPAL (2022), la demanda seguirá aumentando a medida que las economías emergentes continúen su desarrollo y experimenten la transición demográfica de lo rural a lo urbano. En 2022, la producción mundial de acero crudo alcanzó los 1.885 millones de toneladas (Mt), lo que representa un crecimiento del 21 % en la última década. En ese mismo año, ALC contribuyó con el 3,3 % de la producción mundial (61,97 Mt), siendo Brasil, México, Argentina, Colombia, Chile y Perú los países que agruparon el 98 % de la producción regional (World Steel Association, 2023) a través de 37 empresas siderúrgicas (Inglés, 2023).

Las dinámicas comerciales de la industria siderúrgica están estrechamente relacionadas con el comportamiento del mercado del acero, donde China ostenta una posición dominante, con el 56 % de la demanda y el 57 % de la oferta (Donoso y Cantallopis, 2021). En cuanto al comercio de acero en la región durante 2020, el 12 % de las importaciones y el 33 % de las exportaciones totales provinieron de países latinoamericanos, principalmente para la producción de aceros laminados largos (que se usan en construcción civil) y planos (usados en autos, barcos, maquinarias, embalajes, y tubos).

Aluminio

El **aluminio** es el metal más abundante en la corteza terrestre y constituye más del 8 % de sus capas exteriores (Olufunmilayo & Olakunle, 2021). El aluminio se utiliza en múltiples aplicaciones en la industria automotriz, la fabricación de dispositivos mecánicos y eléctricos, la construcción y la industria del embalaje. A diferencia de otros metales, las aplicaciones del aluminio son más difíciles de sustituir por otros metales o fibras de alta resistencia, lo que hace que su demanda sea más resistente a las innovaciones tecnológicas que podrían afectar la comercialización de aluminio en diversos usos finales.

Según estimaciones del International Aluminium Institute (IAI), se espera que el mercado mundial de fundición de aluminio experimente un crecimiento significativo, pasando de USD 164.000 millones en 2019 a USD 244.400 millones en 2027. En ese contexto, en 2019 la región latinoamericana abasteció 2,8 Mt de la demanda global lo que representó el 3 % del consumo total mundial de aluminio. En la actualidad, el 98 % de la producción primaria de aluminio en la región se concentra en Argentina, Brasil y Venezuela, destacando especialmente estos dos últimos países por mantener una industria verticalmente integrada que abarca desde la extracción de bauxita hasta la obtención de alúmina y la elaboración de aluminio en bruto. Aunque Brasil registra una tasa de reciclaje de aluminio promedio del 55 %, se presume que esta cifra podría ser menor debido a la importación de productos con alto contenido de aluminio que no cuentan con registros nacionales IAI (2022).

Cemento

El **cemento** ocupa el segundo lugar como el material más consumido a nivel mundial, justo después del agua potable. Su versatilidad lo convierte en un elemento fundamental en una amplia gama de construcciones, desde hogares y entornos urbanos hasta imponentes diques y represas. En la región, encontramos industrias cementeras de diversos tamaños y trayectorias, cada una con sus propios procesos productivos para obtener una variedad de tipos de cemento.

Debido a sus cualidades, aplicaciones y amplia disponibilidad de materias primas, el cemento sigue siendo el material de construcción preferido a nivel mundial. En 2019, la producción de cemento en ALC alcanzó la asombrosa cifra de 167.180 Mt. Brasil y México lideran la producción regional, representando más del 55 % del total, seguidos por Argentina, Colombia y Perú, que contribuyen entre un 6 % y el 7 % cada uno. El resto de los países de ALC agrupan alrededor del 23 % de la producción regional² (USGS, 2020).

Pulpa y papel

La **pulpa** de celulosa es el componente principal utilizado en la fabricación de **papel**. En 2020, la producción de pulpa para papel en ALC representó 16,1 % de la producción mundial, alcanzando las 189 Mt, un crecimiento del 42 % en la última década. El 99 % de la producción de la región se concentra en América del Sur, y dentro de esta, el 97,1 % lo constituyen: Brasil con un 66,8 %, seguido por Chile con un 19,4 %. Uruguay y Argentina contribuyen con un 7,7 % y un 3,2 % respectivamente. (FAO, 2021).

ALC se destaca como una importante proveedora de pulpa para papel a nivel mundial. Durante el período 2010-2020, las exportaciones de pulpa de la región experimentaron un impresionante crecimiento del 77 %, representando aproximadamente tres cuartos de su producción total. En 2021, ALC contribuyó con aproximadamente el 30 % de la demanda global de pulpa, y sus exportaciones se dirigieron principalmente al mercado europeo, que absorbía casi el 80 % del volumen comercializado (CEPI, 2022). En cuanto a la producción de papel en la región, ALC representa alrededor del 6 % de la producción mundial, que alcanzó 401 millones de toneladas en 2020. El sector líder en la producción de papel en ALC es el papel de embalaje, con una participación promedio del 63 % y un crecimiento del 21 % durante el período 2010-2020. Le siguen la producción de papel doméstico y sanitario con un 18 %, el papel de impresión y escritura con un 14 %, el papel prensa con un 1 % y otros tipos de papel con el 4 % restante (FAO, 2021).

² Entregable 1. Caracterización de la matriz energética y las emisiones del sector cementero Latinoamericano y del Caribe actual, fundamentos de la industria del cemento y mercado global y regional.

B. Formas de producción

En esta sección se presentan los procesos fundamentales de producción en las industrias del acero, aluminio, cemento, y pulpa y papel. Para cada una de estas industrias, se describen las etapas clave en la fabricación de sus productos, los métodos utilizados y las principales materias primas empleadas. Comprender estos procesos es fundamental, ya que permitirá evaluar de manera precisa las posibles estrategias de descarbonización. Si bien esta introducción brinda una visión general del contenido, es importante destacar que la descripción detallada de procesos complementarios se presentará en los volúmenes técnicos.

Acero

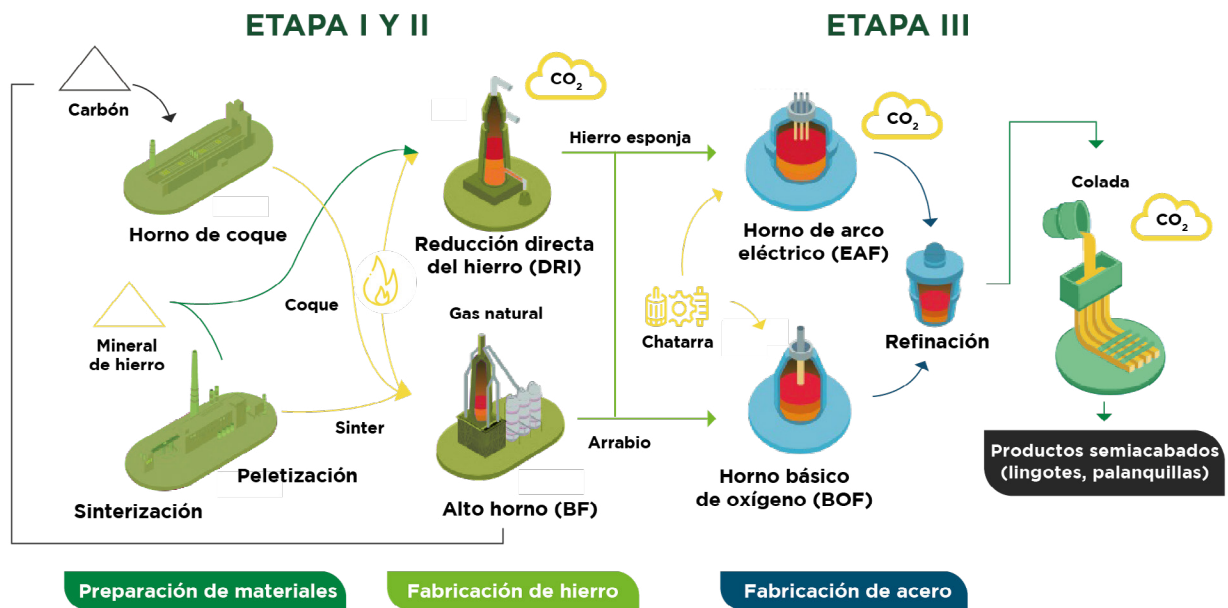
La producción del acero se realiza en tres etapas. En la **primera** etapa, se lleva a cabo la obtención de materiales clave, como el coque y el sinter. El coque se obtiene mediante un proceso de calentamiento del carbón a temperaturas elevadas, sin presencia de aire, lo que elimina los componentes volátiles y da como resultado un sólido compuesto principalmente de carbono. El sinter se produce al triturar el mineral de hierro, el cual se mezcla posteriormente con piedra caliza, polvo de coque, agentes para formar escoria y fundentes, todo a altas temperaturas. Luego, tanto el sinter como el coque se utilizan como insumos en la fabricación del hierro.



La **segunda** etapa comprende la fabricación de hierro, que se puede realizar mediante dos rutas. Una ruta es la del alto horno (*Blast Furnace*, BF, por sus siglas en inglés), que transforma el mineral de hierro y el sinter en hierro bruto, también conocido como arrabio (*pig iron*). La otra ruta es la reducción directa de mineral de hierro (*Direct Reduction of Iron Ore*, DRI, por sus siglas en inglés), también conocido como hierro esponja, en la que el mineral de hierro se reduce en su estado sólido.

La **tercera** y última etapa consiste en la fabricación de acero crudo, que utiliza el arrabio o el hierro esponja como materia prima, siguiendo dos rutas principales: el Horno Básico de Oxígeno (*Basic Oxygen Furnace*, BOF, por sus siglas en inglés) y el Horno de Arco Eléctrico (*Electric Arc Furnace*, EAF, por sus siglas en inglés). Este último se alimenta con chatarra de acero para producir acero reciclado y/o con hierro esponja proveniente de la DRI. Durante el proceso de fusión, se añaden elementos para lograr la composición química adecuada, y se inyecta oxígeno en el horno para purificar el acero. Por otro lado, la ruta del BOF fabrica acero mediante la oxidación, inyectando oxígeno a través de una lanza sobre una mezcla fundida de arrabio y/o chatarra. Una vez obtenido el acero, se realiza un proceso de refinado para eliminar las impurezas remanentes. La fabricación culmina con el proceso de colada continua, en el cual el acero fundido se vierte en moldes para obtener tres formas semiacabadas: lingotes, planchones y palanquillas. La Figura 3 ilustra de manera esquemática el proceso de fabricación de acero, resaltando las tres etapas.

Figura 3. Producción de acero primario BF-BOF



Fuente: Traducido y adaptado de World Steel Association³

Aluminio

En general, el proceso de fabricación de aluminio consta de cuatro etapas y se obtiene a partir del procesamiento del mineral de bauxita.

La **primera** etapa comienza con la extracción de bauxita de los yacimientos mineros, que luego se somete a un proceso de preparación preliminar. Durante esta etapa, la bauxita es triturada, molida y clasificada con el objetivo de eliminar arcillas y otros materiales no deseados (Hasanbeigi, et al., 2022).

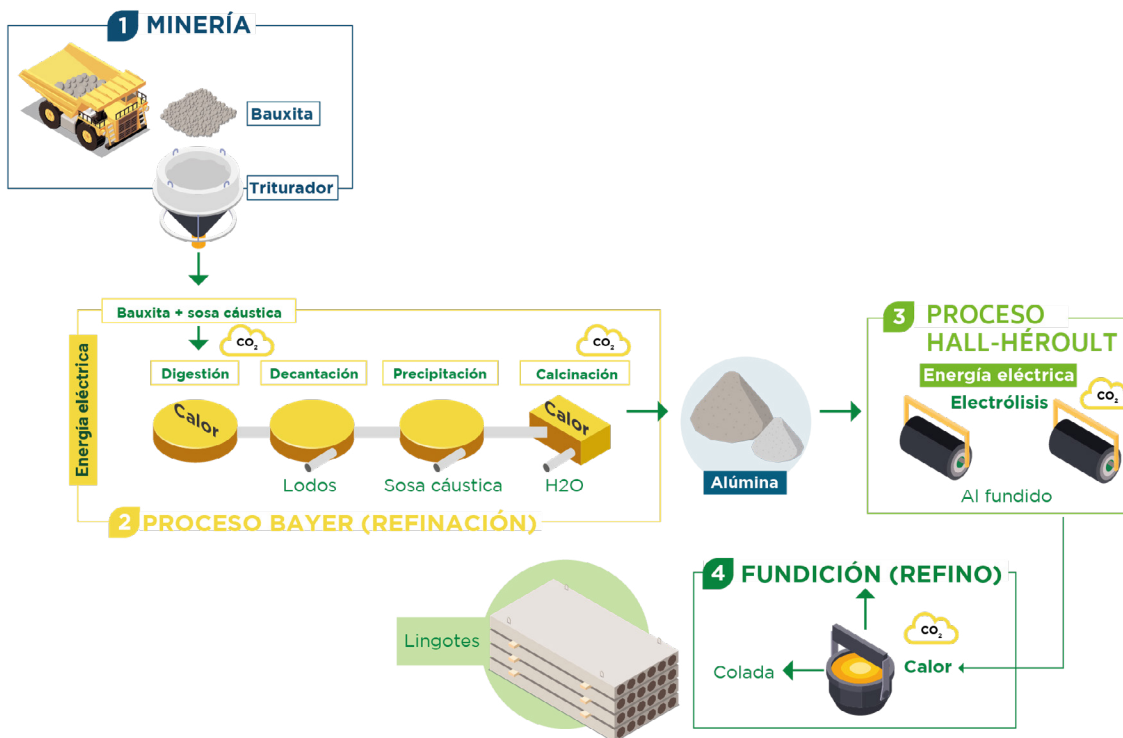
Seguidamente, se inicia el proceso Bayer, que es la **segunda** etapa, y tiene como resultado la obtención de alúmina hidratada.

Luego, en la **tercera** etapa, se lleva a cabo el proceso Hall-Hérout, también conocido como electrólisis, donde se reduce la alúmina en una mezcla con fluoruro de sodio (criolita). Esta mezcla se sumerge en electrodos de carbono a través de los cuales se hace pasar electricidad, lo que ocasiona la descomposición de la alúmina en oxígeno y aluminio. El metal de aluminio fundido se deposita en el polo negativo (cátodo), mientras que el oxígeno se acumula en los electrodos de carbono.

³ <https://worldsteel.org/about-steel/about-steel/steelmaking/>

El metal extraído se transporta a los hornos de mantenimiento, que constituyen la cuarta y última etapa del proceso, donde se alea el metal y se eliminan los gases e impurezas, afinado del aluminio. Finalmente, se procede al colado del metal para darle forma a través de la creación de lingotes o barras de aluminio. La Figura 4 ilustra de manera esquemática esta etapa en la producción de aluminio primario.

Figura 4. Esquema general de producción de aluminio primario



Fuente: Elaboración propia

Cemento

El proceso convencional de fabricación del cemento se compone de tres etapas, siguiendo los estándares de la industria. La **primera** etapa implica el acondicionamiento de las materias primas extraídas de canteras, como la piedra caliza, la marga o la tiza, que contienen carbonato de calcio. Estas materias primas pasan por dos procesos de trituración (primaria y secundaria), y se complementa con una pre-homogeneización, en la cual se mezclan y trituran los diferentes componentes para obtener un material “crudo”.

En la **segunda** etapa se lleva a cabo la fabricación del clínker. Durante este proceso, el crudo se introduce en un horno vertical o rotatorio y se calienta gradualmente al entrar en contacto con los gases calientes de la combustión. A medida que la temperatura del crudo aumenta, se producen una serie de reacciones químicas sucesivas que dan lugar a la formación de un material hidráulico, con al menos dos tercios de su masa compuestos por silicatos de calcio (Schumacher & Juniper, 2013).

