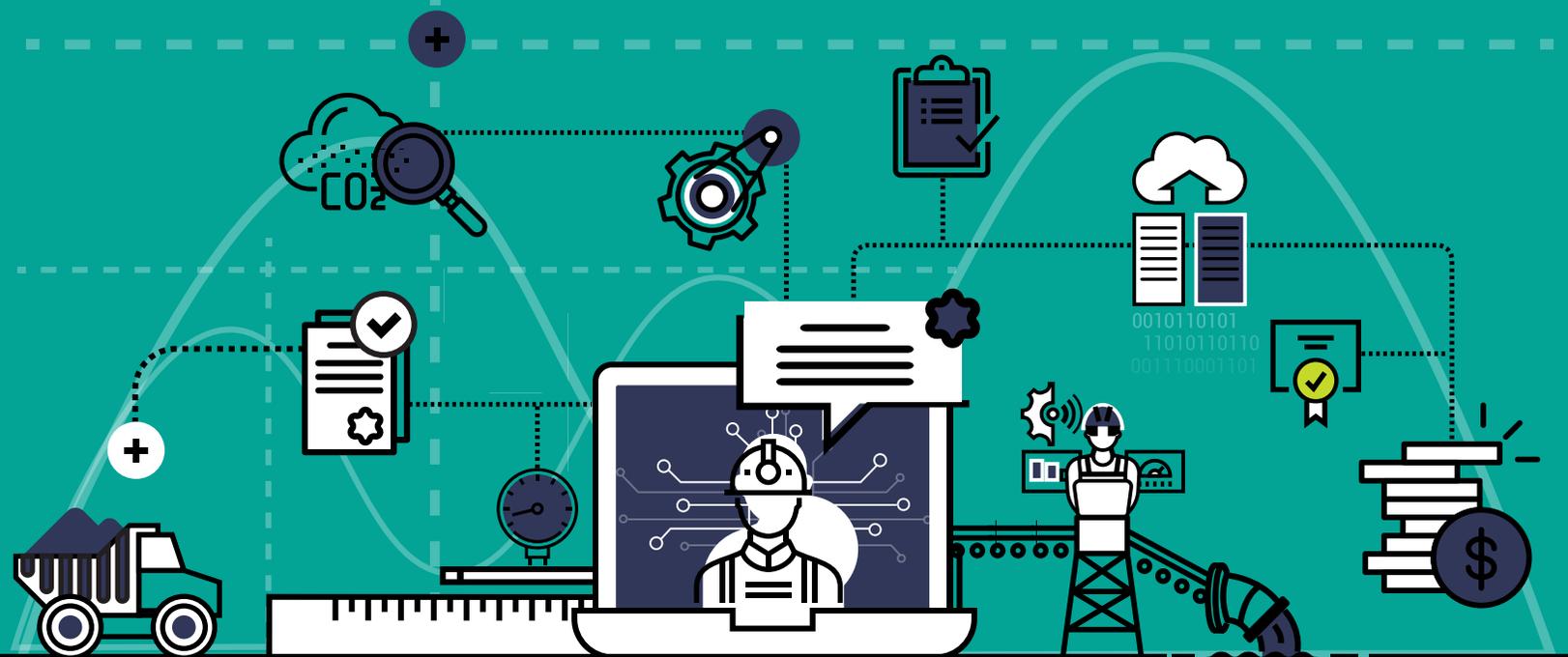


Intensidad de materiales en la transición energética de América Latina

Estimaciones sobre la base de un escenario de integración energética de América del Sur

Frank Leañez



NACIONES UNIDAS

CEPAL



cooperación
alemana

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Gracias por su interés en esta publicación de la CEPAL



Si desea recibir información oportuna sobre nuestros productos editoriales y actividades, le invitamos a registrarse. Podrá definir sus áreas de interés y acceder a nuestros productos en otros formatos.

 www.cepal.org/es/publications

 www.cepal.org/apps

Intensidad de materiales en la transición energética de América Latina

Estimaciones sobre la base de un escenario de integración
energética de América del Sur

Frank Leañez



NACIONES UNIDAS

CEPAL



cooperación
alemana

DEUTSCHE ZUSAMMENARBEIT

Este documento fue preparado por Frank Leañez, Consultor de la Unidad de Recursos No Renovables, División de Recursos Naturales de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en el marco de las actividades del programa Cooperación Regional para la Gestión Sustentable de los Recursos Mineros en los Países Andinos (MINSUS), ejecutado por la CEPAL en conjunto con la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) y financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania.

Se agradecen los aportes de Pablo Chauvet y los comentarios de Orlando Reyes.

Las opiniones expresadas en este documento, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad del autor y pueden no coincidir con las de la Organización o las de los países que representa.

Los límites y los nombres que figuran en los mapas de esta publicación no implican su apoyo o aceptación oficial por las Naciones Unidas.

Publicación de las Naciones Unidas
LC/TS.2022/46
Distribución: L
Copyright © Naciones Unidas, 2022
Todos los derechos reservados
Impreso en Naciones Unidas, Santiago
S.22-00214

Esta publicación debe citarse como: F. Leañez, "Intensidad de materiales en la transición energética de América Latina: estimaciones sobre la base de un escenario de integración energética de América del Sur", *Documentos de Proyectos* (LC/TS.2022/46), Santiago, Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), 2022.

La autorización para reproducir total o parcialmente esta obra debe solicitarse a la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), División de Documentos y Publicaciones, publicaciones.cepal@un.org. Los Estados Miembros de las Naciones Unidas y sus instituciones gubernamentales pueden reproducir esta obra sin autorización previa. Solo se les solicita que mencionen la fuente e informen a la CEPAL de tal reproducción.

Índice

Introducción	7
I. Materiales objetivo	9
II. Intensidad de materiales	13
A. Metodología.....	13
B. Fuentes de información	14
C. Tecnologías para la transición energética	16
1. Solar fotovoltaica	16
2. Eólica	17
3. Baterías.....	19
4. Geotérmica	20
5. Biomasa	21
6. Concentración solar (CSP)	21
D. Tecnologías convencionales	21
1. Hidroeléctrica.....	22
2. Gas natural	22
3. Nuclear.....	22
4. Transmisión.....	23
E. Resultados de intensidad de materiales.....	23
III. Materiales para la transición energética en América Latina	27
A. Programa de expansión integrado	27
B. Demanda de materiales.....	31
1. Escenario base de expansión	31
2. Escenario CORE de expansión	34
3. Redes de transmisión	36
IV. Materiales para la transición energética de América Latina en el contexto mundial	39
A. Cobre	39
B. Cobalto	40
C. Níquel.....	41

D.	Litio	43
E.	Tierras raras	44
F.	Molibdeno.....	45
V.	Conclusiones	47
	Bibliografía	49
	Anexos	51
	Anexo 1	52
	Anexo 2	54
	Cuadros	
Cuadro 1	Minerales y tierras raras objetivo	10
Cuadro 2	Otros minerales empleados en construcción de centrales eléctricas	10
Cuadro 3	Otros materiales empleados en construcción de centrales eléctricas	11
Cuadro 4	Fuentes de información por tecnología	15
Cuadro 5	Tecnologías de generación eólica.....	17
Cuadro 6	Intensidad de materiales – minerales objetivo	23
Cuadro 7	Intensidad de materiales – tierras raras objetivo	24
Cuadro 8	Intensidad de materiales – otros minerales/materiales.....	24
Cuadro 9	América del Sur: dimensionamiento físico del sistema de transmisión en el escenario CORE, desagregado por nivel de tensión, 2020-2032	30
Cuadro 10	América del Sur: demanda de materiales para el sistema de transmisión de alta tensión en el escenario CORE, 2020-2032	37
Cuadro 11	Demanda de cobre en el contexto de producción mundial	40
Cuadro 12	Demanda de cobalto en el contexto de producción mundial	41
Cuadro 13	Demanda de níquel en el contexto de producción mundial	42
Cuadro 14	Demanda de litio en el contexto de producción mundial	43
Cuadro 15	Demanda de tierras raras en el contexto de producción mundial.....	45
Cuadro 16	Demanda de molibdeno en el contexto de producción mundial	46
Cuadro A1	Intensidad de material tecnologías solares fotovoltaicas	52
Cuadro A2	Intensidad de material tecnologías solares térmicas	52
Cuadro A3	Intensidad de material tecnologías eólicas.....	52
Cuadro A4	Intensidad de material tecnologías térmicas convencionales	53
Cuadro A5	Intensidad de material otras tecnologías renovables	53
Cuadro A6	Intensidad de material líneas de transmisión	53
Cuadro A7	Intensidad de material de subestaciones y transformadores	53
Cuadro A8	Principales países productores de cobre.....	54
Cuadro A9	Principales países productores de cobalto	54
Cuadro A10	Principales países productores de litio	55
Cuadro A11	Principales países productores de níquel	55
Cuadro A12	Principales países productores de molibdeno.....	55
Cuadro A13	Principales países productores de metales tierras raras.....	56
	Gráficos	
Gráfico 1	América del Sur: proyección de la capacidad de generación instalada en el escenario base, desagregada por fuente, 2020-2032	29
Gráfico 2	América del Sur: proyección de la capacidad de generación instalada en el escenario CORE, desagregada por fuente, 2020-2032	30
Gráfico 3	América del Sur: demanda acumulada de minerales objetivo en el escenario base, 2021-2032	31

Gráfico 4	América del Sur: evolución de la demanda de minerales objetivo en el escenario base, 2021-2032	32
Gráfico 5	América del Sur: evolución de la demanda de cobre en el escenario base, desagregada por fuente de energía, 2021-2032	32
Gráfico 6	América del Sur: demanda acumulada de tierras raras objetivo en el escenario base, 2021-2032	33
Gráfico 7	América el Sur: evolución de la demanda de tierras raras objetivo en el escenario base, 2021-2032	33
Gráfico 8	América del Sur: demanda acumulada de minerales objetivo en el escenario CORE, 2021-2032	34
Gráfico 9	América del Sur: evolución de la demanda de minerales objetivo en el escenario CORE, 2021-2032	34
Gráfico 10	América del Sur: evolución de la demanda de cobre en el escenario CORE, 2021-2032	35
Gráfico 11	América del Sur: demanda acumulada de tierras raras objetivo en el escenario CORE, 2021-2032	35
Gráfico 12	América del Sur: evolución de la demanda de tierras raras objetivo en el escenario CORE, 2021-2032	36
Diagramas		
Diagrama 1	Marco metodológico	14
Diagrama 2	Cadena de producción de paneles fotovoltaicos.....	16
Diagrama 3	Cadena de producción de generadores eólicos.....	18
Mapas		
Mapa 1	Mapa ilustrativo del alcance del estudio ECOSUD	28
Mapa 2	Mundo: principales países productores de cobre, 2020	40
Mapa 3	Mundo: principales países productores de cobalto.....	41
Mapa 4	Principales productores de níquel a nivel mundial	42
Mapa 5	Principales productores de litio a nivel mundial.....	44
Mapa 6	Principales productores de metales tierras raras a nivel mundial.....	45
Mapa 7	Principales productores de molibdeno a nivel mundial.....	46

Introducción

El presente estudio ha sido mandatado por la División de Recursos Naturales (DRN) de la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), en el marco de las actividades del Programa Cooperación Regional para la Gestión Sustentable de los Recursos Mineros en los países Andinos (MinSus), financiado por el Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ) de Alemania, e implementado juntamente con la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ).

En la presente etapa del Programa MinSus, entre otros objetivos, se busca favorecer una gestión más sostenible de la actividad minera en los países andinos a partir de una integración transparente en las cadenas globales de suministro y valor y la incorporación de información y salvaguardas sociales y ambientales en el análisis económico del sector.

El presente reporte es parte de este Programa y considera que los minerales tienen un rol fundamental para alcanzar los objetivos y metas globales de mitigación del cambio climático. La transición energética hacia una matriz baja en carbono y la penetración de las energías renovables y la electromovilidad están basadas en tecnologías intensivas en minerales. A medida que aumente el despliegue de estas tecnologías, la demanda de minerales aumentará significativamente. El éxito de la transición energética dependerá, en gran medida, de la disponibilidad y suministro de minerales, lo que incentivará una mayor actividad extractiva, con efectos directos e indirectos positivos y negativos para los países.

En este sentido, para la subregión andina, la cual concentra alrededor de 33% y 63% de las reservas mundiales, respectivamente, de cobre y litio (incluyendo en el caso de litio a Argentina y no considerando los recursos del Estado Plurinacional de Bolivia), esto supone valiosas oportunidades, pero también importantes desafíos en los aspectos económicos, sociales y ambientales. Los países de la subregión andina deberían considerar la explotación de estos recursos en el marco de un desarrollo sostenible, lo que requiere de una gobernanza efectiva y democrática que se traduzca en la conversión del capital natural en capital perdurable, la diversificación productiva y la creación de valor agregado a partir de los vínculos y el escalamiento en las cadenas globales de valor.

Los términos de referencia definen el presente informe, donde se intenta analizar y documentar cuantitativamente la intensidad de uso de minerales por las distintas tecnologías de generación eléctrica, particularmente las de energías renovables, en consideración de los escenarios proyectados de transición energética para los países de la región de América Latina y el Caribe que han sido parte de la simulación

llevada a cabo con el programa PLEXOS en el marco del programa de Complementariedad Energética y Desarrollo Sostenible (ECOSUD) 2018 para la planificación de la expansión óptima de la capacidad instalada del sector eléctrico regional hacia 2032¹.

Estos escenarios de transición energética fueron presentados en el documento Síntesis “Construir un nuevo futuro: una recuperación transformadora con igualdad y sostenibilidad” del trigésimo octavo período de sesiones de la CEPAL, dado que el sector de las energías renovables ha sido considerado como uno de los relevantes para cerrar las brechas externa, ambiental y social en la región. De acuerdo con este documento, los sectores relevantes pueden constituirse en el centro de las políticas en favor de un gran impulso para la sostenibilidad (CEPAL, 2020)². La minería, al ser clave en los nodos iniciales de las cadenas de suministro y de valor de las tecnologías de energía renovable, también se vuelve relevante, por lo que sus políticas también deben estar direccionadas a cerrar brechas y estar coordinadas con las del sector de las energías renovables.

Conocer la intensidad de uso de minerales permite dimensionar la importancia de la actividad minera para otros sectores de la economía, que para el caso particular de estudio son las energías renovables, y, dado los efectos negativos que puede tener la explotación de los recursos mineros, hace un nuevo llamado a reflexionar sobre la necesidad de gestionar estos recursos de manera más sostenible para apoyar la transición energética y el desarrollo de las economías de América Latina. No debe ser una suma cero.

El documento se estructura en seis capítulos. En el primero se identifican los materiales objetivo, es decir aquellos minerales que por sus características de demanda, producción y reservas sean claves en la transición energética, el segundo define los aspectos metodológicos, fuentes y resultados de la intensidad de materiales para las tecnologías de generación y transporte eléctrico de mayor relevancia en la planificación energética. El capítulo tercero muestra los resultados de usos de materiales para dos escenarios de expansión del ECOSUD. El capítulo cuarto presenta una revisión del uso de los materiales objetivo en el contexto de producción la región y a nivel mundial. Finalmente, en el último, se presentan las conclusiones y reflexiones sobre lo analizado.

¹ Cabe destacar que, si bien se hace referencia a la región, los países que se han considerado para este estudio son los de América del Sur. Este grupo de países, como muestra de la región, permite una aproximación aceptable de la situación y perspectivas de expansión de la capacidad de generación e interconexión eléctrica a nivel de América Latina.

² Los sectores que se consideran relevantes para dinamizar el desarrollo sostenible son: las energías renovables no convencionales, la movilidad sostenible, la economía digital, la industria manufacturera de la salud, la bioeconomía, la economía circular y el turismo sostenible (CEPAL, 2020).

I. Materiales objetivo

Las tecnologías de generación eléctrica, tanto tradicionales como aquellas que hacen uso de fuentes renovables energéticas, requieren metales y aleaciones que son producidas desde materiales que contienen diversos minerales. Generalmente, las tecnologías renovables requieren considerablemente más minerales que los combustibles fósiles (Ashby, 2013). Esos minerales son procesados adicionalmente para extraer o producir los metales, las aleaciones o los compuestos de interés. Los cuales, una vez procesados, se utilizan luego en aplicaciones de uso final. Por simplicidad se hará referencia a materiales al rango amplio que involucra a los minerales, incluyendo las distintas categorías como metales, no metales, aleaciones, compuestos, minerales y otros elementos de construcción.