La **etapa final** del proceso de fabricación del cemento implica la molienda en molinos de bolas tradicionales o molinos verticales. Durante esta etapa, se tritura el clínker, que previamente ha sido enfriado, junto con aproximadamente un 4 % al 5 % de yeso⁴.

El resultado de este proceso es un polvo gris conocido como cemento Portland convencional. También es posible realizar la molienda conjunta con otros componentes minerales para producir cemento mezclado o adicionado⁵. Una vez completada la molienda, el producto final se somete a un proceso de homogeneización y se almacena en silos de cemento antes de ser enviado a las estaciones de embalaje. La siguiente figura ilustra las distintas etapas del proceso de fabricación de cemento Portland.

Figura 5. Proceso de fabricación de cemento Portland



Fuente: Elaboración propia

⁴ El yeso controla el tiempo de fraguado del producto.

⁵ Si se utilizan cantidades significativas de escoria, cenizas volantes, piedra caliza u otros materiales para reemplazar el clínker.

Pulpa y papel

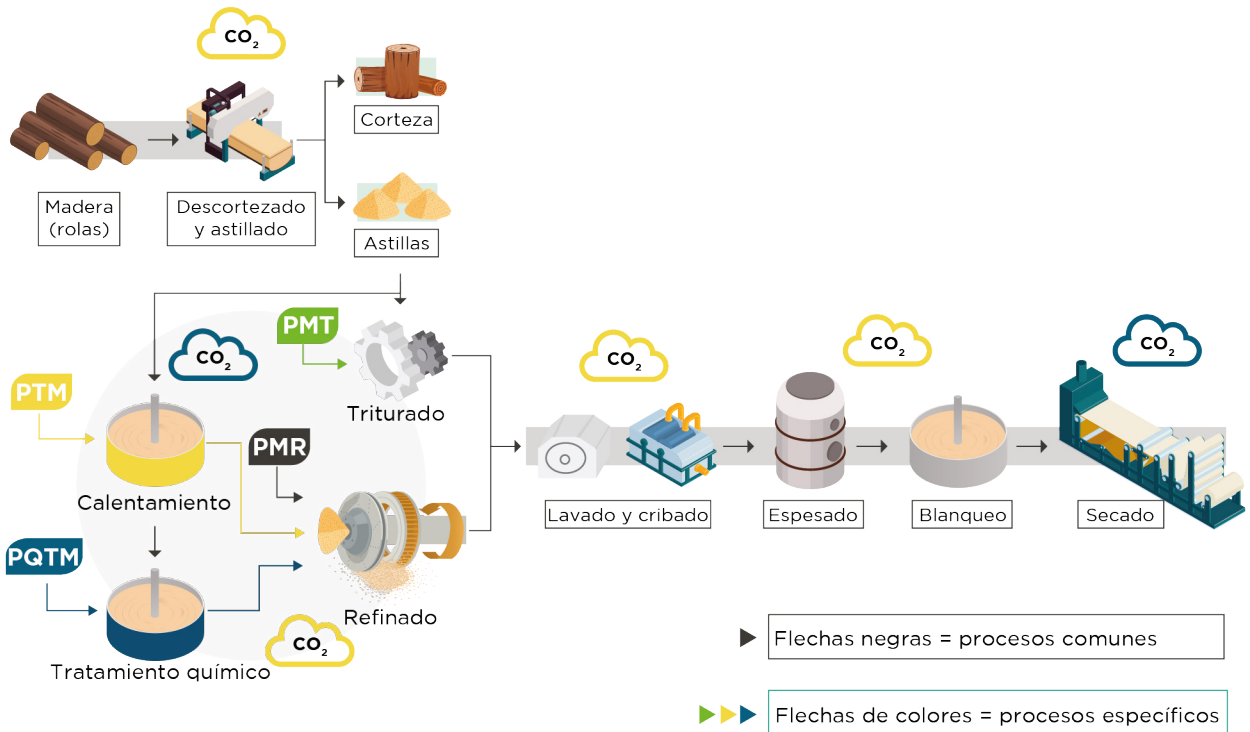
La producción primaria de pulpa se fundamenta en el aprovechamiento de la madera como materia prima principal. La madera empleada en este proceso contiene aproximadamente un 70 % a un 75 % de celulosa y hemicelulosas, que son polisacáridos que contienen diversos tipos de azúcares en su composición. Estas sustancias representan las principales fuentes de fibra utilizadas en la fabricación de papel (Rullifank et al., 2020).

En la **primera** etapa, la madera, una vez desprovista de su corteza, se somete a un proceso de astillado, donde se reduce a pequeños fragmentos. A continuación, en la **segunda** etapa, estas astillas se someten a un proceso de cribado para clasificarlas y asegurar un tamaño uniforme, lo cual mejora la eficiencia del proceso de despulpado. En esta **etapa final**, las astillas de madera se descomponen en fibras individuales de celulosa, eliminando la lignina que se encuentra en la madera. Dependiendo del método utilizado, la producción de pulpa puede ser de naturaleza mecánica o química.

En el método mecánico, las astillas de madera se someten a un proceso de trituración y molienda para separar las fibras de celulosa de la lignina. La principal ruta de fabricación mecánica es conocida como obtención de pulpa a partir de madera triturada (PMT), que representa el método más antiguo utilizado para obtener fibras a través de procesos físicos. Además de la PMT, existen otros métodos de fabricación mecánica, como la pulpa mecánica refinada (PMR) y la pulpa termomecánica (PTM). Entre estos métodos, se encuentra también la producción de pulpa quimitemomecánica (PQTM), que combina el proceso mecánico con la adición de sustancias químicas, que buscan mejorar ciertas propiedades de la pulpa mediante el uso de aditivos químicos. La figura a continuación muestra el proceso de fabricación de pulpa mecánica.



Figura 6. Proceso de fabricación de pulpa por métodos mecánicos



Fuente: Elaboración propia en base a la ICF (2015)

En cuanto a la producción de pulpa química, se distinguen dos tipos principales: pulpa Kraft (al sulfato) y pulpa al sulfito. El método más ampliamente utilizado es el proceso Kraft, que representa aproximadamente el 80 % de la producción mundial (Rahnama et al., 2021). Este proceso implica la combinación de hidróxido de sodio y sulfuro de sodio a una temperatura de 160 °C – 180 °C y un pH mayor a 12, creando lo que se conoce como licor blanco, esta es la **primera** etapa. Este licor blanco reacciona con la madera, descomponiendo los enlaces químicos de la lignina y generando un material fibroso (Rullifank et al., 2020). Una vez completada la cocción en el digestor, la **segunda** etapa consiste en transferir la pulpa resultante a un tanque de soplado, donde las astillas de madera ablandadas se descomponen en fibras. Posteriormente, en la **tercera** etapa de filtrado y lavado, se separa la pulpa del licor de cocción, también conocido como licor negro, el cual contiene una variedad de sustancias orgánicas e inorgánicas. Este licor negro se dirige al sistema de recuperación de productos químicos y energía de la planta. La figura siguiente resume el proceso de producción de pulpa Kraft.

Figura 7. Proceso de fabricación pulpa Kraft



Fuente: Elaboración propia en base a la ICF (2015)

El proceso de fabricación de papel comienza con el tratamiento de la pulpa de fibras para su transformación en papel y cartón. En primer lugar, se lleva a cabo un pretratamiento de la pulpa que incluye procesos de mezclado y refinación. El objetivo de este pretratamiento es asegurar que la pulpa tenga las condiciones de disolución óptimas. Durante este proceso, es posible agregar rellenos minerales o aditivos químicos con el fin de mejorar el rendimiento de la pulpa y modificar las propiedades del papel resultante, como su resistencia, textura y brillo (Rahnama et al., 2021).

Una vez finalizado el pretratamiento, la mezcla de pulpa pasa por cuatro subprocesos consecutivos: formado, prensado, deshidratado o secado, y calandrado. Durante el subproceso de **formado**, la pulpa se distribuye de manera uniforme sobre una tela o malla, permitiendo que el agua se drene y las fibras se entrelacen, dando forma a una hoja de papel. A continuación, en el subproceso de **prensado**, se aplica presión para eliminar la mayor cantidad posible de agua remanente, lo que compacta las fibras y mejora la cohesión del papel. Luego, en el subproceso de **deshidratado** o secado, se emplea calor y aire para eliminar el agua restante de la hoja de papel, reduciendo su contenido de humedad al nivel óptimo para el producto final. Por último, en el subproceso de **calandrado**, la hoja de papel pasa entre rodillos lisos o estriados para mejorar su suavidad, brillo y uniformidad superficial. La figura a continuación ilustra de manera esquemática el proceso de producción de papel.

Figura 8. Proceso de producción de papel



Fuente: Elaboración propia en base a la ICF (2015)

C. Intensidad energética y emisiones de CO₂

Acero

En el sector acero, el consumo global promedio de energía es 20,12 gigajulios (GJ) por tonelada de acero crudo producido y la intensidad energética varía según la ruta de producción utilizada (World Steel Association, 2021; 2022). Las rutas más comunes resultan de la combinación del BF, con BOF que produce acero mediante oxidación del arrabio con inyección de oxígeno a una mezcla fundida.

Otra ruta es la combinación de la reducción directa de mineral de hierro DRI en estado sólido, utilizando el EAF. Las rutas primarias requieren entre ocho y diez veces más energía que las que utilizan chatarra como materia prima. Según datos de la Agencia Internacional de Energía (IEA, 2020), la ruta BF-BOF tiene una intensidad energética de 21,4 GJ/t, la ruta DRI-EAF de 17,1 GJ/t y la ruta EAF basada en chatarra 2,1 GJ/t.

Actualmente, el carbón es el principal recurso energético demandado para la producción de acero. Del suministro total de energía registrado para la industria a nivel global para el año 2021 (IEA, 2022), el carbón alcanzó una participación del 75 %, seguido por la electricidad y el gas natural.

A nivel global, la intensidad de emisiones de CO₂ promedio de la industria del acero es de 1,91 tCO₂/t de acero crudo. Sin embargo, en ALC, este factor es incluso más bajo que el promedio mundial, llegando a 1,66 tCO₂/t (CRU, 2022)⁶.

⁶ Para más información, consultar el volumen correspondiente.



Esto se debe en gran medida a la difusión de la ruta EAF en la región, a la eficiencia y a la presencia de fuentes de energía renovable en la matriz energética. De este total de emisiones, el 93,37 % (equivalente a 1,55 tCO₂/t de acero crudo) corresponde a emisiones directas, alcance 1⁷, mientras que el 6,63 % restante (equivalente a 0,11 tCO₂/t de acero crudo) corresponde a emisiones indirectas, alcance 2⁸ (estudio de CRU para uso interno del Alacero, 2022). El factor de emisión en la producción de acero varía según la ruta utilizada. En el caso de ALC, se estima que la producción mediante el proceso BOF genera aproximadamente 1,91 tCO₂/t de acero crudo mientras que la producción mediante el proceso EAF tiene un factor de emisión cercano a 0,55 tCO₂/t de acero crudo (estudio de CRU para uso interno de Alacero, 2022). La tabla a continuación desagrega las emisiones directas e indirectas según ruta de producción.

Tabla 1. Participación de las emisiones según ruta de producción de acero ALC

Tipo de emisión	BOF		EAF	
	tCO ₂ /t	%	tCO ₂ /t	%
Directas (alcance 1)	1,90	99%	0,35	64%
Indirectas (alcance 2)	0,01	1%	0,20	36%
Total	1,91	100%	0,55	100%

Fuente: Elaboración propia en base a la ICF (2015)

⁶ Para más información, consultar el volumen correspondiente.

⁷ Las emisiones de alcance 1 son emisiones directas producidas por quema de combustibles por parte del emisor.

⁸ Las emisiones de alcance 2 son emisiones indirectas generadas por la electricidad consumida y comprada por el emisor.

Aluminio

En ALC, la industria del aluminio tiene un consumo promedio de energía de 64,4 GJ por tonelada de producto⁹. Dentro de este consumo, 13 % se destina al proceso Bayer, utilizado para la producción de alúmina. En este proceso, los principales energéticos utilizados son los combustibles de petróleo (63 %) y el carbón mineral (28 %). El 87 % restante del consumo de energía corresponde al proceso de electrólisis, donde el 78 % de la generación proviene de fuentes renovables, mientras que el 20 % proviene de generación no renovable utilizando gas natural (IAI, 2022a).¹⁰

La producción primaria de aluminio genera emisiones GEI que se pueden clasificar en dos categorías (Hasanbeigi et al., 2022; Marks et al., 2006). En primer lugar, están las emisiones directas de proceso, que se producen durante la electrólisis del aluminio. Estas emisiones se generan debido a la oxidación de los ánodos de carbono, liberando CO₂. También se incluyen las emisiones relacionadas con la fabricación de ánodos y la generación de energía térmica in situ utilizada en los procesos de refinación y fundición. Además, las emisiones directas también abarcan la producción de perfluorocarbonos (PFC), que son gases de efecto invernadero muy potentes, generados por el llamado “efecto anódico”. La segunda categoría corresponde a las emisiones indirectas, provenientes del consumo de electricidad utilizado principalmente en el proceso de electrólisis. En ALC, las emisiones directas promedio de la industria del aluminio representan el 53 % de las emisiones totales, mientras que las emisiones indirectas constituyen el 47 % restante, tal como se desagrega en la tabla a continuación.

Tabla 2. Factores de emisión producción Al primario ALC (tCO₂e/tAl)

Emisiones directas (alcance 1)	Refinación	Producción de ánodos	Electrólisis	Fundición	Total	%
De procesos (CO ₂)	0,00	0,10	1,58	0,00	1,68	36 %
Efecto anódico (PFC)	0,00	0,00	0,72	0,00	0,72	15 %
Energía térmica	2,22	0,00	0,00	0,10	2,32	49 %
Subtotal	2,22	0,10	2,30	0,10	4,72	53 %
Emisiones indirectas (alcance 2)	Refinación	Producción de ánodos	Electrólisis	Fundición	Total	%
Consumo de electricidad	0,36	0,00	3,78	0,00	4,14	100 %
Subtotal	0,36	0,00	3,78	0,00	4,14	47 %
Total (alcance 1 + 2)	2,58	0,10	6,08	0,10	8,86	100 %

Fuente: Elaboración propia en base a estadísticas de la IAI¹¹

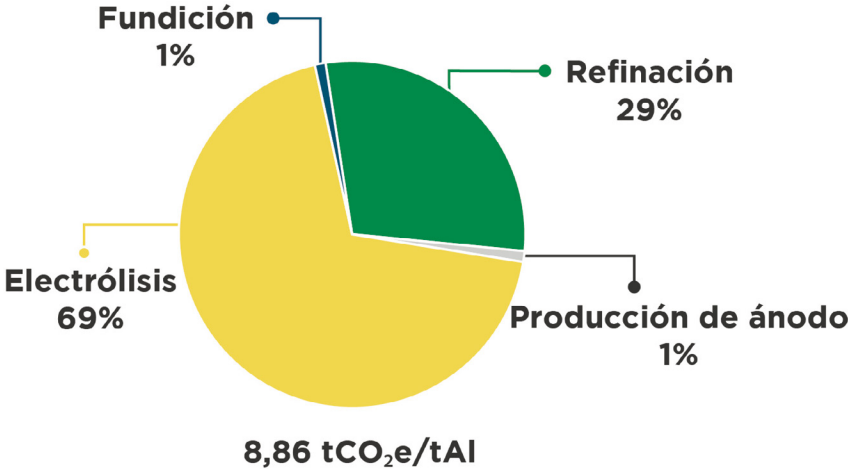
⁹ <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-smelting-power-consumption/>

¹⁰ Ídem.

¹¹ <https://international-aluminium.org/statistics/greenhouse-gas-emissions-intensity-primary-aluminium/>

En la industria del aluminio en ALC, aproximadamente el 69 % de las emisiones totales se originan en el proceso de electrólisis, mientras que el 29 % se deriva del proceso de refinación para obtener alúmina. Estos dos procesos combinados representan el 98 % de la contribución total de emisiones, según se representa en la figura a continuación (IAI, 2022b).