El análisis no solo se centra en los materiales también en los requisitos para construir una central (o la fabricación de equipos), pero no en los requisitos operativos (por ejemplo, consumo de sales de silicio para la operación de centrales de concentración solar). Se considera una amplia gama de minerales empleados en las tecnología actuales y planificadas de la región. Incluyen materiales críticos como el cromo, cobre, los principales metales de las baterías (litio, níquel, cobalto, manganeso y grafito), molibdeno, metales del grupo del platino, zinc, tierras raras y otros. Los materiales críticos, identificados en el estudio como “objetivo”, se los selecciona en función de múltiples criterios que priorizan: capacidad minera, cantidad de reservas, concentración de las reservas de mineral en diversos países y relevancia en la industria eléctrica. En general, las tierras raras se consideran objetivo debido a la actual concentración de su producción (fundamentalmente en China), a su relación con elementos tecnológicos modernos y a la efectividad de su implementación³.

En los cuadros que siguen se presentan los materiales objetivo que se utilizan en las tecnologías de energía renovable y una categorización de estos en: minerales objetivo, tierras raras objetivo, otros minerales y otros materiales.

³ Dificultad de reemplazo debido a la pérdida de su efectividad (USGS, 2021).

Cuadro 1
Minerales y tierras raras objetivo

Categoría	Nombre	Nombre (Construcción)	Símbolo
Minerales objetivo	Cobalto	Cobalt	Co
	Cobre	Copper	Cu
	Litio	Lithium	Li
	Níquel	Nickel	Ni
Tierras raras objetivo	Disprosio	Dysprosium	Dy
	Neodimio	Neodymium	Nd
	Praseodimio	Praseodymium	Pr
	Terbio	Terbium	Tb

Fuente: Elaboración propia. Definición basada en IEA (IEA, 2020), IRENA (Gielen, 2021) y World Bank (World Bank, 2020).

Cuadro 2
Otros minerales empleados en construcción de centrales eléctricas

Categoría	Nombre	Nombre (Construcción)	Símbolo
Otros minerales	Plata	Silver	Ag
	Aluminio	Aluminum	Al
	Arsénico	Arsenic	As
	Oro	Gold	Au
	Boro	Boron	B
	Grafito	Graphite	C
	Cadmio	Cadmium	Cd
	Cerio	Cerium	Ce
	Cromo	Chromium	Cr
	Hierro	Iron	Fe
	Galio	Gallium	Ga
	Germanio	Germanium	Ge
	Hafnio	Hafnium	Hf
	Indio	Indium	In
	Iridio	Iridium	Ir
	Lantano	Lanthanum	La
	Magnesio	Magnesium	Mg
	Manganeso	Manganese	Mn
	Molibdeno	Molybdenum	Mo
	Niobio	Niobium	Nb
	Plomo	Lead	Pb
	Paladio	Palladium	Pd
	Platino	Platinum	Pt
	Selenio	Selenium	Se
	Silicio	Silicon	Si
	Samario	Samarium	Sm
	Estaño	Tin	Sn
	Tantalio	Tantalum	Ta
	Telurio	Tellurium	Te
	Titanio	Titanium	Ti
	Vanadio	Vanadium	V
	Tungsteno	Tungsten	W
	Itrio	Yttrium	Y
	Zinc	Zinc	Zn
	Circonio	Zirconium	Zr

Fuente: Elaboración propia. Definición basada en IEA (IEA, 2020), IRENA (Gielen, 2021) y World Bank (World Bank, 2020).

Cuadro 3
Otros materiales empleados en construcción de centrales eléctricas

Categoría	Nombre	Nombre (Construcción)	Nombre alternativo
Otros materiales	Ácido sulfúrico	Sulphuric acid	Ácido sulfúrico
	Agua	Water	Agua
	Amonio	Antimony	Amonio
	Arena	Sand	Arena
	Arena de silicio	Silicon sand	Arena de silicio
	Caliza	Limestone	Caliza
	Ceniza de soda	Soda ash	Ceniza de soda
	Fibra de carbono	Carbon fiber	CFRP
	Fibra de vidrio	Fibreglass	GFRP
	Hormigón	Concrete	Concreto
	KNO ₃	KNO ₃	KNO ₃
	Lima	Lime	Lima
	NaNO ₃	NaNO ₃	NaNO ₃
	Óxido plomo	Lead oxides	Óxido plomo
	Petróleo	Oil	Petróleo
	Plástico	Plastics	Plástico
	Polímeros ^a	Polymers	Polímeros
	Polipropileno	Polypropylene	Polipropileno
	PVC	PVC	PVC
	Acero	Steel	Steel
Vidrio	Glass	Vidrio	
Espuma de vidrio	Foam glass	Vidrio de espuma	

Fuente: Elaboración propia. Definición basada en IEA (IEA, 2020), IRENA (Gielen, 2021) y World Bank (World Bank, 2020).

^a Cuando no se hace diferenciación entre tipos de polímeros.

II. Intensidad de materiales

Para el caso de estudio, la intensidad de materiales se define como una medida de la cantidad de material, usualmente en base a su peso total, por cada unidad de potencia eléctrica nominal (o “*peak*”) construida. Es decir, mide el uso unitario de materiales durante el proceso de construcción de una central. Usualmente se define en [kg/kW] o [ton/MW], aunque para el caso de elementos de almacenamiento de energía, considerando que la energía define su capacidad, se define en [kg/kWh]. Los valores excluyen el uso de material de reemplazo para operación y mantenimiento. El reto de calcular la intensidad de materiales viene dado por la diversidad tecnológica, el aprendizaje y el valor de los componentes. Aunque se utilice la misma fuente (por ejemplo, el sol), la diversidad de sub-tecnologías emplean distintos materiales para lograr la conversión energética. Los materiales empleados, incluso para cada sub-tecnología específica, puede que vayan evolucionando en el tiempo a medida que se consigan alternativas que permitan incrementar la eficiencia o disminuir los costos. Además, la porción de mercado, “*market share*”, de cada una de las alternativas irá variando en el tiempo a medida que se posicionan conforme a sus costos. La intensidad de materiales es entonces una función del tiempo para cada sub-tecnología.

A. Metodología

La estimación de la intensidad de materiales es una elaboración propia basada en la revisión bibliográfica y el establecimiento del estado-del-arte en construcción. Las proyecciones de los ajustes de intensidades, así como la determinación del *market share* ante distintos escenarios, son realizados en base a investigación orientada. Finalmente, la proyección de uso de materiales se realiza en función del plan de expansión unificado y la proyección propia de intensidad de cada material para el horizonte de estudio. El diagrama 1 ilustra el procesamiento de la información.

Diagrama 1
Marco metodológico

Diagrama de procesamiento de la información para la obtención del uso de materiales



Fuente: Elaboración propia.

B. Fuentes de información

Existen referencias que compilan información de intensidad de materiales. Por ejemplo, la referencia IEA (2021) muestra intensidad de materiales, usualmente medidas como kg/kWnom⁴, para las siguientes centrales de generación tipo: Carbón (2007); Nuclear (reactor vapor a presión) (2007); FV-cristales de silicio (1995, 1997, 2008); CSP (2004); FV-CdTe (2005, 2006); Celda de combustible (ácido fosfórico) (2002, 1997); Celda de combustible (óxido sólido) (2001, 2010); Eólico *onshore* (2006, 2007, 2008, 2009); Eólico *offshore* (2006, 2007, 2009); Hidroeléctrica (2008, 2002, 2010); Undimotriz- (2003); Mareomotriz-corriente (2008); Mareomotriz-barrera (1982, 2010); Geotérmica (2010); Biomasa (1997, 2008). Aunque resulta tentador hacer un análisis de usos de materiales en referencia a información concentrada como esta, se deben considerar las siguientes dificultades:

- Como se observa, de las fuentes de información citadas, aquellas que hicieron el levantamiento del uso de materiales con metodologías tales como "*lifetime assessments*" o estudios especializados de componentes pueden haber quedado obsoletas. Esto es especialmente cierto para tecnologías nuevas que muestran una constante evolución en busca de posicionarse en el mercado.
- La información no es uniforme: es decir, se limita a aquellos materiales para los cuales había información disponible.
- Finalmente, la información puede referirse a una sub-tecnología en particular (sin considerar otras en la misma categoría) o al promedio de varias, lo cual hace que la separación en sub-tecnologías y la separación de *market share* no sea posible.