Figura 9. Participación de las emisiones en la producción de aluminio primario



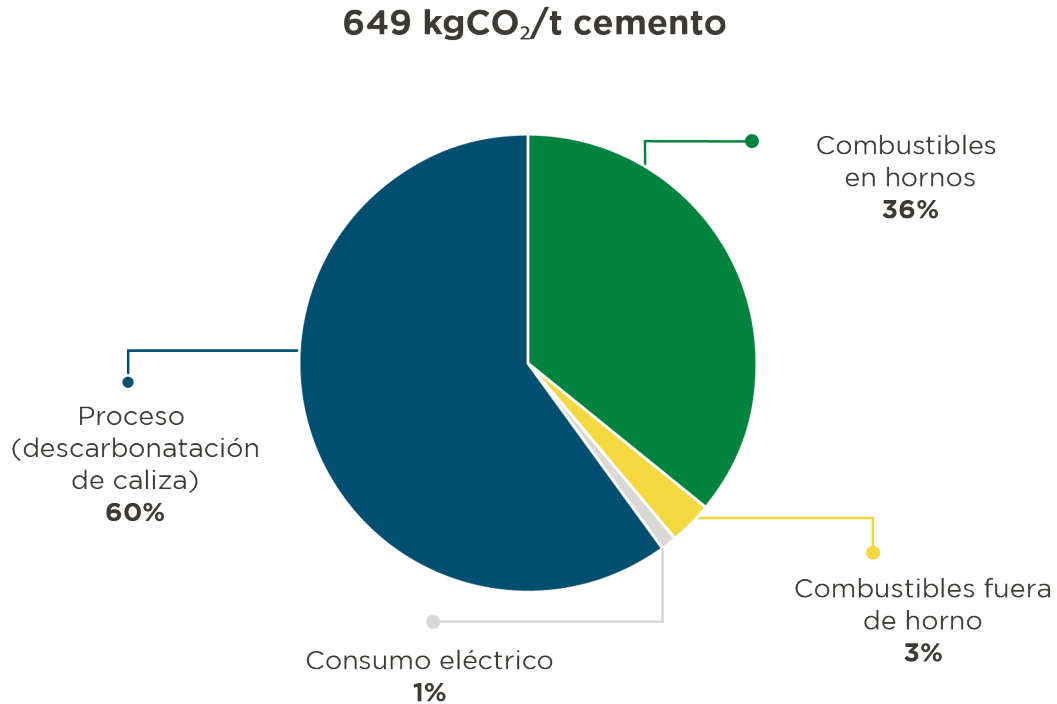
Fuente: elaboración propia en base a estadísticas de la IAI

Cemento

La industria del cemento requiere aproximadamente 4 GJ de energía por tonelada de producto (Cantini, et al., 2021). De este total, el 95,5 % se destina al uso de energía térmica generada a partir de combustibles fósiles, mientras que el restante 4,5 % corresponde al consumo de electricidad (UNIDO, 2014). En esta industria, la generación de energía térmica implica el empleo de combustibles como el carbón, el petróleo y el gas natural, los cuales se utilizan para generar calor en los procesos de fabricación de cemento. Por otro lado, el consumo de electricidad se utiliza para alimentar equipos y maquinaria específicos en ciertas etapas del proceso.

En el proceso de fabricación de cemento, se generan emisiones de CO₂ a partir de tres fuentes distintas. En primer lugar, las emisiones directas se originan principalmente durante el proceso de descarbonatación de la caliza en el horno de clínker. Además, se generan emisiones directas debido a la quema de combustibles tanto dentro de los hornos (precalcinación y secado) como fuera de ellos (transporte, autogeneración). Por otro lado, las emisiones indirectas se producen como resultado del consumo de energía eléctrica en los equipos y sistemas utilizados en la mezcla y molienda para obtener el cemento, así como en su empaque y almacenamiento, entre otros. En promedio, la industria del cemento emite alrededor de 649 kgCO₂ por tonelada de producto al año, como se muestra en detalle en la figura a continuación.

Figura 10. Participación de las emisiones en la producción de cemento



Fuente: elaboración propia basada en calculadora de CO₂ de la Federación Interamericana de Cemento FICEM

Pulpa y papel

El consumo de energía en la industria tiene una alta dependencia de la electricidad y varía según el tipo de producto y el enfoque de fabricación de pulpa y papel. En la producción de la pulpa, el proceso quimitermomecánico (PQTM) es el más demandante de energía, con un promedio de consumo de 2.677 kWh por tonelada de producto (kWh/t). Le sigue la pulpa termomecánica (PTM) con una demanda de 2.371 kWh/t, la pulpa de madera refinada (PMR) con 2.242 kWh/t y la pulpa de madera triturada (PMT) con 1.920 kWh/t. Los procesos de refinado y molienda son los que más consumen energía eléctrica en el conjunto. En cuanto al consumo de energía térmica, se estima en aproximadamente 2,9 GJ/t de producto, siendo el proceso de secado de pulpa responsable del 69 % de dicho consumo (ICF 2015, Bajpai, 2018; Rahnama et al., 2021).

En la producción de pulpa mecánica en ALC, los factores de emisión oscilan entre 0,616 tCO₂/t y 0,871 tCO₂/t de pulpa seca¹². En promedio, el 66 % de las emisiones corresponden a emisiones indirectas (alcance 2), mientras que el 34 % restante son emisiones directas (alcance 1). Estos factores de emisión varían según el proceso y el método de producción utilizado, tal como se muestra en la tabla a continuación.

¹² De no incluirse el proceso de secado de la pulpa mecánica, el factor de emisión se reduciría en promedio un 20 %.

Tabla 3. Factores de emisión de procesos de pulpa mecánica (tCO₂/t de pulpa seca)

Procesos	Emisiones directas	Emisiones indirectas	Total
Astillado de madera (todos)	0,00	0,00	0,00
Molienda de madera (PMT)	0,00	0,33	0,33
Refinado (PMR, PTM, PQTM)	0,00	0,40	0,40
Calentamiento (PTM, PQTM)	0,09	0,02	0,12
Tratamiento químico (PQTM)	0,00	0,06	0,06
Lavado y cribado (todos)	0,00	0,01	0,01
Espesado (todos)	0,00	0,01	0,01
Blanqueo (todos)	0,00	0,02	0,02
Secado (todos)	0,20	0,01	0,22
Total por tipo de pulpa	Emisiones directas	Emisiones indirectas	Total
PMT	0,20	0,41	0,61
PMR	0,20	0,47	0,68
PTM	0,30	0,50	0,80
PQTM	0,30	0,57	0,87

Fuente: Elaboración propia basada en consumos energéticos presentados por Rahnama et al. (2021) y factores de emisión de CO₂ del IPCC (2006).

La producción de pulpa química mediante el método Kraft presenta un consumo eléctrico aproximadamente la mitad que el proceso mecánico. No obstante, es importante destacar que este método presenta una importante demanda de energía térmica que puede alcanzar 9,87 GJ por tonelada de producto, lo que representa aproximadamente el 86 % de la demanda total de energía. Dentro de este porcentaje, el 54 % de la demanda de energía térmica se concentra en los procesos de digestión, blanqueado y secado de la pulpa, mientras que el 32 % restante se destina a la línea auxiliar de recuperación de licor negro (ICF 2015, Bajpai, 2018; Rahnama et al., 2021).

En términos de emisiones, la fabricación de pulpa química Kraft presenta una mayor intensidad por tonelada de producto en comparación con la pulpa mecánica. En el caso de ALC, el factor de emisión para este producto alcanza 1,367 tCO₂/t de pulpa seca¹³. De este total, 80 % corresponde a emisiones directas mientras que el restante 20 % corresponde a emisiones indirectas, según se desagrega en la tabla siguiente (ITBA, 2022).

¹³ El factor de emisión se reduce 21,8 % al excluir el proceso de secado de la pulpa Kraft.

Tabla 4. Factores de emisión producción de pulpa química Kraft (tCO₂/t)

Procesos	Emisiones directas	Emisiones indirectas	Total
Astillado de madera	0,00	0,01	0,01
Digestión	0,32	0,11	0,43
Soplado	0,06	0,01	0,08
Lavado y tamizado	0,00	0,01	0,01
Espesado	0,00	0,02	0,02
Blanqueo	0,06	0,02	0,09
Secado	0,24	0,03	0,27
Evaporación de licor negro	0,19	0,00	0,20
Recuperación de licor negro	0,11	0,01	0,12
Recaustificación	0,07	0,01	0,09
Total	1,08	0,28	1,36

Fuente: Elaboración propia basada en consumos energéticos presentados por Rahnama et al. (2021) y factores de emisión de CO₂ del IPCC (2006).

En cuanto a la producción de papel, el consumo de energía se concentra en las etapas de formado, prensado y secado. En promedio, se estima un consumo de 503 kWh/t y 4,7 GJ/t, dividido en un 28 % de electricidad y un 72 % de energía térmica (Rahnama et al., 2021).

En la producción de papel en ALC, se registra un factor de emisión promedio de 0,396 tCO₂ por tonelada de producto, siendo los mayores valores observados en la elaboración de papel de impresión y de escritura, y los menores en el papel de embalaje y prensa. En esta industria, las emisiones directas predominan, representando el 73 % del total, principalmente debido al consumo de energía térmica requerida en el proceso de secado del papel. La siguiente tabla detalla los factores de emisión por tipo y proceso de producción de papel (ITBA, 2022).

Tabla 5. Factores de emisión producción de papel (tCO₂/t)

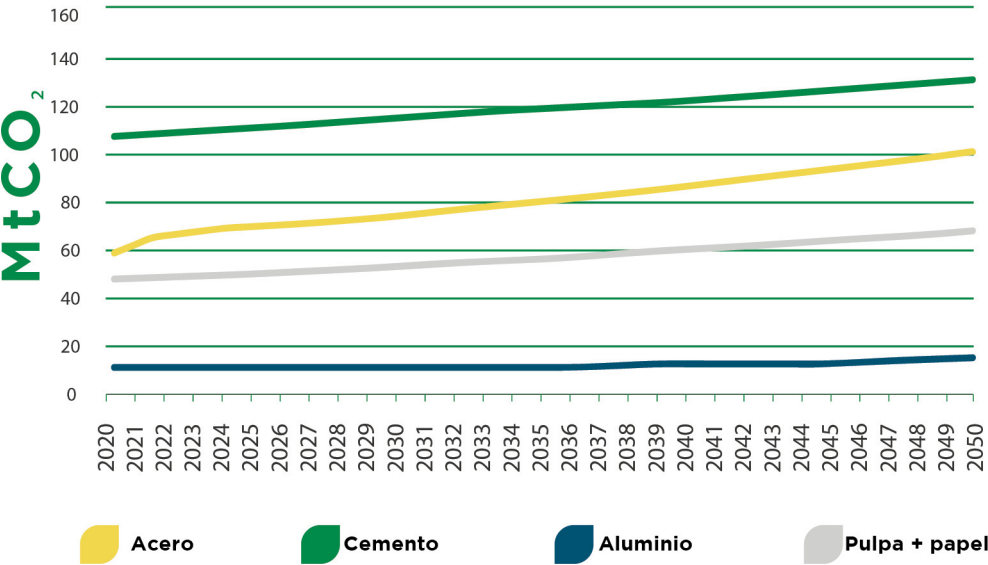
Tipo de papel	Emisiones directas		Emisiones indirectas		Total
	Formado y prensado	Secado	Formado y prensado	Secado	
Papel prensa	0,00	0,26	0,09	0,00	0,36
Papel de impresión	0,00	0,33	0,11	0,00	0,45
Papel de escritura	0,00	0,32	0,11	0,00	0,44
Papel tisú	0,00	0,25	0,11	0,02	0,40
Papel de embalaje	0,00	0,25	0,05	0,00	0,31
Promedio	0,00	0,28	0,09	0,01	0,39

Fuente: Elaboración propia en base a consumos energéticos presentados por Rahnama et al. (2021) y factores de emisión de CO₂ del IPCC (2006).

D. Proyección de emisiones al 2050

La industria pesada desempeña un papel crucial en las futuras emisiones de gases de efecto invernadero. Uno de los desafíos destacados se encuentra en el sector de la construcción para el año 2050, donde se espera un incremento cercano al 70 % en las emisiones de CO₂ asociadas a la producción de acero y del 23 % vinculada a la producción de cemento¹⁴. Para las industrias del aluminio y la pulpa y papel, se estima que experimenten un aumento del 37 % y del 43 % respectivamente en las emisiones de CO₂ para el año 2050 (ITBA, 2022). La figura siguiente muestra la proyección de emisiones totales para estas industrias.

Figura 11. Emisiones totales CO2 industrias pesadas ALC al 2050



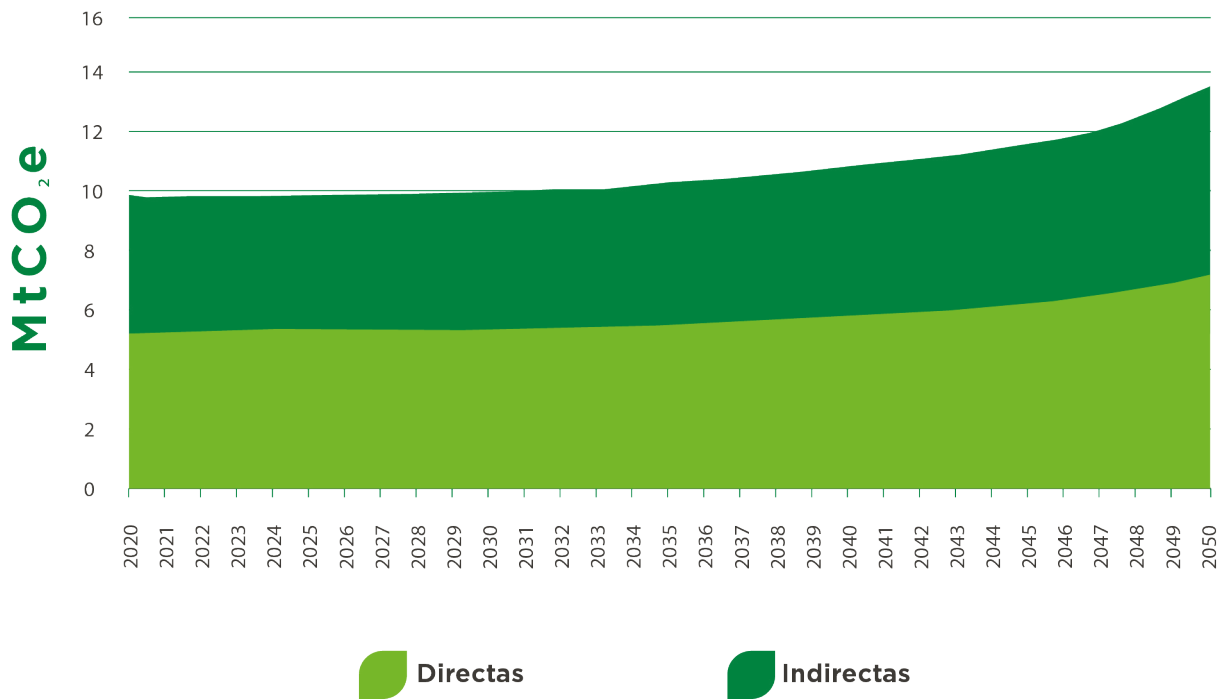
Fuente: Elaboración propia con base en ITBA (2022); World Steel Association. (2023); Informes estadísticos FICEM (2013, 2016 y 2019).

¹¹ Estimaciones propias en base a estadísticas disponibles de producción de acero (World Steel Association), producción de cemento (FICEM) y factores de emisión entregados en el apartado anterior.