Para la elaboración de proyecciones propias de intensidad de materiales, se consultaron distintas fuentes confiables de IEA, IRENA, *World Bank* e importantes revistas científicas. La lista que muestra el cuadro 4 no es exhaustiva de las referencias revisadas, porque, además, fueron revisadas las fuentes citadas en dichos estudios para poder concluir acerca de las fechas más actuales.

⁴ kWnom: kilowatt de capacidad instalada nominal.

Cuadro 4
Fuentes de información por tecnología

Información citada para elaboración de las proyecciones de intensidad de materiales												
Tecnología	Ashby (2013)	IEA (2020)	World Bank (2017)	Pihl y otros (2012)	World Bank (2020)	Deetman y otros (2021)	Carrara y otros (2020)	Deetman y otros (2018)	Moss y otros (2013)	Moss y otros (2011)	Rydh (1999)	Igogo y otros (2019)
Carbón	x	x	x					x				
Nuclear	x	x	x					x		x		
PV-si	x	x	x					x		x		
PV-CdTe	x											
PV-CIGS			x							x		
PV-a-si			x									
CSP	x		x	x				x		x		
Fuel-cell	x					x			x			
Batt	x		x			x		x			x	x
Wind-onshore	x	x	x				x	x		x		
Wind-offshore	x	x					x	x				
Turbina-gas		x	x					x	x			
Hidroeléctrica	x							x	x			
Undimotriz	x								x			
Tidal-corriente	x								x			
Tidal-barrera	x								x			
Geotérmica	x								x			
Biomasa	x							x				
Red eléctrica						x						
IGCC								x	x			

Fuente: Elaboración propia.

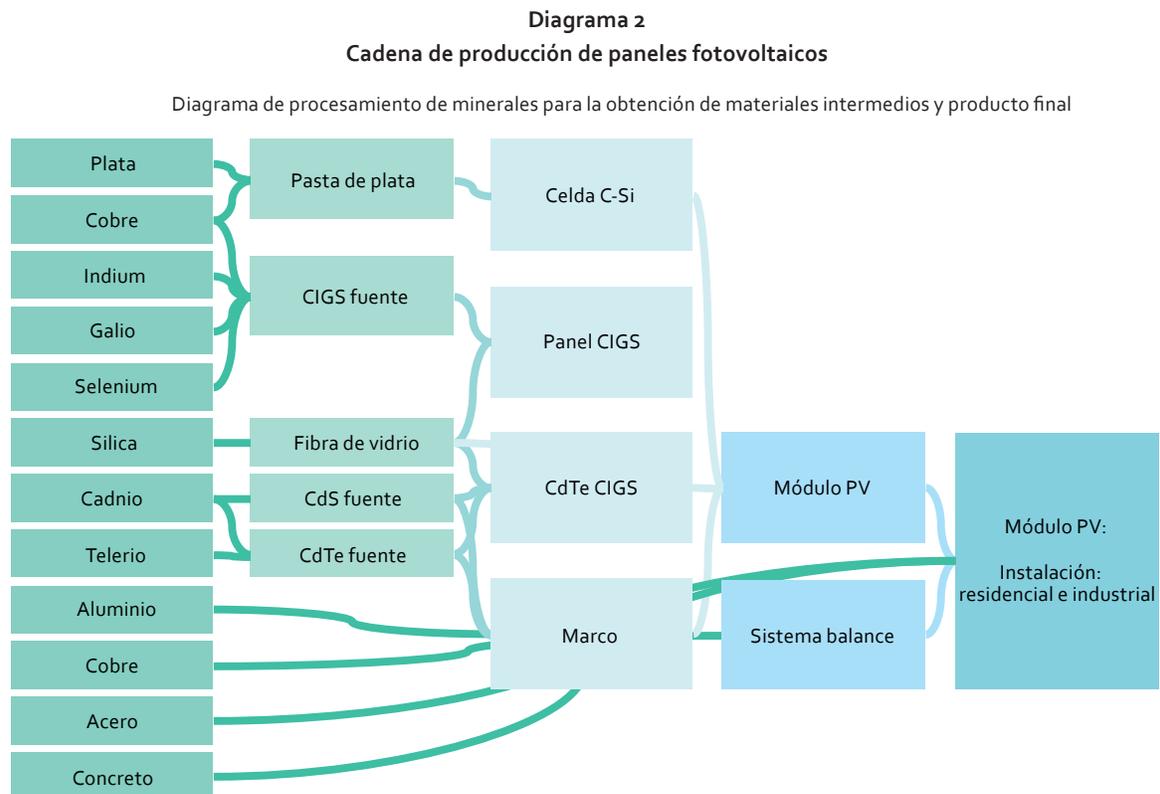
C. Tecnologías para la transición energética

A continuación, para cada de fuente de energía renovable no convencional, se presentan las principales tecnologías y sub-tecnologías actuales y con perspectivas futuras, destacando los materiales que las componen y, cuando es posible y necesario a fin de ponderar la participación de los materiales, la dinámica del *market share* tecnológico. Los mismo se hace para las baterías recargables que serán clave para responder a la intermitencia y variabilidad de estas fuentes y para servir al funcionamiento de la electromovilidad.

1. Solar fotovoltaica

En la actualidad existen cuatro grupos principales de sub-tecnologías de generación eléctrica a partir de celdas solares fotovoltaicas (PV, por sus siglas en inglés): cristal de silicio (c-Si), telurio de cadmio (CdTe), celdas de cobre, indio, galio y seleniuro (CIGS) y silicio amorfo (a-Si). Los módulos c-Si se han convertido en la tecnología fotovoltaica dominante del mercado, seguida de alternativas de “película delgada” (IEA, 2020). Los primeros dominan con el 95% de adiciones de capacidad solar fotovoltaica a nivel global en 2020 (IEA, 2020), aun cuando la participación de mercado de todas las tecnologías de película fina había ascendido a alrededor del 8% del total producción anual (World Bank, 2017). Según (Carrara, y otros, 2020), la proporción de *market share* tecnológico en 2018 se estima fue como sigue: c-Si 95,4%, CdTe. 2,4%, CIGS. 1,9% y a-Si 0,3%. En consecuencia, el total de *market share* de las tecnologías de película fina a nivel global se estima en la actualidad puede ser de 4,3%.

El diagrama 2 muestra el procesamiento de minerales claves para la elaboración de materiales intermedios y productos finales durante el proceso de construcción e instalación de los paneles PV.



Fuente: Elaboración propia sobre la base Carrara y otros (2020).

Nota: C-Si = cristal de silicio; CIGS = celdas de cobre, indio, galio y seleniuro; CdTe = película-fina de Cadmio-Telurio.

Desde 2008, la intensidad del silicio se ha reducido a más de la mitad (Fraunhofer, 2021), mientras que la intensidad de la plata cayó un 8% gracias a pastas de metalización más eficientes y menos intensivas en plata (VDMA, 2020). Dado que el silicio y la plata se encuentran entre los elementos más caros en las celdas solares fotovoltaicas, se espera que continúen los avances en la intensidad de materiales, con reducciones adicionales supuestas de alrededor del 25% y 30% en 2030 para silicio y plata respectivamente.

Estudios especializados asumen que la mayoría de las futuras instalaciones solares fotovoltaicas serán de la variedad de silicio cristalino (World Bank, 2017). Para las alternativas basadas en las tecnologías de película delgada, se plantean diversos escenarios del *market share*: 1) CIGS aumenta su participación de mercado de aproximadamente del 7% al 17% al 2050. 2) CIGS pasa de una participación de mercado del 7% al 25% en 2025.

La referencia World Bank (2020) propone que las tecnologías predominantes en solar FV, proyectadas en el escenario base, serán: c-Si 50%; CdTe 16,7%; CIGS 16,7%; y a-Si 16,7%. Sin embargo, en la misma referencia se consideran escenarios alternativos en donde el *market share* al 2050, de cada una de las tecnologías, puede alcanzar el 50%. Es decir, la participación de las 3 alternativas al silicio cristalino en el futuro es aún incierta.

Por otro lado, los sistemas fotovoltaicos solares distribuidos (PV-DG) tienden a tener inversores de cadena o microinversores, que requieren aproximadamente un 40% más de cobre que los proyectos industriales, que suelen utilizar inversores centrales.

2. Eólica

La mayoría de las instalaciones de generadores eólicos en la actualidad son del tipo “onshore”. Es decir, instalaciones en tierra firme. El total de generadores en alta mar, “offshore”, a nivel mundial es de 35,5 GW de capacidad instalada, lo que representa menos del 0,5% de la capacidad eólica instalada en 2020. La tecnología empleada para cada tipo de instalación y, en consecuencia, la utilización de materiales de construcción es distinta, aunque se prevé será similar a medida que evolucionen los procesos de manufactura. Las principales sub-tecnologías en consideración, tanto en la actualidad como previstas a largo plazo, se resumen en el cuadro 5. Los acrónimos ahí definidos serán empleados para referirse a cada sub-tecnología en el presente y posteriores capítulos.

Cuadro 5
Tecnologías de generación eólica

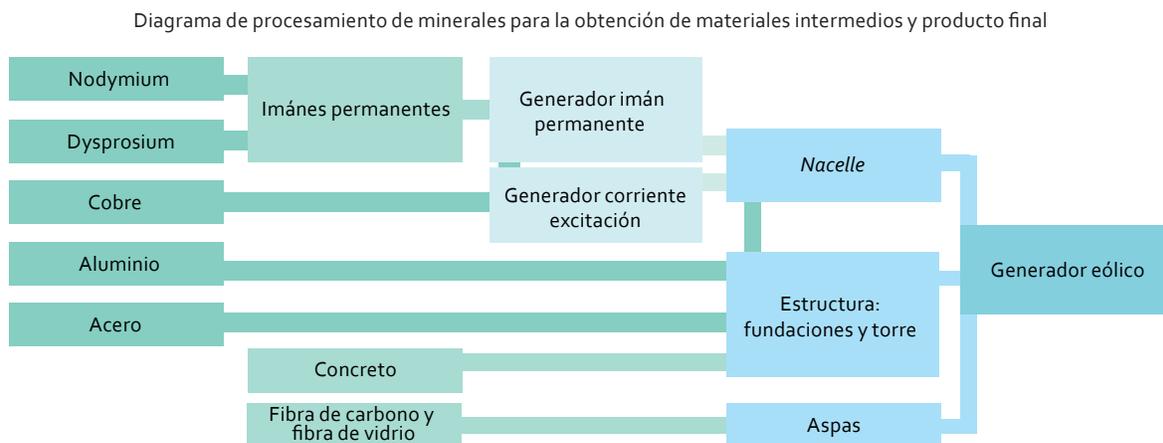
Tipos de turbina, generador eléctrico y aplicaciones			
Tipo de generador	Acrónimo	Tipo de turbina	Aplicación
Acople Directo (Direct Drive)	DD-HTS	High-Temperature Superconductors (HTS)	Offshore
Acople Directo (Direct Drive)	DD-EESG	Electrically Excited Synchronous Generator (EESG)	Onshore
Engranaje (Gearbox)	GB-EESG	Electrically Excited Synchronous Generator (EESG)	Onshore
Acople Directo (Direct Drive)	DD-PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	Onshore and offshore
Engranaje (Gearbox)	GB-PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG)	Onshore and offshore
Engranaje (Gearbox)	GB-DFIG	Double-Fed Induction Generator (DFIG)	Onshore and offshore
Engranaje (Gearbox)	GB-SCIG	Squirrel Cage Induction Generator (SCIG) – Without full Onshore converter	Onshore
Engranaje (Gearbox)	GB-SCIG	Squirrel Cage Induction Generator (SCIG) – With full Offshore converter	Offshore
Engranaje (Gearbox)	GB-WRIG	Wound Rotor Induction Generator (WRIG)	Onshore

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la nomenclatura de IEA (2020) y Carrara y otros (2020).

El diagrama 3 ilustra el procesamiento de minerales claves para la elaboración de materiales intermedios y productos finales durante el proceso de construcción e instalación de los generadores eólicos. En una investigación sobre la criticidad de varios metales para tecnologías de energía renovable

en la Unión Europea (Öhrlund, 2011) encuentra que el despliegue generalizado de energía eólica y solar fotovoltaica puede aumentar significativamente la demanda de ocho metales: galio, indio, selenio, telurio, disprosio, neodimio, praseodimio y terbio. La demanda de estos metales sería abastecida casi exclusivamente por extracción de materia prima virgen.

Diagrama 3
Cadena de producción de generadores eólicos



Fuente: Elaboración propia sobre la base de Carrara y otros (2020).

El tamaño de la turbina de generación eólica ha crecido considerablemente desde un promedio de 1,9 MW para turbinas en 2010 a 2,6 MW en 2018 (IRENA, 2018 y 2019). Los factores de capacidad, por su parte, han aumentado desde una media de 27% en 2010 al 34% en 2018 (para proyectos *onshore* recientemente comisionados) (IEA, 2020). Es importante señalar que la complejidad de plantear escenarios de capacidad instalada de energías renovables y de intensidad materiales aumenta al considerar el *market share* sub-tecnológico. De esta manera, como las cuotas de mercado de las distintas sub-tecnologías deben sumar necesariamente el 100%, esto supone que escenarios de baja demanda para una tecnología implicará automáticamente un escenario de alta demanda para otra.

El mercado eólico *onshore* está dominado actualmente por GB-DFIG, representando más del 70% del mercado global. Los DD-PMSG duplicaron su participación en los últimos 10 años, de 10% en 2010 al 20% en 2020. Las tecnologías DD-PMSG son cada vez más preferidas, tal es así que se espera que al 2040 podrían alcanzar el 40% del mercado *onshore* (IEA, 2020).

Por su parte, la proporción de instalaciones de aerogeneradores mundiales con turbinas de accionamiento (acople) directo (DD) aumentaron de alrededor del 18,2% en 2006 al 19,8% en 2011, y se espera que incremente hasta el 29,6% en 2020 (World Bank, 2017).

La demanda futura de metales en la industria eólica dependerá de la cantidad total de capacidad instalada y las opciones entre las sub-tecnologías competidoras. Una turbina de 3,45 MW contiene alrededor de un 15% menos de hormigón, un 5% menos de fibra de vidrio, un 5% menos de cobre y un 6% menos de aluminio que una turbina de 2 MW (basado en su intensidad en kg/MW) (Eli, y otros, 2020). La división del mercado en sub-tecnologías aún no está claramente definida. Las preocupaciones sobre la disponibilidad de elementos de tierras raras pueden estimular el desarrollo de generadores HTS⁵, eliminando así la necesidad de elementos de tierras raras en aplicaciones marinas (Carrara y otros, 2020).

En la referencia World Bank (2017) se definen 2 posibilidades (que no son muy claras) acerca del futuro de la predominancia para turbinas *onshore* hacia 2050: en un primer escenario, el *marker share*

⁵ Refiere a super conductores de alta temperatura o *High Temperature Superconductors* (HTS, por sus siglas en inglés).

de los sistemas de transmisión directa y por engranajes evoluciona de 10/90 en 2013 a 25/75 en 2050. En un segundo escenario, el *market share* llega a 50/50 en 2050. No obstante, la actualización de las proyecciones en World Bank (2020), plantea 3 escenarios al 2050:

- i) Base: 75% engranajes, 25% transmisión directa.
- ii) *High geared*: 90% engranajes, 10% transmisión directa.
- iii) *High direct*: 60% engranajes, 40% transmisión directa.

Se destaca que el segundo escenario es el menos probable. Asimismo, se estima que las mejoras tecnológicas, como por ejemplo la disminución de uso de imanes permanentes mediante el uso del flujo axial del núcleo de aire, o el aumento del uso de turbinas híbridas con caja de cambios de velocidad media y generador de imanes permanentes, permitirán reducir el uso de materiales en un 67% al 2050.