La proyección de las emisiones de la industria primaria del aluminio en el escenario Business As Usual (BAU) de la IAI, ajustado para ALC, revela un aumento del 37 % durante el periodo 2020-2050. En cifras, esto implica un incremento de las emisiones totales de GEI de 9,8 MtCO₂e a 13,5 MtCO₂e. De esta cantidad, el 54 % se atribuirá a emisiones directas (alcance 1), mientras que el 46 % restante corresponderá a emisiones indirectas (alcance 2), como se ilustra en la figura que se muestra a continuación (estimación en base a datos del IAI, 2022).



Figura 12. Emisiones GEI industria primaria del aluminio al 2050

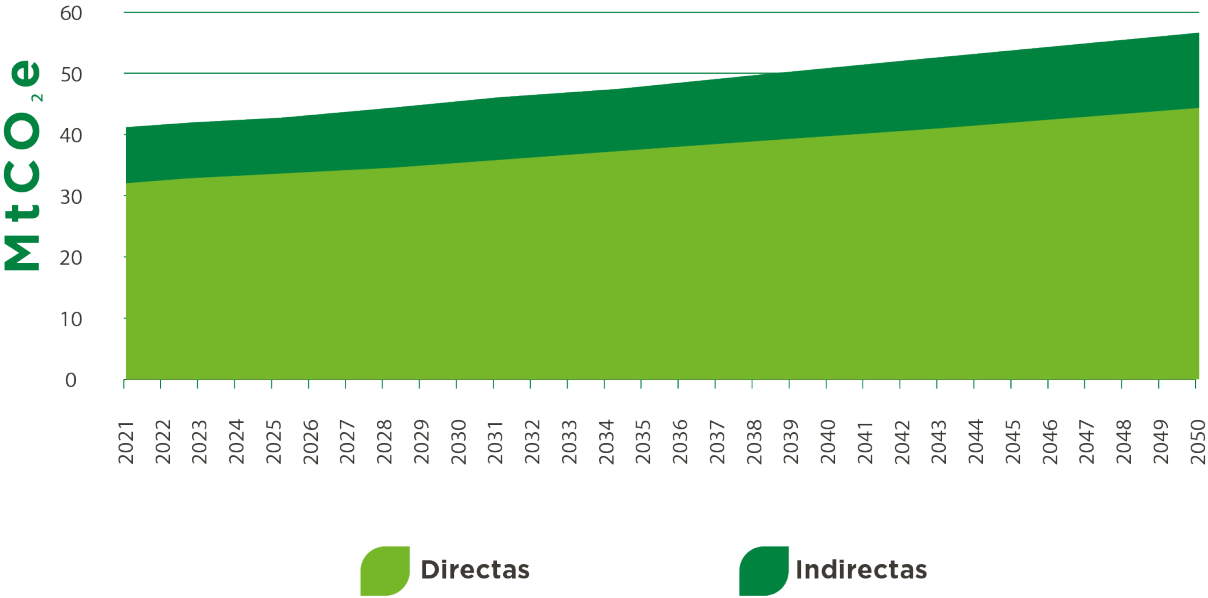


Fuente: Elaboración propia en base a datos del IAI

Dentro del conjunto de emisiones directas esperadas para el año 2050 (7,28 MtCO₂e), se proyecta que el proceso de electrólisis contribuirá con el 48 % del total, seguido de la refinación de alúmina con un 46 %. Las emisiones derivadas de la producción de ánodos y la fundición del aluminio representarán un 4 % y un 2 %, respectivamente. En cuanto a las emisiones indirectas, se estima que el proceso de electrólisis constituirá el 91 % del total proyectado para el año 2050, alcanzando la cifra de 6,25 MtCO₂e. El restante 9 % de las emisiones indirectas se atribuirá a la refinación de alúmina (estimación propia en base a datos del IAI y datos regionales de la industria, 2022).

Para la industria de la pulpa y papel se prevé un incremento del 38 % en las emisiones de CO₂ provenientes de la producción primaria de la industria de la pulpa para el año 2050. Estas emisiones se proyectan que aumenten de 41,4 millones de toneladas (Mt) en 2021 a 56,9 Mt en 2050. De este total, se estima que el 79 % corresponderá a emisiones directas, como se detalla en la figura a continuación (ITBA, 2022).

Figura 13. Emisiones de CO2 producción primaria de pulpa ALC al 2050

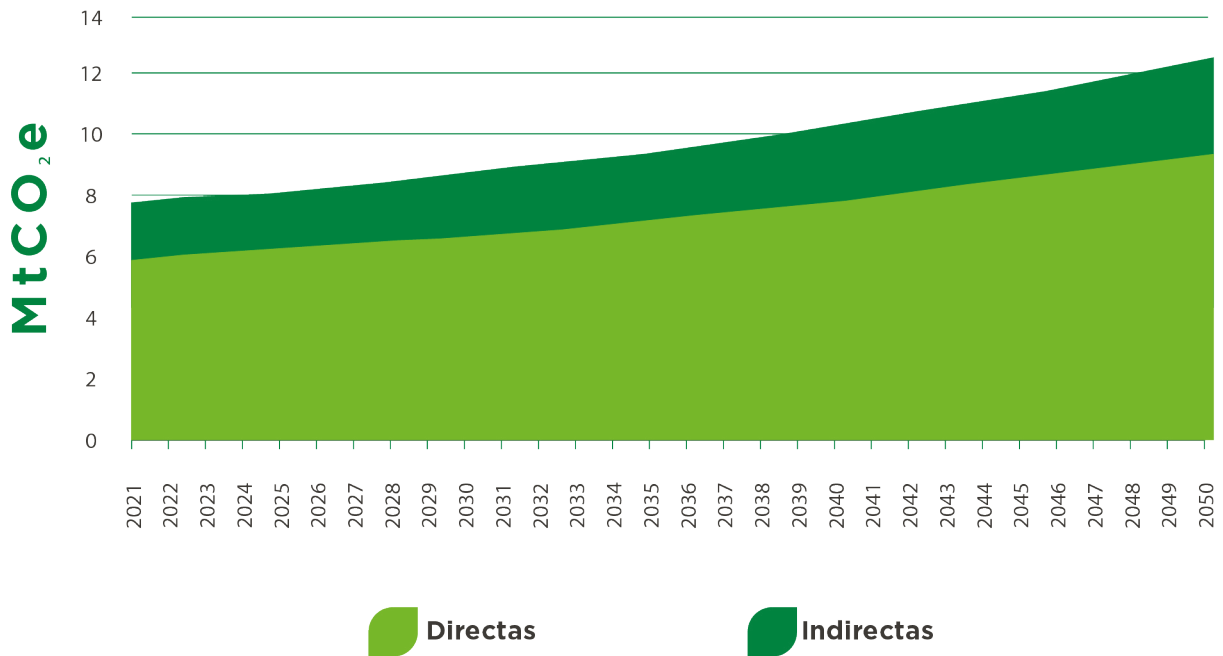


Fuente: Elaboración propia

Entre los diferentes tipos de pulpa, se estima que la producción de pulpa Kraft será la principal contribuyente a las emisiones para el año 2050. Según las proyecciones, el método Kraft aportará 97,8 % de las emisiones totales, lo que equivale a 55,6 MtCO₂ mientras que la PQTM representará el restante 2,2 % (1,2 7 MtCO₂) (ITBA, 2022).

Por otro lado, se prevé que la producción de papel experimente un incremento significativo de alrededor de dos tercios en sus emisiones de CO₂ para el año 2050. Para este año las emisiones de la industria alcanzarán 12,5 MtCO₂, equivalente a un incremento del 60 %, en comparación con el año 2021 (7,7 MtCO₂). Es importante destacar que las emisiones directas tendrán una participación del 75 % del total, tal como se muestra en la siguiente figura (ITBA, 2022).

Figura 14. Emisiones CO₂ producción de papel ALC al 2050



Fuente: Elaboración propia

Dentro de la amplia gama de productos de la industria papelera, se destaca que el papel de embalaje y los productos domésticos y sanitarios son los principales contribuyentes a las emisiones de CO₂. Del total al 2050, el papel de embalaje aportará el 62,1 %, seguido por el papel doméstico y sanitario (30,6 %), el papel de impresión y escritura (4,9 %), otros tipos de papel (2,4 %) y el papel prensa (0,04 %).

II. Industria pesada sin emisiones de carbono al 2050

Esta sección se centra en la exploración y presentación de tecnologías de vanguardia, reconocidas por su potencial para mitigar las emisiones de carbono, se analiza la viabilidad de estas tecnologías en los sectores de producción de acero, aluminio, cemento y pulpa y papel, brindando ejemplos concretos de su implementación y los beneficios tangibles que conllevan. Cada una de estas tecnologías, ya sea mediante la utilización del hidrógeno, la captura y almacenamiento de carbono, la generación de electricidad renovable, la reutilización de materiales o el aumento de la eficiencia energética, desempeña un papel crucial en el amplio y variado abanico de soluciones posibles para la descarbonización.

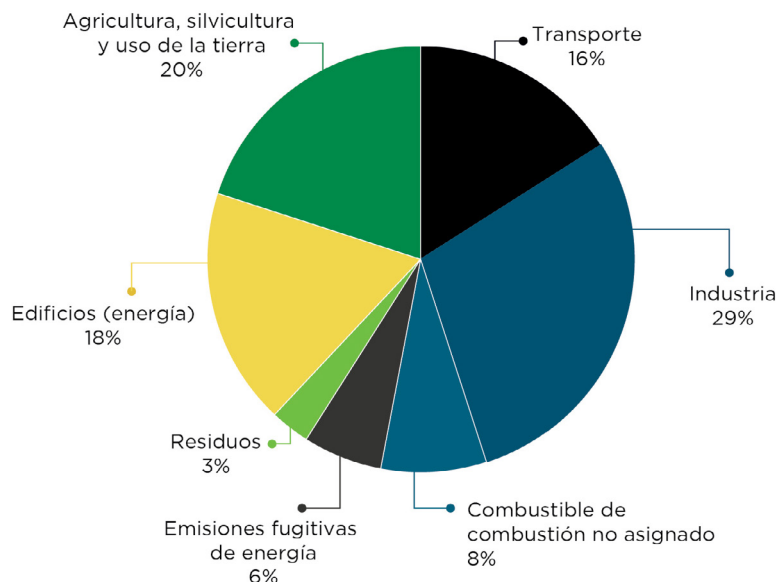
Asimismo, se señalan breves recomendaciones para los encargados de crear políticas públicas con el objetivo de generar las condiciones que permitan implementar esa tecnología y lograr la descarbonización de la industria pesada en ALC.

Estos elementos conforman trayectorias de descarbonización que resultan esenciales para lograr los objetivos de mitigación del cambio climático en el ámbito industrial, al adaptarse a las características propias de cada sector.

A. Construcción de rutas de descarbonización

Dentro del contexto de la implementación de medidas para reducir las emisiones de la industria pesada, resulta vital la identificación de estrategias eficientes de descarbonización. A continuación, se presentan las tecnologías que tienen aplicaciones en las industrias del acero, aluminio, cemento y pulpa y papel, destacando algunos ejemplos de sus posibles aplicaciones y beneficios en la transición hacia una industria pesada baja en emisiones para el año 2050. Estas tecnologías abarcan, principalmente, el uso de hidrógeno, la captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS), la generación de electricidad mediante fuentes renovables, la utilización de chatarra y la mejora de la eficiencia energética, entre otras (se proporcionarán detalles específicos en los volúmenes correspondientes a cada tecnología). La combinación de estas tecnologías, adaptadas a las particularidades de cada sector industrial, conforma las rutas de descarbonización, cuya implementación resulta fundamental para alcanzar los objetivos de mitigación del cambio climático en la industria.

Figura 15. Tecnologías para reducir las emisiones GEI



Fuente: (Gischler et al., 2023, p. 2)

La creación de vías de descarbonización en la industria pesada puede beneficiarse de una amplia gama de tecnologías y enfoques respaldados por la experiencia internacional y el nivel de desarrollo tecnológico alcanzado. La combinación de estas tecnologías y enfoques, adaptados a las características específicas de cada sector industrial, puede resultar fundamental para establecer rutas efectivas de descarbonización que se alineen con los objetivos establecidos en el AP. Enseguida, se describen las posibles aplicaciones de cada una.

Hidrógeno limpio o verde y de bajas emisiones

El hidrógeno limpio o verde se entiende como el hidrógeno obtenido a partir de fuentes de energía renovable. Su uso presenta diversas aplicaciones en la industria pesada, pudiendo ser utilizado como fuente de electricidad, combustible y energía térmica. Sin embargo, uno de los principales desafíos para su desarrollo en ALC es su elevado costo de producción e infraestructura actual. Además, es importante tener en cuenta que la conversión de electricidad en hidrógeno puede implicar pérdidas de conversión que oscilan entre el 20 % y el 40 %.

Acero

La integración de hidrógeno limpio en la descarbonización de los procesos de producción de **acero** puede ser implementada tanto en infraestructuras nuevas (*greenfield*) como en instalaciones existentes (*brownfield*). Esta transición implica la adaptación de los equipos existentes o, en algunos casos, la reconstrucción completa de la instalación para llevar a cabo un proceso de producción libre de carbono. La implementación de estas medidas puede variar según la ubicación geográfica, la viabilidad técnica, la infraestructura disponible, la demanda del mercado, los costos operativos y el marco regulatorio vigente.

En términos generales, existen dos formas de utilizar hidrógeno limpio en la producción de acero. La primera consiste en emplearlo como un insumo alternativo en la inyección de carbón pulverizado para mejorar el rendimiento de los altos hornos (BF) convencionales. Si bien la inyección de hidrógeno (limpio y de bajas emisiones) en los altos hornos puede reducir las emisiones de carbono hasta 20 %, su adopción no permite una producción de acero bajo en emisiones, dado que el carbón de coque sigue siendo el principal agente reductor en la ruta BF. La segunda forma de utilizar hidrógeno limpio es como un reductor alternativo en la producción de hierro reducido directo (DRI), pudiendo desplazar hasta el 100% del gas natural.

Aluminio

En la industria del **aluminio**, el hidrógeno limpio presenta un potencial como una alternativa viable para la generación de energía térmica, especialmente para mitigar las emisiones directas asociadas a los procesos de baja y alta temperatura utilizados en la refinación de alúmina y la fundición (refino) del aluminio. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, para la generación de calor industrial, el hidrógeno limpio no se considera un reemplazo directo del gas natural. Por lo tanto, es necesario realizar estudios que se enfoquen en determinar las mezclas óptimas de hidrógeno limpio y gas en procesos específicos, así como su impacto en la eficiencia y calidad de los productos finales.

Cemento

En la industria del **cemento**, el hidrógeno limpio se muestra como una solución prometedora para reducir las emisiones en la producción de clínker. La adopción de un enfoque combinado que mejore la eficiencia térmica y utilice combustibles alternativos como la biomasa y el hidrógeno puede contribuir significativamente a disminuir la huella de carbono de esta industria. Esta tecnología tiene el potencial de reducir hasta un 50 % las emisiones de CO₂ en la producción de cemento al reemplazar una parte del carbón utilizado en los hornos de alta temperatura. Para ello será necesario realizar pruebas para estudiar la influencia del hidrógeno limpio en el proceso de combustión del clínker y evaluar la corrosión de los equipos a largo plazo y durante periodos prolongados. Los ensayos indican que uso del hidrogeno limpio podría lograr una reducción potencial de hasta 310 kgCO₂/t de clínker (MPA, 2019).

Pulpa y papel

Las principales aplicaciones del hidrógeno limpio en la industria del **papel** incluyen la generación de calor que desplazaría el consumo de gas natural para los procesos de secado papel. A medida que esta tecnología continúe evolucionando y madurando, se vislumbra un gran potencial para su implementación en ALC. Se prevé que, para el año 2030, ALC se convierta en una de las regiones más competitivas a nivel mundial en la producción de hidrógeno. Sin embargo, en el caso de la industria de la pulpa, se estima que su viabilidad actual es limitada debido a su escaso nivel de desarrollo dentro de la industria y a la competencia que enfrenta frente de otras tecnologías de descarbonización.