A su vez, Elshkaki y otros (2013) estiman que las turbinas eólicas *onshore*, que se supone serán casi completamente de diseño de transmisión directa en el futuro, representarán el 50% de la capacidad total de generación instalada eólica al 2050. Por su parte, según Carrara y otros (2020), las tecnologías de imanes permanentes representan actualmente una participación del 32% del mercado en el sector *onshore* y se prevé que al 2050 tengan una penetración de mercado de entre 40% y 68%. En resumen, las citas anteriores muestran proyecciones consistentes con el tercer escenario (*high direct*) proyectado en World Bank (2020).

El mercado *offshore* actual, por su parte, está principalmente dominado por centrales de imanes permanentes en 76%. De acuerdo con Carrara y otros (2020), este nivel se mantiene durante 2 décadas, mientras que hacia 2050 la participación de mercado disminuye entre 70% y 41%. El método empleado para las proyecciones del *market share* se basa en extrapolación mediante series de tiempo.

Las trayectorias revisadas y planteadas en Carrara y otros (2020) proyectan un cambio hacia generadores de excitación híbrida que emplean una caja de cambios de una etapa con un imán permanente pequeño. Es decir, un aumento de los generadores HTS de hasta el 18% al 2030. Se plantea que los generadores de accionamiento directo con imanes permanentes podrán alcanzar entre 2% y hasta 44% en el caso más optimista al 2030.

3. Baterías

Se prevé que la demanda de batería por vehículos eléctricos (EV, por sus siglas en inglés), aumentará casi 4 veces entre 2020 y 2040, de 16 GWh a 62 GWh. Los EV utilizan alrededor de 6 veces más minerales que los vehículos convencionales (IEA, 2020). General Motors anunció recientemente planes para eliminar gradualmente los vehículos convencionales de gasolina y diésel para 2035, mientras que la dirección ejecutiva de Volvo indicó que la empresa solo vendería vehículos eléctricos para 2030 (IEA, 2020). Según la referencia World Bank (2017), 140 millones de vehículos eléctricos estarán en funcionamiento para el 2030 en un escenario base, planteando 25 millones de unidades en los escenarios más pesimistas. Las proyecciones para el almacenamiento de energía de la batería automotriz después de 2023 se basan en el supuesto de una tasa de crecimiento anual de aproximadamente 2%.

La infraestructura total de baterías se puede separar en tres tecnologías principales: plomo-ácido, ion-litio y otras. La categoría "otras" se refiere a variantes de almacenamiento químico como níquel-hidruro metálico, flujo redox, sodio-azufre y otras composiciones en desarrollo.

La demanda general de minerales bajo los supuestos de un escenario de base aumenta 3 veces entre 2020 y 2040, de 400 a 11.800 mil toneladas (kt). La demanda de níquel crece 41 veces hasta 3300 kt, mientras que el cobalto aumenta 21 veces, a medida que la química del cátodo se aleja de NMC 111 hacia químicas con menor contenido de cobalto (NMC 622 y NMC 811)⁶. La demanda de litio crece 43 veces,

⁶ NMC es una abreviación empleada para referirse en específico a la química del cátodo de baterías de litium-ion compuesto por óxido de litio níquel manganeso cobalto.

mientras que la del cobre crece 28 veces. La demanda de grafito crece 25 veces, de 140 a más de 3500 kt en el mismo período (2020-2040). El silicio registra el mayor crecimiento relativo, más de 46 veces, a medida que los ánodos de grafito recubiertos de silicio crecen desde una participación del 1% en 2020 al 15% en 2040. La demanda de tierras raras crece 15 veces hasta 35 kt en 2040 (IEA, 2020).

Los motores de imán permanente tienen la mayor eficiencia y densidad de potencia, pero el uso de tierras raras los hace costosos en comparación con otras tecnologías. Además de neodimio (0,25-0,5 kg/vehículo) y otras tierras raras (0,6-0,35 kg/vehículo), los motores de imanes permanentes también requieren cobre (3-6 kg/vehículo), hierro (0,9-2 kg/vehículo) y boro (0,1-0,3 kg/vehículo) (Ballinger y otros, 2019).

Respecto al litio, en un escenario de (World Bank, 2017), éste aumenta su participación de mercado de alrededor del 2% en la actualidad al 30% en el sector automotriz en 2050 (medido por la capacidad total de almacenamiento de energía en GWh), así como del 0% al 40% en almacenamiento de energía industrial, y del 5% al 33% en almacenamiento de energía descentralizada. Se plantea un segundo escenario en el cual las baterías ion-litio aumentan al 50% de participación de mercado en los tres sectores para 2050 (World Bank, 2017).

La referencia World Bank (2020) plantea la siguiente participación de mercado de las baterías al 2050:

- Para vehículos eléctricos: ion-litio 100%. Proyecta que el uso de baterías de plomo-ácido disminuye linealmente hasta cero en 2030.
- Para red industrial: plomo-ácido 2,5-5%, ion-litio 70-84%, flujo redox 2,8-3,7%, otras 9,8-25%.
- Para generación distribuida (DG): plomo-ácido 33%, ion-litio 33%, otras 33%.

Se espera que la mejora de material ion-litio debido al avance tecnológico permitirá reducir el material en un 23% (World Bank, 2020). El impacto de este resultado reduciría la demanda de litio entre 16-17%.

La referencia Deetman y otros (2021) desarrolla y emplea un método de estimación de demanda de materiales por baterías y vehículos similar (pero no igual) al método por (IEA, 2020), definiendo cantidades a partir de fuentes alternativas de información georreferenciada. La desagregación tecnológica de baterías es más detallada, diferenciando densidades de energía actuales versus proyecciones a 2030. Las densidades son estimadas para las subcategorías de baterías de ion-litio (como baterías LMO, NMC, NCA, LFP, LTO)⁷ y litio-metal (como baterías litio-azufre, cerámica de litio, litio-aire). El mercado de litio-metal se expandirá hasta alcanzar 9,5% del mercado de baterías de litio, mientras que el de ion-litio se mantendrá prácticamente estable (con alrededor de 90% del mercado). Por su parte, las baterías de celdas de combustible (hidrógeno) alcanzarán a penas 1% del mercado de baterías (Deetman y otros, 2021).

4. Geotérmica

La energía geotérmica puede tener el mayor potencial de todas las fuentes de energías renovables. Un estudio del USGS en 2008 estimó que el potencial de energía eléctrica de EE. UU. superaba los 500 GW. En la actualidad esta estimación sigue siendo sólo potencial, requiriendo avances en la perforación profunda para hacerla realidad. La mayor parte del costo de construcción de una central geotérmica es la de perforación (tanto exploratoria como de explotación), pero se beneficia de bajos costos de operación y mantenimiento y la electricidad que genera es gratuita. Al igual que con la energía mareomotriz, el material crítico utilizado en grandes cantidades es cobre, aunque también podría considerarse el níquel como crítico. Por ejemplo, el despliegue de 200 GW por año de energía geotérmica requieren alrededor del 2% de la producción actual de cobre (Ashby, 2013). Sin embargo, otras referencias aseguran que el desarrollo de centrales geotérmicas no representa problemas de abastecimiento de metales en el futuro (World Bank, 2017).

⁷ Óxido de litio-manganeso (LMO, por sus siglas en inglés); óxido de litio-níquel-cobalto-aluminio (NCA); fosfato de litio-hierro (LFP); litio-titanato (LTO).

Las aleaciones que se utilizan en las tuberías de pozos contienen algunos de los metales de interés, incluidos cromo, molibdeno, níquel y cobre. Estos metales se utilizan principalmente en aleaciones para tuberías de pozo que deben poder operar en condiciones de alta temperatura (hasta 500°C), alta acidez (pH = 1) y alto contenido de salinidad y gas (CO₂, H₂S, CH₄) (Moss, 2013). La referencia IEA (2020) coincide además en que la energía geotérmica es una fuente importante de demanda de níquel, cromo, molibdeno y titanio del sector energético.