Captura, utilización y almacenamiento de carbono (CCUS).

En aquellos sectores en los que la descarbonización a través de la electricidad renovable aún no es técnicamente factible, el CCUS se presenta como una opción prometedora. No obstante, las empresas deben realizar una evaluación cuidadosa para determinar dónde pueden obtener el máximo retorno de su inversión en CCUS.

Acero

En la industria **siderúrgica**, se han desarrollado tecnologías maduras de CCUS que están siendo utilizadas en entornos relevantes, como la captura de CO₂ basada en la absorción química. Sin embargo, aún se requieren mejoras para alcanzar la competitividad necesaria dentro de la industria. Además, existen otras tecnologías en pleno desarrollo, como la absorción física de CO₂ y la conversión de gases residuales en productos químicos. Estas tecnologías se encuentran en etapas de prototipo y tienen un potencial de implementación a largo plazo¹⁵.

Aluminio

En el sector del **aluminio**, la CCUS podría ser empleada para reducir las emisiones derivadas del refinado de alúmina y la fundición de aluminio. Sin embargo, su aplicabilidad en la fundición se cuestiona debido a la baja concentración de CO₂ liberada por unidad de volumen, que es inferior al 1% (IEA, 2022). Las aplicaciones de CCUS que muestran un rendimiento óptimo suelen encontrarse en industrias con concentraciones de CO₂ significativamente más elevadas, generalmente superiores al 4%. Además, se estima que la adopción de la CCUS podría incrementar los costos de producción en un 40% (WEF, 2022). En este contexto, se concluye que la CCUS actualmente no se presenta como una solución viable para la industria del aluminio.

¹⁵ <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide?selectedSector=Iron+and+steel>

Cemento

Para la industria del **cemento**, se están explorando diversas tecnologías de CCUS, pero es importante tener en cuenta que algunas de estas tecnologías, a pesar de tener como objetivo la reducción de emisiones, pueden incrementar significativamente el consumo de energía y las emisiones indirectas de la industria. Por lo tanto, es fundamental considerar la demanda de energía neutral en carbono, en el costo de esta energía y los ingresos generados por los productos de CCUS para determinar la viabilidad económica y técnica de esta tecnología.

Grupos industriales

Los clústeres industriales ofrecen una serie de beneficios para impulsar soluciones de bajo carbono al reunir la demanda y ubicar conjuntamente la oferta y la demanda. Esto reduce la necesidad de infraestructuras de transporte y almacenamiento a larga distancia, además de ubicar emplazamientos compartidos que en tecnologías nuevas, como el hidrógeno limpio y su cadena de valor, pueden focalizar los riesgos y posibles impactos acumulativos e indirectos, enmarcando su desarrollo con políticas ambientales y sociales específicas (Signoria, 2023).



Cada vez se reconoce más la importancia de los clústeres industriales, como se evidencia en la participación de tres clústeres globales (de Australia, Reino Unido y España) que inicialmente firmaron la iniciativa global del Foro Económico Mundial, “Transición de clústeres industriales hacia cero emisiones netas”, emprendida en colaboración con el Instituto de Investigaciones de Energía Eléctrica (EPRI).

Iniciativas como esta podrían proporcionar un modelo de cómo los actores de la industria pesada en todo el mundo pueden integrarse y formar grupos industriales.

Un ejemplo destacado de colaboración industrial es la Alianza para la Descarbonización de la Industria lanzada por la Agencia Internacional de Energías Renovables (IRENA), en conjunto con Siemens Energy y otras 13 empresas, bancos de desarrollo de todo el mundo y otros actores relevantes. Esta alianza tiene como objetivo acelerar la descarbonización de las cadenas de valor industriales en sectores que demandan una gran cantidad de energía, y así lograr ambiciones de emisiones netas cero en línea con los objetivos del Acuerdo de París. La Alianza se lanzó oficialmente con la adopción de la Declaración de Bali en el Foro de Inversión sobre Transiciones Energéticas de IRENA en Indonesia en 2022.

La Alianza sirve como una plataforma de múltiples partes interesadas para acelerar la acción climática global a través del diálogo y la colaboración.

La estrategia adoptada por cada grupo industrial será única, ya que estará influenciada por diversos factores como la ubicación geográfica, la composición de la industria y el acceso a recursos estratégicos. Estos elementos determinarán la selección de tecnologías, la viabilidad y los costos de implementación en cada caso. Además, si bien un clúster industrial puede centrarse en la implementación de nuevas tecnologías, también se requiere un fuerte respaldo en términos de políticas, incentivos y apoyo financiero. Lo que es más importante, los socios del clúster deben generar confianza y desarrollar modelos comerciales que faciliten la distribución de riesgos y beneficien a todos los miembros.

Electricidad en base a energías renovables

La adopción de electricidad proveniente de fuentes renovables representa una oportunidad para reducir las emisiones en la industria pesada, especialmente en los procesos que requieren calor y vapor a altas temperaturas. En ALC, el acceso a electricidad renovable a bajo costo (aproximadamente 20-30 USD por MWh) brinda una ventaja competitiva para la producción de **acero** libre de emisiones (IEA, 2020). Dentro de las opciones de generación de electricidad, la energía hidroeléctrica, la energía geotérmica y los sistemas híbridos que combinan la producción variable de electricidad con almacenamiento ofrecen una mayor estabilidad y control de las operaciones en la industria pesada. Estas tecnologías son especialmente relevantes en procesos como la electrólisis en la producción de **aluminio** y el funcionamiento de los EAF en la industria del **acero**, que demandan un consumo intensivo de energía eléctrica las 24 horas del día.

Desde el punto de vista de la demanda en la industria del **cemento**, se puede adoptar un enfoque de molienda flexible para la producción de harina cruda y cemento, lo cual contribuiría a estabilizar el sistema de transmisión eléctrica al ajustar los tiempos de operación de los procesos intensivos en consumo de energía. La gestión de los silos y las capacidades de producción podrían operar de manera similar a un sistema de almacenamiento de energía, permitiendo una utilización más eficiente del exceso de energía renovable. En esta industria se estima que la introducción de energías en base a fuentes renovables podría reducir las emisiones indirectas de carbono en un rango de 1 a 8 kgCO₂/t cemento.

Uso de chatarra o reciclado

El uso de chatarra o reciclado evita realizar todos los procesos para la obtención de producción primaria de acero, cemento, aluminio, pulpa y papel. En el caso de la industria del **aluminio**, se estima que alcanzar una tasa de reciclaje del 100 % en la región de ALC podría reducir las emisiones hasta en un 19 %. Esto implica desplazar la producción primaria de aluminio en aproximadamente 510 mil tAl/año. Por otro lado, en la industria **siderúrgica**, la adopción de la ruta de EAF basada en chatarra permite una reducción de hasta un 71 % en las emisiones en comparación con la ruta del BOF (estudio de CRU preparado para uso interno de Alacero, 2022).



En la industria del **cemento**, también se han desarrollado múltiples procesos para el reciclaje del hormigón. Uno de estos procesos implica el reciclaje para producir finos de hormigón triturado (tamaño de grano de 0 - 4 mm), que representa alrededor del 40 % de la cantidad total reciclada (Nedeljković et al., 2021). A partir de estos finos, se puede recuperar el óxido de calcio (CaO), que luego se utiliza en hornos de cemento como reemplazo parcial de los insumos de piedra caliza (CaCO₃) (Worrell, 2004). Esta práctica no solo reduce las emisiones del proceso, sino que también se puede utilizar como relleno en cementos adicionados. El reciclado del hormigón produce polvo de cemento que se puede emplear como sustituto del fundente de cal en la fabricación de acero y como material cementicio suplementario en la producción de clínker¹⁶.

El reciclaje de la **pulpa y el papel** ofrece una significativa reducción potencial en el consumo de energía. La producción de pulpa reciclada puede ahorrar entre un 30 % y 70 % de energía, dependiendo de la calidad y rendimiento final de la pulpa, la maquinaria instalada y los procesos que reemplaza en comparación con la producción de pulpa virgen (Rahnama et al., 2021; Moya y Pavel, 2018; Kramer et al., 2009). El ciclo de producción de pulpa reciclada se basa en un mínimo aporte de fibra virgen. A medida que se suceden los procesos de reciclaje, la fibra de celulosa se deteriora, lo que resulta en una pérdida entre el 10 % y 20 % del volumen total de papel recuperado.

¹⁶ <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/etp-clean-energy-technology-guide?selectedSector=Cement+and+concrete>

Eficiencia energética

Se han desarrollado tecnologías probadas de alto desempeño energético que tienen el potencial de disminuir el consumo en un rango significativo, entre un 10 % y 20 %. La implementación de nuevas tecnologías y equipos es solo una parte de la ecuación. Las inversiones en eficiencia energética también pueden enfocarse en realizar cambios operativos y optimizar los procesos existentes. Aunque es importante tener en cuenta que la eficiencia energética no puede lograr una descarbonización completa del sector, su adopción se presenta como una de las medidas más rentables para desvincular la relación directamente proporcional entre la creciente demanda de acero, cemento, aluminio, pulpa y papel, y el consumo de energía asociado a su producción.

En la industria del **acero**, se podría mejorar la eficiencia energética mediante la adopción de las mejores tecnologías disponibles y acciones de mejora en el proceso productivo aumentando el desempeño con menos recursos. Según estimaciones de la IEA, esta actualización podría lograr mejoras significativas de hasta un 20 % en las tecnologías de producción de acero (2021).

La industria del **aluminio** ha demostrado su compromiso con la búsqueda constante de tecnologías innovadoras para reducir los costos asociados al consumo de energía e incrementar sus rendimientos. Una de estas tecnologías es la digestión por tubos, que presenta un potencial significativo para reducir el consumo energético en hasta un 15 %¹⁷. Otra tecnología clave es la calcinación de alúmina en lecho fluido, que ha demostrado una reducción sustancial del 40 % en el consumo de energía (Klett et al., 2011). Además, se ha explorado la aplicación de la compensación magnética en el proceso de electrólisis, que podría reducir entre 10 % y 15 % la demanda de electricidad (Zhang et al., 2016).

La industria del **cemento** se beneficia de una serie de medidas de eficiencia energética que abarcan desde el control avanzado de plantas hasta sistemas de control compatibles con inteligencia artificial. Estas medidas también incluyen la gestión de energía, la optimización de la distribución del tamaño de partícula (PSD), la molienda separada de los componentes de la materia prima y la optimización del funcionamiento de los molinos. Además, se utilizan separadores de alta eficiencia y se realiza un uso óptimo de los auxiliares de molienda, entre otras estrategias. En cuanto a la mejora de la eficiencia térmica, se implementan medidas como el aumento de la capacidad de los hornos, la mejora de la capacidad de combustión de la mezcla cruda, la recuperación del calor residual y la adopción de enfriadores de clínker altamente eficientes.

En la industria de la **pulpa y papel**, existen diversas medidas que pueden contribuir a reducir entre un 10 y 25 % el consumo de energía en los procesos. Las medidas incluyen mejoras en el proceso de digestión por lotes mediante soplado en frío, mayor eficiencia en la evaporación del licor negro, utilización de combustión enriquecida con oxígeno, optimización del proceso de refinado y aprovechamiento del calor residual, entre otras acciones clave.

¹⁷ <https://www.hatch.com/Expertise/Services-and-Technologies/Alumina-Tube-Digestion>

Para obtener un análisis más exhaustivo, se recomienda consultar los siguientes volúmenes. Estos volúmenes contienen información técnica detallada sobre la situación actual, las estrategias y las tecnologías específicas que se pueden implementar en cada industria. Invitamos al lector a explorar los informes de cada sector para obtener una comprensión más completa de las oportunidades y desafíos asociados con la descarbonización de este sector crucial.

Soluciones basadas en la naturaleza

La resolución 5/5 de la Asamblea General de las Naciones Unidas define las soluciones basadas en la naturaleza como las medidas encaminadas a proteger, conservar, restaurar, utilizar de forma sostenible y gestionar los ecosistemas terrestres, de agua dulce, costeros y marinos naturales o modificados que hacen frente a los problemas sociales, económicos y ambientales de manera eficaz y adaptativa, procurando al mismo tiempo bienestar humano, servicios ecosistémicos, resiliencia y beneficios para la biodiversidad.

En el contexto de la industria pesada y su compromiso con la sostenibilidad, es fundamental reconocer la importancia de transformar los procesos industriales para facilitar su descarbonización. Instituciones como el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), la Comisión Europea, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC) y el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) han resaltado las soluciones basadas en la naturaleza como medios efectivos para combatir el cambio climático y preservar la biodiversidad. Estas soluciones, si bien son vitales, deben complementarse con una transformación directa en los procesos industriales.

La adopción de tecnologías bajas en emisiones de carbono en la industria pesada no es solo una cuestión de mejora ambiental, sino también una necesidad estratégica para el avance hacia una economía más sostenible y resiliente. No obstante, el impacto de las soluciones basadas en la naturaleza puede ser limitado si no se acompañan de cambios directos en los procesos industriales que contribuyen a las emisiones de carbono. Esto no significa descartar el apoyo de esta medida, sino más bien enfatizar la necesidad de una acción equilibrada que aborde tanto la mitigación directa a través de la innovación tecnológica como la conservación y restauración ambiental.

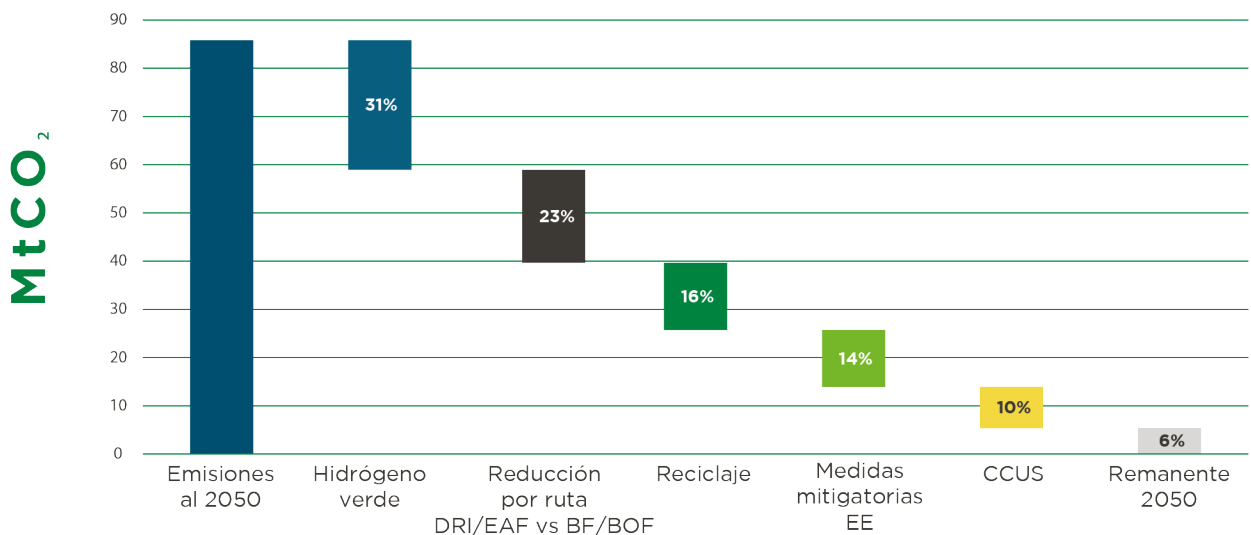
B. Desglose de la participación tecnológica en la mitigación de emisiones

Teniendo en cuenta las diversas condiciones presentes en la región de ALC, se llevaron a cabo estimaciones sobre el impacto potencial de diversas medidas para reducir las emisiones totales de carbono de la industria pesada.

Acero

En el caso de los principales conglomerados de producción de acero, el análisis representado en el gráfico a continuación ilustra cómo la adopción del hidrógeno, la sustitución de la ruta BF/BOF por la ruta de producción de acero DRI/EAF, y el reciclaje, entre otras medidas, desempeñan un papel clave en la reducción de las emisiones directas e indirectas de la industria del acero.

Figura 16. Portafolio tecnológico para la descarbonización de la siderúrgica al 2050



Fuente: Elaboración propia con base a datos de E3G (2021)

Un enfoque prometedor radica en la utilización de hidrógeno en los altos hornos para la producción de **acero**. Se prevé que la región pueda acceder a hidrógeno a precios inferiores a la media global. Específicamente, las sinergias entre el hidrógeno y las fuentes de energía renovable pueden establecer las condiciones propicias para el despliegue de esta tecnología en los centros industriales siderúrgicos. Gracias al elevado factor de planta de la energía solar y eólica en la región, los países cuentan con la oportunidad de generar hidrógeno limpio y bajo en emisiones a precios competitivos. En conjunto, estas medidas podrían tener un impacto significativo en la mitigación de emisiones, estimándose alrededor del 31 % de reducción.

Además, el incremento del reciclaje de chatarra en la región también tiene un significativo potencial para la reducción de emisiones en la producción de **acero**. Se estima que el uso de chatarra puede disminuir hasta un 50 % las emisiones en los procesos primarios de fabricación del acero, lo que equivale a aproximadamente un 16 % de mitigación de emisiones en toda la cadena productiva. Asimismo, la implementación de medidas de eficiencia energética presenta un gran potencial para reducir las emisiones de carbono y avanzar hacia el objetivo de alcanzar emisiones cero para el año 2050. Estas medidas, además de ser de bajo costo de inversión, tienen la capacidad de lograr una disminución del 14 % en las emisiones de esta industria.

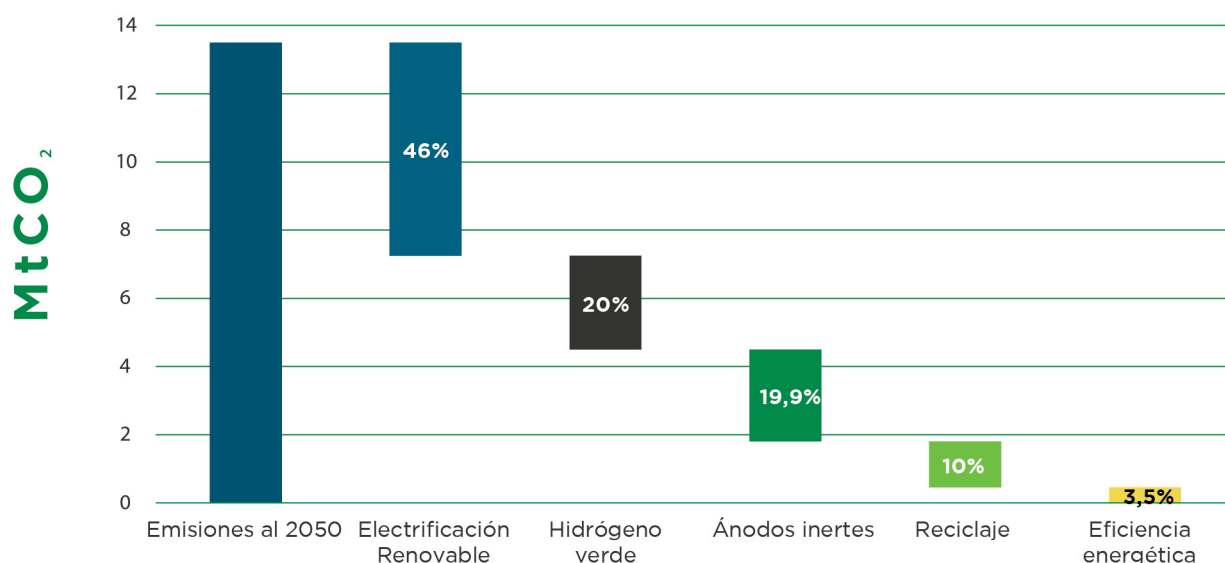


También se consideran soluciones tecnológicas como CCUS. Sin embargo, la adopción de estas tecnologías enfrenta desafíos debido a las altas inversiones de capital y costos operativos, así como al nivel intermedio de madurez de las tecnologías que agregan barreras para su adopción acelerada requiere un seguimiento constante de su desarrollo. Se estima que estas soluciones podrían tener un impacto cercano al 10 %.

Aluminio

En lo que respecta a la industria del **aluminio**, la electrificación con fuentes renovables de energía, el uso de hidrógeno limpio y la implementación de tecnologías emergentes, como el reemplazo de ánodos inertes, presentan un gran potencial para reducir las emisiones en los procesos de producción de aluminio. La figura siguiente ilustra el impacto potencial de las tecnologías analizadas en la neutralización de las emisiones de esta industria.

Figura 17. Portafolio tecnológico para la descarbonización del aluminio al 2050



Fuente: Elaboración propia.

La descarbonización de la generación eléctrica y la transición del consumo de combustibles fósiles hacia fuentes de energía renovable representan un aspecto fundamental para abordar los esfuerzos de reducción de emisiones en la industria del aluminio. La región cuenta con un potencial significativo para generar electricidad a partir de fuentes renovables a precios competitivos. Se estima que esta transición hacia la energía renovable puede tener un impacto del 46 % en la mitigación de emisiones de la industria.

En la figura anterior se observa que el hidrógeno limpio, por sí solo y sin combinarse con otra tecnología, presenta el mayor potencial para reducir las emisiones de la industria del aluminio. Aunque en algunas etapas de producción del hidrógeno limpio se encuentran en desarrollo de prototipo, se ha evidenciado un aumento de experiencias exitosas entre los principales actores del sector.

La producción de calor necesaria para la refinación de alúmina, que actualmente depende en gran medida de combustibles fósiles, puede descarbonizarse mediante la adopción de hidrógeno limpio y combustibles derivados de residuos. Aunque estas tecnologías plantean desafíos, como el costo elevado de producción de hidrógeno limpio, su implementación puede contribuir a reducir aproximadamente un 20 % del total de las emisiones.

En un siguiente nivel de importancia, los ánodos de carbono desempeñan un papel significativo en la producción de CO₂ durante su degradación. Por lo tanto, su sustitución por ánodos inertes genera una reducción notable de las emisiones, estimada en aproximadamente un 20 %.

Fomentar una economía circular centrada en el reciclaje de aluminio contribuiría a desplazar la producción de aluminio primario y reducir al menos un 10 % de las emisiones. Aunque las cifras actuales indican que la tasa de reciclaje en ALC alcanza un promedio del 80 %, se presume que estas estimaciones podrían estar sobreestimadas debido a algunas deficiencias en los registros aduaneros. Esto sugiere que el potencial de reducción de emisiones podría ser considerablemente mayor. Por último, la mejora de la eficiencia energética de los procesos implica la implementación de un conjunto de medidas que son relativamente fáciles de adoptar y tienen un bajo costo. La aplicación de tecnologías como la digestión por tubos, la calcinación en lecho fluido y la compensación magnética puede aumentar la eficiencia de los procesos y, en conjunto, reducir aproximadamente un 4 % del total de las emisiones de la industria.

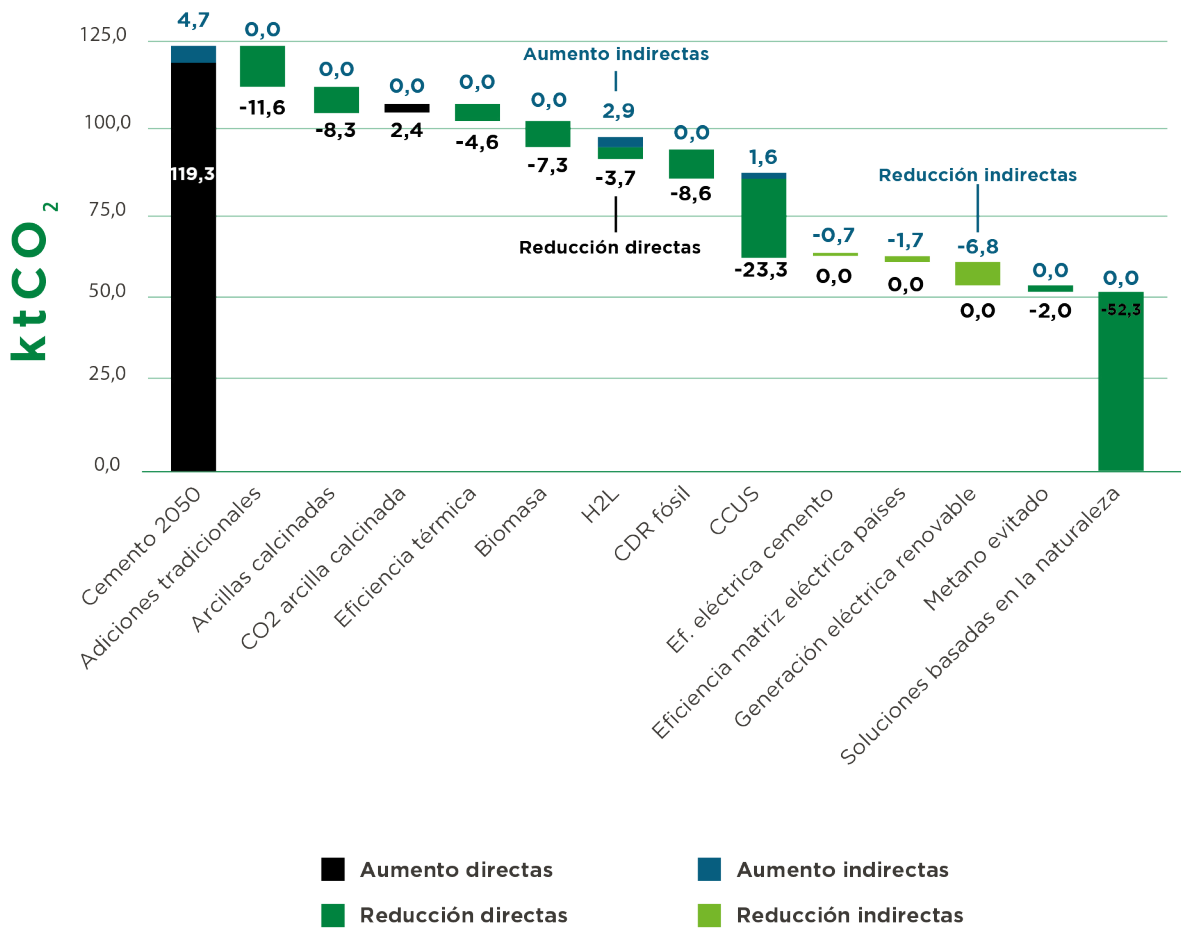


Cemento

Las trayectorias propuestas para la descarbonización de la industria del **cemento** se enfocan en las emisiones de CO₂ generadas a lo largo de todo su ciclo de vida. Este enfoque integral abarca todas las etapas, desde la fabricación inicial del cemento, su utilización en la producción de concreto, su implementación en proyectos de construcción, hasta la descarbonatación que ocurre durante su uso. La siguiente figura ilustra las medidas necesarias para lograr la mitigación de emisiones en esta industria hasta el año 2050.



Figura 18. Portafolio tecnológico para la descarbonización de las cementeras al 2050



Fuente: FICEM, 2023

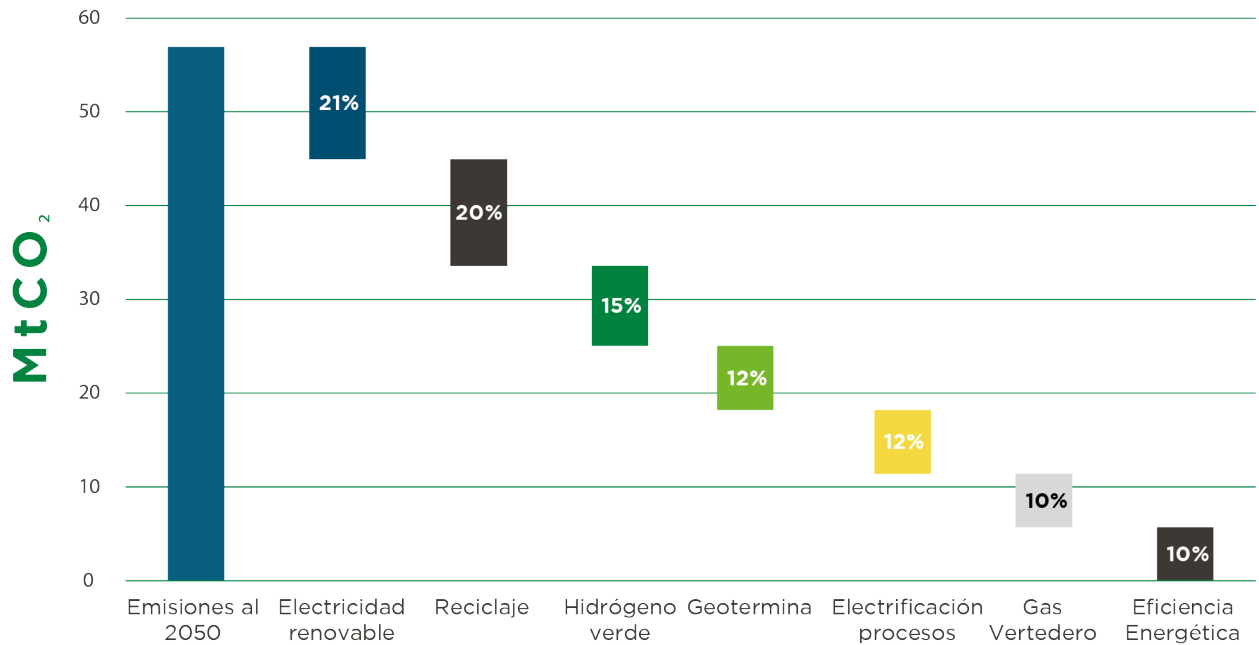
Del conjunto de medidas de descarbonización, la reducción de emisiones directas abarca una amplia gama de enfoques, que van desde la adopción de combustibles alternativos, como el hidrógeno limpio, biomasa y combustibles derivados de residuos (CDR), principalmente de origen fósil, hasta la mejora de la eficiencia térmica de los hornos. Además, se considera el uso de materiales cementicios suplementarios, como arcillas calcinadas y adiciones tradicionales (ceniza, escoria y caliza). La CCUS también se plantea como una estrategia. Asimismo, se incluyen soluciones basadas en la naturaleza que traerían un impacto significativo en la reducción de emisiones, con un 40% de participación (52,3 ktCO₂) respecto al total, seguido del CCUS con 18% de participación (23,3 ktCO₂).

El consumo eléctrico desempeña un 'papel' fundamental en una planta de cemento, especialmente en el proceso de molienda. En este contexto, la reducción de emisiones indirectas se abordará mediante la implementación de medidas destinadas a mejorar la eficiencia tanto en la producción de cemento como en las fuentes de generación de energía de los países. Además, cobra gran relevancia el aumento del suministro de energía renovable no convencional con emisiones neutras de carbono. En conjunto estas medidas traerían una reducción del 7% (9,2 ktCO₂), respecto a las emisiones totales de la industria.

Pulpa y papel

La industria de la **pulpa y el papel** cuenta con las condiciones necesarias para implementar medidas que permitan una rápida descarbonización. Su potencial de mitigación, estimado en 56,9 MtCO₂ en emisiones totales, se ve reflejado en la variedad de tecnologías disponibles y sus múltiples aplicaciones en los procesos industriales. En el contexto de la producción de pulpa, la electrificación mediante fuentes de energía renovable representa el factor más significativo, contribuyendo con un 21% de reducción en las emisiones totales y logrando una reducción del 100% en las emisiones alcance 2. El resto de las medidas de mitigación (alcance 1), tienen el potencial de reducir en 79 % las emisiones totales de la industria primaria en la región (ITBA,2022). De este conjunto, destaca la importancia del reciclaje de papel y cartón, ya que posibilita la obtención de pulpa a partir de fibras recuperadas, lo que tiene el potencial de reducir las emisiones directas en un 20%. Otras tecnologías como el hidrógeno limpio y la geotermia desempeñarían un papel importante en la reducción de emisiones, tal como se muestra en la figura siguiente (ITBA, 2022).