5. Biomasa

Los carbohidratos que acumulan las plantas verdes a partir de la captura de la energía solar se pueden emplear como combustibles al secar y quemar para liberar la energía térmica, o se pueden fermentar para producir olefinas (metano, etano) y alcoholes (metanol, etanol). El proceso global de captura de energía de las plantas es poco eficiente (aproximadamente solo 0,5% de la energía solar en promedio es capturada por las plantas). El flujo anual medio de radiación solar en un clima templado es de aproximadamente 100 W/m², por lo que el área-intensidad de la biomasa, antes de que se haya convertido en un combustible útil, es de unos 2.000 m²/kW. Esta densidad energética es menor que la de cualquier otra fuente de energía en la actualidad. Así, para que la biomasa sea útil, como fuente de energía, debe secarse para la combustión o fermentarse para producir, por ejemplo, biodiésel. Y en ambos procesos, con eficiencia imperfecta, se debe aumentar la intensidad del área hasta 5.000-10.000 m²/kW. A su vez, se dice que la biomasa es un combustible neutro en carbono porque el dióxido de carbono que emite durante su combustión fue extraído de la atmósfera durante su crecimiento, pero esto no es del todo cierto porque la agricultura y el transporte generan CO₂ que no suele acreditarse a la biomasa. Respecto a la intensidad de materiales, la tecnología empleada es similar a aquellas de combustibles fósiles y, por lo tanto, el requerimiento de materiales de construcción para una central de energía con la biomasa como fuente sigue una tendencia similar.

6. Concentración solar (CSP)

Existen 2 tipos predominantes de concentradores solares: colectores de cilindro-parabólicos y sistemas de torre central. Aunque el principio es el mismo en ambos, esto es, transformar la energía solar en calor para la generación a vapor, la infraestructura es muy diferente y, en consecuencia, cada tipo requiere un uso muy distinto de materiales y de sus proporciones.

Los colectores de cilindro-parabólicos representaron más del 80% de las adiciones de capacidad de CSP en 2010, pero su participación ha ido disminuyendo constantemente desde entonces, cediendo el mercado a los sistemas de torre central, que tienen mayor eficiencia y capacidad de almacenamiento (IEA, 2020). Las torres centrales representaron alrededor del 60% de las adiciones de capacidad de CSP en 2020, y se espera que su participación crezca al 75% para 2024 (IEA, 2020).

Los sistemas de torre central generalmente requieren más materiales que los sistemas de colectores de cilindro-parabólicos: 8 veces más de manganeso, 4 veces más de níquel y el doble de plata. Sin embargo, los sistemas colectores de cilindro-parabólicos requieren más del doble de cobre (IEA, 2020).

D. Tecnologías convencionales

A continuación, para cada de fuente de energía convencional, se presentan las principales tecnologías y sub-tecnologías actuales y con perspectivas futuras, destacando los materiales que las componen y, cuando es posible y necesario a fin de ponderar la participación de los materiales, el *market share* tecnológico. También se presentan los materiales que componen las líneas de transmisión que son clave para integrar la red de electricidad de las distintas fuentes y zonas de generación con las zonas de consumo.

1. Hidroeléctrica

Utiliza sustancialmente más cemento y hormigón que cualquier otra tecnología de generación de electricidad, pero tiene una intensidad de minerales metálicos y tierras raras relativamente baja en comparación con otras fuentes de energía con bajas emisiones de carbono. La energía hidroeléctrica no usa tierras raras, y su uso actual de cobre (15 kg/MW), manganeso (2 kg/MW) y níquel (3 kg/MW) se encuentra entre los más bajos de todas las fuentes bajas en carbono (Ashby, 2013).

La referencia IEA (2020) proyecta que la energía hidroeléctrica representará el 2% y el 11% de la demanda total de cobre y cromo, respectivamente, del total de demanda de metales por tecnologías bajas en carbono al 2024. Las centrales hidroeléctricas de gran escala enfrentan en la actualidad una oposición de grupos de la sociedad civil, principalmente por motivos ambientales y comunitarios. Varios proyectos de gran escala en Brasil, Chile y Argentina han visto sus obras retrasadas o suspendidas en la última década. La tecnología en América Latina es considerada madura, por lo que no se esperan cambios en su *market share* o la aparición de otras sub-tecnologías sustitutas.

2. Gas natural

Los avances en la eficiencia de las turbinas de gas requieren de vapor a mayor temperatura (y presión), lo que cambia los requisitos de metales para que la turbina pueda soportar temperaturas más altas. Así, se estima que el crecimiento de la eficiencia mediante el uso de turbinas a vapor avanzadas ultra-supercríticas llevará a aumentar la demanda de aleaciones a base de níquel (Moss, 2011; World Bank, 2017). Estos estudios muestran solo la estimación de las necesidades de metales para los componentes a base de níquel de la turbina y advierten que no se dispone de datos comparables para el caso de una turbina con la mejor tecnología disponible actualmente. En cambio, a partir de datos de análisis del ciclo de vida, estiman el contenido de metales para una central de ciclo combinado con turbinas avanzadas ultra-supercríticas en comparación a una central con la mejor tecnología disponible actualmente. El uso de revestimientos en el acero al cromo-níquel permite elevar las condiciones del vapor hasta unos 640°C.

Los materiales utilizados para las calderas y las tuberías dependen de las condiciones empleadas. En general, se consiguen condiciones de vapor de hasta 610 °C utilizando aceros con un contenido de cromo de alrededor del 12%. Mediante el uso de metales críticos (revestimientos en el acero al níquel-cromo) es posible impulsar las condiciones de vapor hasta alrededor de 640 °C. Para centrales más modernas, que requieren condiciones de vapor avanzadas ultra-supercríticas (700 °C), las calderas, tuberías y otros componentes que entran en contacto con el vapor de alta temperatura tendrán que construirse con materiales de alto rendimiento, como las superaleaciones a base de níquel. En comparación con los aceros al cromo, empleados convencionalmente en turbinas de gas natural, las aleaciones a base de níquel son más caras y difíciles de soldar. Asimismo, los materiales de níquel resultan 20 veces más costosos que los materiales empleados en las calderas de las tecnologías actuales. Sin embargo, debido a la mayor eficiencia de los primeros, se espera que su período de recuperación sea de alrededor de 12 meses (Moss et al., 2013).

Se espera que las nuevas instalaciones de turbinas de gas emplearán aleaciones de níquel para la caldera y tuberías. Aunque las centrales vapor avanzadas ultra-supercríticas sólo han sido construidas en India y China, se considera serán la tendencia hacia el futuro en la región también.

3. Nuclear

Las necesidades de minerales clave incluyen cromo (2,19 kg/MW en 219), cobre (1,47 kg/MW), níquel (1,3 kg/MW), hafnio (0,5 kg/MW) e itrio (0,5 kg/MW) (Moss, 2011). Teniendo en cuenta la madurez de la tecnología, es poco probable que haya reducciones drásticas en la intensidad de uso de estos minerales en las próximas décadas (IEA, 2020). Las demandas anuales de indio (In), utilizado para las barras de control, y de uranio (U), para combustible, ha superado la producción anual actual de estos dos materiales (Ashby, 2013).

Actualmente existen 436 centrales nucleares en todo el mundo, de las cuales el 60% son reactores de agua a presión (PWR, por sus siglas en inglés) y el 21% son reactores de agua en ebullición (BWR, por sus

siglas en inglés) (Ashby, 2013). El 19% restante incluye reactores refrigerados por gas, como los antiguos reactores "CANDU" y otros reactores con diseños más avanzados. Lo más controversial acerca del uso de la energía nuclear a gran escala es el desafío de resolver el problema de gestión de los desechos radiactivos, que requieren una seguridad de almacenamiento por hasta 1.000 años. De esta manera, los reactores de agua ligera, PWR y BWR, dominan el mercado actual (más del 80% de todos los reactores en funcionamiento) y a futuro; además estas tecnologías comparten una intensidad mineral similar (IEA, 2020).

4. Transmisión

Los principales materiales empleados en la construcción de las líneas de transmisión es el aluminio (para las líneas aéreas de alta tensión), el cobre (para cables subterráneos y baja tensión), además del acero, hormigón para las estructuras aéreas y/o subterráneas. Además, el vidrio, plomo y estaño son empleados en la elaboración del aislamiento y las uniones. Las intensidades de materiales estimadas de cobre varían entre 11,7 toneladas/km (para los cables subterráneos de alta tensión) y 663 kg/km para cables de media tensión (Deetman y otros, 2021). El cobre es el único material (mineral) objetivo involucrado en la intensidad de materiales para líneas y cables de transmisión. Otros materiales incluyen el aluminio, (alrededor de 12.883 kg/km); el plomo (14.050 kg/km para cables subterráneos de alta tensión), el acero (hasta 52.266 kg/km) y otros materiales de construcción como el hormigón y el vidrio. Los valores de intensidad de materiales para transmisión fueron incluidos en el anexo 1.