Figura 19. Portafolio tecnológico para la descarbonización de la pulpa al 2050



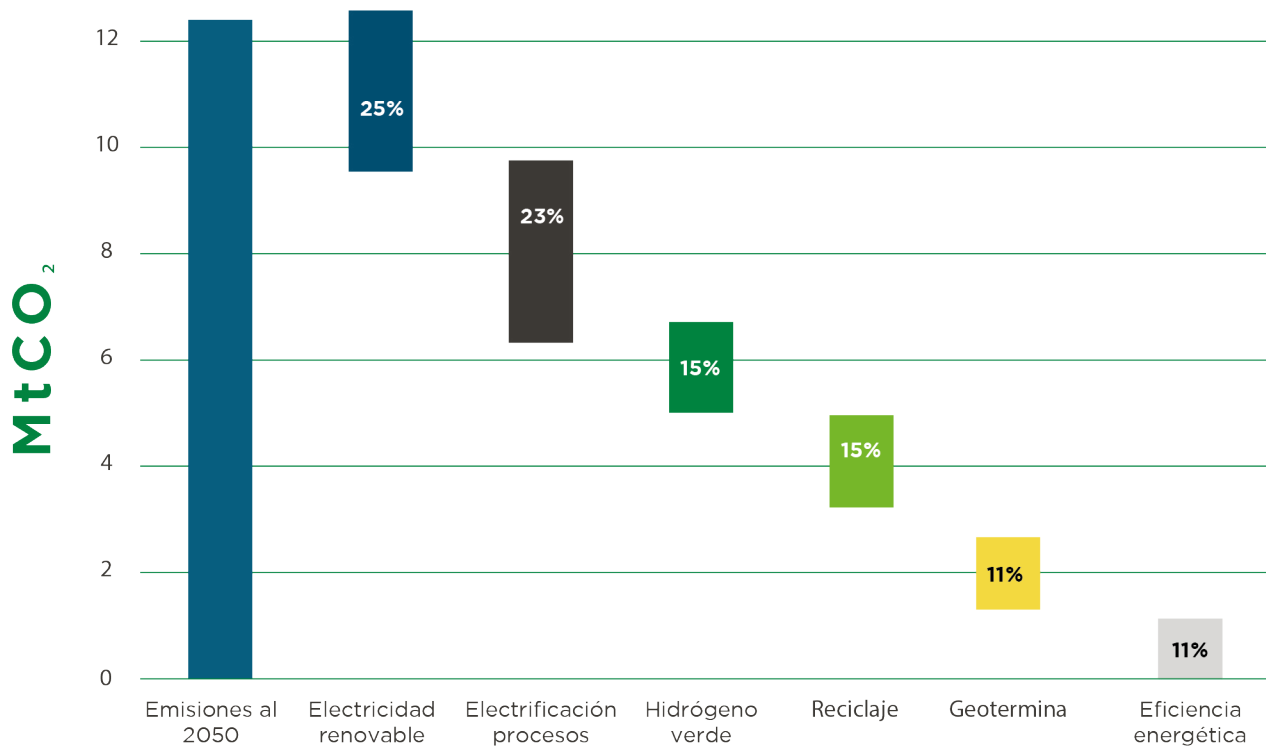
Fuente: Elaboración propia en ITBA (2022).

No obstante, se ha observado que la implementación del hidrógeno limpio en la industria de la pulpa puede ser limitado en la actualidad, debido a su nivel de desarrollo y competitividad relativamente bajos en comparación con otras tecnologías de descarbonización ya establecidas en el mercado. Sin embargo, es esencial tener en cuenta que el panorama podría evolucionar de manera favorable en el futuro, lo que no descarta su contribución a la mitigación de emisiones para el año 2050.

En lo que respecta a la industria del papel, la electrificación de los procesos emerge como la estrategia más efectiva, contribuyendo a reducir hasta un 23 % las emisiones de alcance 1, mientras que las emisiones alcance dos serían abatidas mediante la electrificación con fuentes de energía renovable. Además de esta medida, el uso de gas producido a partir de residuos de la industria y la implementación del hidrógeno limpio también son acciones clave que permiten una disminución significativa de las emisiones (ITBA,2022). A nivel mundial existen proyectos piloto que están validando el uso del hidrógeno en la industria papelera, como es el caso de la empresa alemana de higiene y salud Essity, que lanzó un proyecto para hacer funcionar la campana de secado de papel con hidrógeno limpio en las instalaciones de producción de Mainz-Kostheim¹⁸.

¹⁸ <https://www.essity.com/media/press-release/essity-launches-green-hydrogen-pilot-for-co-2-free-tissue-production/9259da573b0f34bf/>

Portafolio tecnológico para la descarbonización de las papeleras al 2050



Fuente: Elaboración propia en ITBA (2022).

III. Recomendaciones y reflexiones de política pública

Esta sección se centra en la exploración y presentación de tecnologías de vanguardia, reconocidas por su potencial para mitigar las emisiones de carbono, se analiza la viabilidad de estas tecnologías en los sectores de producción de acero, aluminio, cemento y pulpa y papel, brindando ejemplos concretos de su implementación y los beneficios tangibles que conllevan. Cada una de estas tecnologías, ya sea mediante la utilización del hidrógeno, la captura y almacenamiento de carbono, la generación de electricidad renovable, la reutilización de materiales o el aumento de la eficiencia energética, desempeña un papel crucial en el amplio y variado abanico de soluciones posibles para la descarbonización.

Asimismo, se señalan breves recomendaciones para los encargados de crear políticas públicas con el objetivo de generar las condiciones que permitan implementar esa tecnología y lograr la descarbonización de la industria pesada en ALC.

Estos elementos conforman trayectorias de descarbonización que resultan esenciales para lograr los objetivos de mitigación del cambio climático en el ámbito industrial, al adaptarse a las características propias de cada sector.

Los encargados de crear políticas públicas desempeñan un papel fundamental en el desarrollo de rutas de descarbonización para la industria pesada, pues mediante la puesta en marcha de marcos regulatorios, incentivos y estrategias es posible impulsar la transición hacia prácticas industriales bajas en carbono, propiciar el crecimiento económico y la sostenibilidad ambiental, coadyuvando a lograr compromisos nacionales e internacionales e impulsar la innovación tecnológica en las industrias pesadas.

Asimismo, procurar la transición a procesos industriales bajos en carbono desde la política pública puede procurar el progreso de la competitividad de las industrias de la región el mercado global y por tanto promover el crecimiento económico. En adición a lo anterior, debe considerarse que colaborar a la reducción de las emisiones de carbono en la industria pesada implica aumentar la eficiencia energética y diversificar las fuentes de energía, lo que tiene como cobeneficio mejorar la seguridad energética al reducir la dependencia de los combustibles fósiles y las cadenas de suministro vulnerables, al mismo tiempo que se crean nuevas oportunidades de empleo.



Por otra parte, los formuladores de políticas públicas pueden establecer regulaciones e incentivos que alienten a la industria pesada a reducir su huella de carbono, que equilibren los compromisos internacionales con las necesidades económicas e industriales.

Asimismo, es fundamental que la descarbonización y el proceso de transición energética sean justos, respetando la heterogeneidad de la región y la manteniendo la competitividad de la industria.

Finalmente, es importante mencionar que, a medida que el cambio climático continúa planteando riesgos para la infraestructura y las cadenas de suministro, comprender los caminos para descarbonizar la industria pesada puede contribuir a construir sistemas más resilientes y mejor preparados para resistir los impactos de un clima cambiante. En este contexto, se presentan las siguientes recomendaciones para los encargados de crear políticas públicas para procurar la descarbonización la industria pesada en ALC:

Figura 21. Herramientas de política pública para la descarbonización de la industria pesada



Fuente: Elaboración propia.

A. Estrategias, planes y programas

Se considera recomendable el desarrollo de estrategias, planes y programas nacionales de descarbonización como herramientas de política pública capaces de proveer de un enfoque coordinado y coherente, que incluyan todos los temas tratados en el presente apartado, garantizando así que los esfuerzos estén alineados en todos los niveles e instancias de gobierno, evitando ineficiencias y proporcionando metas claras y cuantificables que permitan medir el progreso y responsabilizar a las partes interesadas.

Figura 22. Estrategias, planes y programas para la descarbonización de la industria pesada



Fuente: Elaboración propia.

B. Marcos regulatorios

Los marcos regulatorios son una piedra angular de las políticas públicas para acelerar los esfuerzos de descarbonización al proveer claridad, coherencia y previsibilidad a largo plazo al definir las expectativas y requisitos legales para la reducción de emisiones, que permiten a los inversionistas tomar decisiones informadas, en el contexto de proyectos de descarbonización que a menudo pueden tomar años para su implementación.

Los marcos normativos específicos para la industria pesada son fundamentales para promover la reducción de emisiones de carbono y la adopción de tecnologías más limpias. Estas regulaciones son esenciales para crear un entorno propicio que incentive la inversión en proyectos de descarbonización en este sector particular. Los inversionistas que consideran financiar proyectos en la industria pesada buscan, ante todo, estabilidad y certidumbre regulatoria.

En este contexto, es oportuno establecer estándares de emisiones para industrias pesadas, límites a las emisiones GEI y requisitos de monitoreo para asegurar su cumplimiento. Igualmente, diseñar regulación que tome en cuenta mejores prácticas a nivel internacional que evite emisiones brutas y permitan lograr la transición a tecnologías libres de carbono.

Se consideran de particular importancia alinear a las rutas de descarbonización las siguientes regulaciones:

- Códigos de construcción
- Lineamientos de adquisiciones públicas
- Incentivos de reciclaje en la infraestructura
- Reconocimiento para productos bajos en carbono
- Considerar procesos sumarios para las autorizaciones, permisos y licencias necesarias para la actualización de plantas e instalación de nuevas plantas que se realicen con el objetivo de acelerar la descarbonización, así como para la construcción de proyectos de generación de energía limpia

Figura 23. Marcos regulatorios para la descarbonización de la industria pesada



Fuente: Elaboración propia.

C. Incentivos económicos

Se estima conveniente institucionalizar programas de financiamiento, deducciones fiscales y subsidios para inversiones y adopción de tecnologías y procesos bajos en emisiones de carbono, así como implementar mecanismos de precio del carbono acercándolo a las estimaciones del costo social, como impuestos al carbono o sistemas de límites máximos y comercio, para internalizar el costo de las emisiones permitiendo la competitividad frente a mercados internacionales y mitigando el riesgo de fugas de carbono¹⁹. Asimismo, deben considerarse incentivos que faciliten las inversiones y tarifas competitivas en energía eléctrica, hidrógeno limpio y biomasa, así como la financiación pública y privada para impulsar el salto tecnológico que se necesita para alcanzar la descarbonización de la industria pesada en ALC.

¹⁹ La fuga de carbono se refiere a la situación en la que, debido a las políticas públicas impuestas en un país, la generación de CO₂ disminuye en ese país para emitirse en otro, debido a la ausencia de dichas medidas.

Figura 24. Incentivos económicos para la descarbonización de la industria pesada



Fuente: Elaboración propia.

D. Investigación y educación

La educación y la investigación sustentan la base del cambio sostenible al fomentar la innovación, el intercambio de conocimientos y el desarrollo de habilidades, conduciendo al descubrimiento y perfeccionamiento de tecnologías de vanguardia que pueden reducir las emisiones de las industrias pesadas. El enfoque científico en las políticas públicas garantiza que los objetivos sean realistas, las medidas efectivas y adaptables en un panorama en rápida evolución. Por ello, es preciso implementar políticas públicas tendientes al financiamiento de iniciativas de investigación y desarrollo centradas en energía, materiales y procesos industriales limpios, así como para apoyar proyectos piloto que demuestren la viabilidad y eficacia de nuevas tecnologías de descarbonización.

Por su parte, el papel de la educación está en el desarrollo de una fuerza laboral capacitada y capaz de implementar tecnologías y prácticas de descarbonización.

En el mismo sentido, deben crearse programas de capacitación y asignar recursos para ayudar a los profesionales de la industria a adquirir las habilidades y conocimientos necesarios para los esfuerzos de descarbonización. De igual modo, deben crearse campañas de concientización sobre la importancia de la descarbonización de la industria pesada y los beneficios de las tecnologías bajas en carbono.

Figura 25. Investigación y educación para la descarbonización de la industria pesada



Fuente: Elaboración propia.

E. Mecanismos de financiamiento y mitigación de riesgos

Para lograr una descarbonización efectiva, el financiamiento debe adoptar un enfoque integral que combine diversos elementos clave (Kashyap & Sen, 2022; WEF, 2022); la innovación en tecnologías de descarbonización a menudo conlleva incertidumbre, procesos lentos de implementación y riesgos, por lo que es importante contar con mecanismos financieros que mitiguen estos riesgos y fomenten la adopción de soluciones sostenibles.

Para estos proyectos, el acceso a financiamiento de bajo costo con condiciones preferenciales que permitan reducir sus riesgos e invertir en proyectos a largo plazo sin la presión de obtener retornos inmediatos será clave, pues la descarbonización requiere de inversiones iniciales significativas, percibidas como de alto riesgo y con un período prolongado para alcanzar la rentabilidad.

Asimismo, como parte de ese financiamiento, será fundamental brindar asistencia técnica a los proyectos con el fin de crear el conocimiento y las capacidades necesarias para preparar los proyectos, identificar las tecnologías más adecuadas y evaluar su viabilidad técnica y económica.

Será también importante considerar el apoyo en la etapa de implementación para asegurar que los proyectos se lleven a cabo de manera eficiente y efectiva. Esto puede incluir asistencia técnica adicional, seguimiento y monitoreo, así como el desarrollo de

un ecosistema industrial más amplio para fortalecer la colaboración entre diferentes actores, sinergias entre empresas, gobiernos, instituciones financieras, entre otros, para crear un entorno propicio para la adopción generalizada de tecnologías, prácticas y procesos bajos en emisiones de carbono a lo largo de la cadena de valor de la industria.

Para materializar los proyectos y lograr su financiamiento, el BID propone maneja un proceso estructurado (BID, 2022). Inicialmente, el BID recibe los fondos destinados a un programa o proyecto, basándose en un presupuesto aprobado. Estos fondos son luego transferidos a un ente ejecutor, como una agencia gubernamental o una entidad privada, encargada de implementar el programa o proyecto que evalúa y aprueba los gastos a financiar bajo el programa y que llevan a cabo los procesos de adquisición y pagan a los proveedores de bienes y servicios.

Las ganancias derivadas de la implementación de las actividades del programa o proyecto son retenidas, siendo luego transferidas a un fondo común para su reinversión en el programa o proyecto o pago de préstamos.

Finalmente, se presentan informes financieros periódicos que muestran la ejecución física y financiera del programa.

Este enfoque que el BID ha implementado en la gestión de fondos se complementa con la utilización de financiamiento mixto, una estrategia que combina recursos de diversas fuentes, incluidos fondos públicos y privados, para maximizar el impacto de las inversiones en proyectos de desarrollo sostenible. Este modelo de financiamiento permite aprovechar tanto la inversión directa como los distintos fondos climáticos disponibles, como el Fondo Verde para el Clima (GCF, por sus siglas en inglés), el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) o los Fondos de Tecnología Limpia - Inversión Climática (CTF - CIF, por sus siglas en inglés). Estos fondos ofrecen recursos adicionales y apoyo técnico, aumentando la escala y eficiencia de los proyectos de descarbonización. La articulación de estas fuentes de financiamiento refuerza la colaboración entre el sector público y privado que articula el BID, y subraya la importancia de la sinergia entre diferentes actores para lograr los objetivos de reducción de emisiones de carbono.

Figura 26. Esquema general de mecanismos de financiamiento y mitigación de riesgos para la descarbonización de la industria pesada

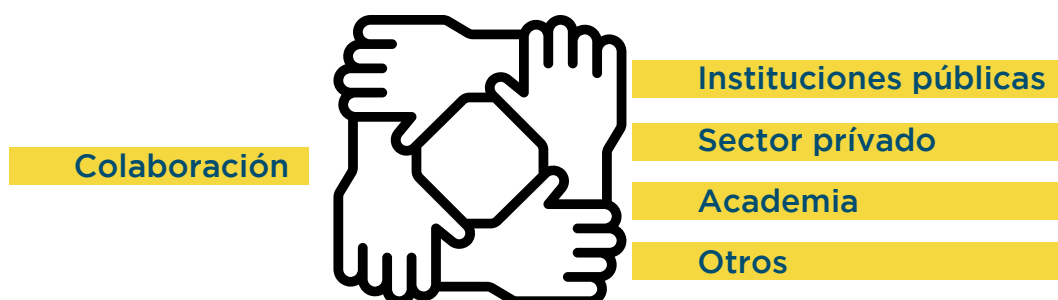


Fuente: Elaboración propia.

F. Marcos de colaboración

Considerar un marco de colaboración que involucre a la industria, el gobierno y la academia es vital para la descarbonización de la industria pesada, siendo apropiada la formación de un Comité que integre la experiencia de diversos sectores para lograr un enfoque integral para abordar los desafíos de la descarbonización. Este esfuerzo colaborativo aprovecharía el conocimiento de la industria, las políticas gubernamentales y la investigación académica para crear soluciones efectivas y sostenibles en el largo plazo. La participación del gobierno garantiza la alineación regulatoria y la implementación de políticas de apoyo, mientras que el mundo académico contribuye con investigación e innovación de vanguardia. En conjunto, esta colaboración tripartita fomenta una estrategia dinámica y completa, que reúne conocimientos, recursos y marcos regulatorios necesarios para acelerar la transición hacia una industria pesada con bajas emisiones de carbono.

Figura 27. Marcos de colaboración para la descarbonización de la industria pesada



Fuente: Elaboración propia.

La existencia de políticas claras y consistentes relacionadas con la descarbonización es un factor determinante para atraer inversiones y fomentar la transformación hacia prácticas más sostenibles en la industria pesada. Asimismo, la planificación a nivel sectorial y climático es crucial para coordinar esfuerzos y recursos. Los gobiernos y las industrias deben colaborar en la definición de metas y estrategias de descarbonización a largo plazo. Esto implica identificar oportunidades de inversión, evaluar riesgos y considerar la adaptación a los cambios climáticos. La planificación climática también puede ayudar a garantizar que las inversiones estén alineadas con los objetivos de reducción de emisiones a nivel nacional e internacional.

IV. Referencias

BID (2023). El BID aprueba préstamo de US\$400 millones para impulsar industria de hidrógeno verde en Chile. <https://www.iadb.org/es/noticias/el-bid-aprueba-prestamo-de-us400-millones-para-impulsar-industria-de-hidrogeno-verde-en>

BID (2022). Prosperidad libre de carbono Cómo los gobiernos pueden habilitar 15 transformaciones esenciales. <https://www.iadb.org/es/noticias/estudio-del-bid-propone-15-transformaciones-para-alcanzar-economias-libres-de-carbono>

BID (2019). Evolución de las emisiones de gases de efecto invernadero de energía en ALC. Hub Energía de América Latina y el Caribe. Retrieved August 14, 2023, from <https://hubenergia.org/es/indicators/evolucion-de-las-emisiones-de-gases-de-efecto-invernadero-de-energia-en-alc>

Bajpai, P. (2018). Chapter 12 - Pulping Fundamentals. In: Biermann's Handbook of Pulp and Paper. Editor(s): Pratima Bajpai. Third Edition. Pages 295-351. <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/mechanical-pulp>

Cantini, A., Leoni, L., De Carlo, F., Salvio, M., Martini, C., and Martini F. (2021). Technological Energy Efficiency Improvements in Cement Industries. Sustainability 2021, 13, 3810. <https://doi.org/10.3390/su13073810>

Cavaliere, P. (2022). Hydrogen Assisted Direct Reduction of Iron Oxides. <https://link.springer.com/book/10.1007/978-3-030-98056-6>

CEPAL (2023). Estudio Económico de América Latina y el Caribe 2023. El financiamiento de una transición sostenible: inversión para crecer y enfrentar el cambio climático. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/67989-estudio-economico-america-latina-caribe-2023-financiamiento-transicion>

CEPAL (2022). Estudio Económico de América Latina y el Caribe. Dinámica y desafíos de la inversión para impulsar una recuperación sostenible e inclusiva. <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/f221aa4c-8df5-439f-aaa4-f4b1bb5c0e82/content>

CEPI (2022). Key statistics 2021. European pulp & paper industry. Confederation of European Paper Industry (CEPI). <https://www.cepi.org/wp-content/uploads/2022/07/Key-Statistics-2021-Final.pdf>

CRU para uso interno de Alacero (2022). Implicancias para la industria latinoamericana del acero de un CBAM en UE y USA.

Donoso y Cantallopts (2021). Informe de mercado. Hierro y acero - perspectivas 2021-2022. Comisión Chilena del Cobre. <https://www.cochilco.cl/Mercado%20de%20Metales/Informe%20Mercado%20Hierro%20y%20Acero.pdf>

E3G (2021). 1.5 C Steel: Decarbonizing the Steel Sector in Paris - Compatible Pathways. Northwest Pacific Laboratories, USA. <https://www.e3g.org/publications/1-5c-steel-decarbonising-the-steel-sector-in-paris-compatible-pathways/>

FAO. (2021). FAOSTAT. Pulp and paper. Data. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). <https://www.fao.org/faostat/en/#search/pulp%20and%20paper>

FICEM (2014). Informe estadístico 2013. Federación Interamericana de Cemento (FICEM). https://ficem.org/wp-content/uploads/2021/06/00_Informe-estadistico-2019.pdf

FICEM (2017). Informe estadístico 2016. Federación Interamericana de Cemento (FICEM). <https://ficem.org/wp-content/uploads/2021/06/Portada-informe-industria-cementera-1.pdf>

FICEM (2020). Informe estadístico 2019. Federación Interamericana de Cemento (FICEM). https://ficem.org/wp-content/uploads/2021/06/00_Informe-estadistico-2019.pdf

Hasanbeigi, A., Springer C., & Shi, D. (2022). Aluminum Climate Impact. An International Benchmarking of Energy and CO2 Intensities. Global Efficiency Intelligence. Florida, United States. <https://static1.squarespace.com/static/5877e86f9de4bb8bce72105c/t/624d11ab5a37a4341fd85a6e/1649217981897/Aluminum+benchmarking+report+Feb2022+rev2.pdf>
[https://www.unido.org/sites/default/files/files/2019-05/Benchmarking %20Report %20Cement %20Sector.pdf](https://www.unido.org/sites/default/files/files/2019-05/Benchmarking%20Report%20Cement%20Sector.pdf)

IAI (2022). 2019 Life Cycle Inventory Summary by Region and Unit Process. International Aluminium Institute (IAI). South America product. <https://international-aluminium.org/resource/life-cycle-inventory-lci-data-and-environmental-metrics/>

IAI. (2022a). Primary Aluminium Smelting Power Consumption and Metallurgical Alumina Refining Fuel Consumption. International Aluminium Institute (IAI). <https://international-aluminium.org/statistics/primary-aluminium-smelting-power-consumption/>

IAI. (2022b). Greenhouse Gas Emissions Intensity - Primary Aluminium. Statistics. International Aluminium Institute (IAI). <https://international-aluminium.org/statistics/greenhouse-gas-emissions-intensity-primary-aluminium/>

ICF (2015). Study on energy efficiency and energy saving potential in industry and on possible policy mechanisms. Contract No. ENER/C3/2012-439/S12.666002. ICF Consulting Limited. https://energy.ec.europa.eu/study-energy-efficiency-and-energy-saving-potential-industry-and-possible-policy-mechanisms_en

IEA (2020). Iron and Steel Technology Roadmap. International Energy Agency (IEA). Paris <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel-technology-roadmap>

IEA. (2020). Simplified levelised cost of competing low-carbon technologies in cement production - Charts - Data & Statistics. International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/simplified-levelised-cost-of-competing-low-carbon-technologies-in-cement-production>

IEA (2021), Driving Energy Efficiency in Heavy Industries, IEA, Paris. <https://www.iea.org/articles/driving-energy-efficiency-in-heavy-industries>

IEA (2022). Iron and Steel. International Energy Agency (IEA). <https://www.iea.org/reports/iron-and-steel>

EIA. (2021). International Energy Outlook 2021. U.S. Energy Information Administration (EIA). <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/>

ITBA. (2022). Descarbonización de la industria de la pulpa y papel - LATAM. Documento en preparación para su publicación.

Inglese, J. (2023). Análisis preliminar de opciones de descarbonización de la industria del acero en América Latina y el Caribe.

Gischler, C., Daza, E., Galeano, P., Ramirez, M., & Gonzalez, J. (2023). *Unlocking Green and Just Hydrogen in Latin America and the Caribbean* (1st ed.). Inter-American Development Bank. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.18235/0004948>

Kashyap, Y. (2022). Analysis: Costs and Impacts of Low-Carbon Technologies for Steel and Cement Sectors in India. Climate Policy Initiative (CPI). <https://www.climatepolicyinitiative.org/report-summary-costs-and-impacts-of-low-carbon-technologies-for-steel-and-cement-sectors-in-india/>

Kashyap, Y., & Sen, V. (2022). Financing Steel Decarbonization. Climate Policy Initiative (CPI). <https://www.climatepolicyinitiative.org/publication/financing-steel-decarbonization/>

Klett, Cornelis & Reeb, Bernd & Missalla, Michael & Schmidt, Hans-Werner (2011). Methods to Reduce Operating Costs in Circulating Fluidized Bed Calcination. https://www.researchgate.net/publication/311895391_Methods_to_Reduce_Operating_Costs_in_Circulating_Fluidized_Bed_Calcination

Liu, Xiaoming & Zhang, Na. (2011). Utilization of Red Mud in Cement Production: A Review. Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA. 29. 1053-63. 10.1177/0734242X11407653. https://www.researchgate.net/publication/51654787_Utilization_of_Red_Mud_in_Cement_Production_A_Review

Marks, J., Kojo W., Firmento, M., Green, L., Kvande, H., Martchek, K., y Rand, S. (2006). Capítulo 4. Emisiones de la industria de los metales. 4.4 Producción primaria del aluminio. Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero. https://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/spanish/pdf/3_Volume3/V3_4_Ch4_Metal_Industry.pdf

Moya, J. A., and Pavel, C. C. (2018). Energy efficiency and GHG emissions: Prospective scenarios for the pulp and paper industry. Science for Policy report by the Joint Research Centre (JRC), the European Commission's. <https://op.europa.eu/o/opportal-service/download-handler?identifier=0575cc7f-c13a-11e8-9893-01aa75ed71a1&format=pdf&language=en&productionSystem=cellar&part=>

MPA (2019). Options for switching UK cement production sites to near zero CO2 emission fuel: Technical and financial feasibility. Summary Report. Mineral Products Association (MPA). https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/866365/Phase_2_-_MPA_-_Cement_Production_Fuel_Switching.pdf

Nedeljković, M., Visser, J., Šavija, B., Valcke, S., & Schlangen, E. (2021). Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. Journal of Building Engineering, 38, 102196. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2021.102196>

Nhuchhen, D. R., Sit, S. P., & Layzell, D. B. (2022). Decarbonization of cement production in a hydrogen economy. Applied Energy, 317, 119180. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.119180>

Nykvist, B., Maltais, A., & Olsson, O. (2020). Financing the decarbonisation of heavy industry sectors in Sweden. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35148.44160>

Olufunmilayo O., J., & Olakunle O., J. (2021). Corrosion Inhibition of Aluminium Alloy by Chemical Inhibitors: An Overview. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, 1107(1), 012170. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1107/1/012170>

Rahnama, M., Santos, M., and Kienberger T. (2021). Pulp and Paper Industry: Decarbonisation Technology Assessment to Reach CO2 Neutral Emission. An Austrian Case Study. Energies 2021, 14, 1161. <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/4/1161>

Rullifank, K., Roefinal, M., Kostanti, M., and Sartika, L. (2020). Pulp and paper industry: An overview on pulping technologies, factors, and challenges. Series: Materials Science and Engineering 845 (2020) 012005. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/845/1/012005/pdf>

Schumacher, G., and Juniper, L. (2013). Coal utilisation in the cement and concrete industries. In: The Coal Handbook: Towards Cleaner Production: Coal Utilisation. Edited by: Dave Osborne. Vol. 2. <https://www.sciencedirect.com/book/9781782421160/the-coal-handbook-towards-cleaner-production#book-info>

Signoria, C., Barlettani, M. (2023). Environmental, Health, Safety, and Social Management of Green Hydrogen in Latin America and the Caribbean. Inter-American Development Bank Environmental and Social Solutions Unit. <http://dx.doi.org/10.18235/0004888>

Silveira, N., Martins, M., Bezerra, A., and Araújo, F. (2021). Red Mud from the Aluminium Industry: Production, Characteristics, and Alternative Applications in Construction Materials. A Review. Sustainability 2021, 13, 12741. <https://doi.org/10.3390/su132212741>

- UNIDO (2014). Industrial Energy Efficiency Benchmarking Report for Cement Sector. 4 United Nations Industrial Development Organization (UNIDO). [https://www.unido.org/sites/default/files/files/2019-05/Benchmarking %20Report %20Cement %20Sector.pdf](https://www.unido.org/sites/default/files/files/2019-05/Benchmarking%20Report%20Cement%20Sector.pdf)
- USGS. (2020). Cement Statistics and Information. U.S. Geological Survey. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/cement-statistics-and-information>
- Waller, J., & Bambawale, M. (2023). Why Traditional Financing Models Won't Get You to Net Zero. ENGIE Impact. <https://www.engieimpact.com/insights/financing-models-net-zero>
- WEF (2022). The Net-Zero Industry Tracker. Aluminium Industry. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/reports/the-net-zero-industry-tracker/in-full/aluminium-industry/>
- WEF. (2022). Closing the Investment Gap: Policies to Accelerate the Net-Zero Transition. World Economic Forum (WEF). In Collaboration with Oliver Wyman. https://www.marshmcclennan.com/content/dam/mmc-web/insights/publications/2022/november/Closing_the_Investment_Gap_Policies_to_Accelerate_NetZero_Transition.pdf
- World Steel Association (2021). Sustainability Indicators 2021 report. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainability-Indicators-2021-Report.pdf>
- World Steel Association (2022). Sustainability Indicators 2022 report. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Sustainability-Indicators-2022-report.pdf>
- World Steel Association. (2023). 2023 World Steel in Figures. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/World-Steel-in-Figures-2023-4.pdf>
- Worrell, E. (2004). Cement and Energy. En C. J. Cleveland (Ed.). Encyclopedia of Energy (pp. 307-315). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B0-12-176480-X/00373-9>
- Zhang, Liang, li, Sun and Xiao (2016). Evolution of the Busbar Structure in Large-Scale Aluminum Reduction Cells <https://link.springer.com/article/10.1007/s11837-016-2148-y>
- Zhiyuan F., and Friedmann S. (2021). Low-carbon production of iron and steel: Technology options, economic assessment, and policy. Joule 5, 829–862, April 21, 2021. [https://www.cell.com/joule/pdfExtended/S2542-4351\(21\)00095-7](https://www.cell.com/joule/pdfExtended/S2542-4351(21)00095-7)