E. Resultados de intensidad de materiales

La presente sección resume los resultados de las estimaciones propias de intensidad de materiales, realizadas conforme a lo definido en la sección A Metodología, para las principales tecnologías o, si corresponde, sub-tecnologías de generación eléctrica de la región. Para tecnologías con curvas de aprendizaje, es decir, que se espera varíen la composición de materiales a medida que evolucione la tecnología de manufactura, estos valores corresponden a las estimaciones a finales del 2020.

Los cuadros a continuación resumen los valores finales de las estimaciones de la intensidad de materiales para cada una de las tecnologías o sub-tecnologías existentes o planificadas en la región a 2020.

Cuadro 6
Intensidad de materiales – minerales objetivo
(En kg/kWnom)

Tecnología	Co	Cu	Li	Ni
Baterías ^a	0,158	0,582	0,197	0,249
Biomasa	0,068	0,762	0,000	0,042
Carbón	0,101	1,050	0,000	0,721
CSP-Parabólica	0,000	2,975	0,000	0,940
CSP-Torre	0,000	2,273	0,000	1,800
Eólica DD-EESG	0,000	5,000	0,000	0,340
Eólica DD-PMSG	0,000	7,895	0,000	0,240
Eólica GB-DFIG	0,000	1,959	0,000	0,527
Eólica GB-PMSG	0,000	0,950	0,000	0,440
Geotérmica	0,000	2,653	0,000	120,155
Gas	0,009	0,859	0,000	0,042
Hidro	0,000	1,067	0,000	0,031
Nuclear	0,000	0,727	0,000	0,493
FV-a-Si	0,000	2,410	0,000	0,000
FV-CdTe	0,000	2,410	0,000	0,000
FV-CIGS	0,000	26,600	0,000	0,000
FV-c-Si	0,000	2,439	0,000	0,001

Fuente: Elaboración propia.

^a Los valores para baterías se refieren en específico a baterías tipo ion-litio. Sin embargo, para efectos de cálculo de uso de materiales, se consideró el *market share* según se describe en la sección C.3. Baterías. Co = cobalto; Cu = cobre; Li = litio; Ni = níquel.

Cuadro 7
Intensidad de materiales – tierras raras objetivo
(En kg/kWnom)

Tecnología	Dy	Nd	Pr	Tb	Otras
Baterías	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Biomasa	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
Carbón	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CSP-Parabólica	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
CSP-Torre	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Eólica DD-EESG	0,0060	0,0280	0,0090	0,0010	0,0000
Eólica DD-PMSG	0,0170	0,1693	0,0350	0,0070	0,2390
Eólica GB-DFIG	0,0028	0,0930	0,0195	0,0039	0,0140
Eólica GB-PMSG	0,0060	0,0510	0,0040	0,0010	0,0000
Geotérmica	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Gas	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0001
Hidro	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
Nuclear	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0005
FV-a-Si	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
FV-CdTe	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
FV-CIGS	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
FV-c-Si	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Otras se refiere a otras tierras raras o casos de minerales donde la información no era específica. Dy = disprosio; Nd = neodimio; Pr = praseodimio; Tb = terbio.

Cuadro 8
Intensidad de materiales – otros minerales/materiales
(En kg/kWnom)

Tecnología	Hormigón	Acero	Al	Vidrios ^a	Polímeros
Baterías	0,0	1,04	0,40	0,0	0,50
Biomasa	89,2	33,40	1,10	0,0	0,00
Carbón	352,8	84,60	0,50	0,0	0,00
CSP-Parabólica	675,0	395,00	5,50	156,0	0,50
CSP-Torre	72,0	400,00	35,00	111,8	0,00
Eólica DD-EESG	369,0	132,00	0,70	0,0	4,60
Eólica DD-PMSG	500,0	209,75	1,75	0,0	10,11
Eólica GB-DFIG	422,5	113,17	1,90	0,0	9,71
Eólica GB-PMSG	413,0	107,00	1,60	0,0	4,60
Geotérmica	44,1	592,20	0,00	0,0	0,10
Gas	43,0	4,50	1,10	0,0	0,00
Hidro	2833,0	71,00	0,86	0,0	1,06
Nuclear	235,0	43,00	0,08	0,0	1,04
PV-a-Si	60,7	67,90	7,50	46,4	0,00
PV-CdTe	60,7	67,90	7,50	46,4	0,00
PV-CIGS	60,7	67,90	7,50	46,4	0,00
PV-c-Si	60,7	67,90	9,05	46,4	0,00

Fuente: Elaboración propia.

^a Los vidrios hacen referencia a materiales como fibras de vidrio, espuma de vidrio, cristales y otros; b los polímeros hacen referencia a materiales como PVC, plásticos, propilenos y otros; Al = aluminio.

De acuerdo con la revisión realizada, se observa que la demanda de tierras raras viene fundamentalmente de las distintas sub-tecnologías eólicas. Cada una de ellas en distintas proporciones, pero notablemente mayor para aquellas de imanes permanentes. Por ejemplo, para la misma capacidad nominal de motores de transmisión directa, es requerido 6 veces más Nd para un generador de imán permanente (DD-PMSG) que uno de excitación eléctrica (DD-EESG).

Mediante una simple inspección de los resultados de la intensidad de materiales, se observa que el mineral de mayor amplio uso es el cobre, debido a sus propiedades eléctricas. La tecnología eólica y solar son, en general, más intensivas en cobre que las tecnologías convencionales. Lo mismo aplica también para el níquel, para el cual su uso, de acuerdo con lo revisado en la sección C, puede intensificarse su uso a medida que se desarrollen nuevas superaleaciones.

La demanda litio, para la transición energética, está determinada fundamentalmente por las proyecciones de uso de baterías en sus 3 aplicaciones: EV, escala industrial (red) y generación distribuida. Los escenarios proyectan hasta 100% de baterías litio-ion del *market share* a futuro para 140 millones de vehículos eléctricos al 2030. Las baterías, sin embargo, pueden ser consideradas como la tecnología "menos madura", considerando la variedad y alternativas aun en estudio (ejemplo, las baterías de litio-metal o de litio-azufre) y, por lo tanto, no existe un consenso acerca de las proyecciones del *market share* sub-tecnológico.

III. Materiales para la transición energética en América Latina

A partir de las estimaciones de las intensidades de materiales para cada tecnología (o sub-tecnología) de generación de electricidad presentadas en el capítulo anterior, a continuación, se proyectan los requerimientos de materiales para la construcción de centrales eléctricas en la región de América Latina para dos escenarios de transición energética.

Al respecto, cabe destacar que los desafíos para proyectar el uso de materiales para la construcción de las centrales eléctricas de distintas fuentes (tecnologías o sub-tecnologías) de acuerdo con los planes de expansión de cada país de América Latina son:

- El tipo y la cantidad de material puede ser específico de las tecnologías (o sub-tecnologías).
- La diferencia de los cronogramas de los planes de expansión de los países.
- La no uniformidad en los criterios de expansión de los planes.

Para superar estas diferencias, se cita, como plan de expansión de la región, el resultado del trabajo realizado en el marco del programa de Complementariedad Energética y Desarrollo Sostenible (ECOSUD). Las fuentes de información y la metodología de expansión de capacidad de generación e interconexión eléctrica son únicas y uniformes. ECOSUD logró compilar las fuentes de información más recientes de los sistemas de potencia actuales y de los planes de expansión nacionales, y los integró en un ejercicio centralizado de expansión óptimo.

A. Programa de expansión integrado

El objetivo del programa ECOSUD es de proporcionar una visión actualizada de la planificación y operación a largo plazo del sistema eléctrico de América del Sur, no sólo como sistemas interconectados nacionales, sino como parte integral de la red eléctrica continental integrada de esta subregión, que puede aprovechar la vasta diversidad y complementariedad de los recursos disponibles. La estrategia de planificación del sistema de energía dentro del ECOSUD se basa en las experiencias de aprendizaje y el marco de simulación desarrollado como parte del proyecto de estudio de América Latina "Grid of the Future" (Bank, 2018). En términos de modelado, herramientas y recursos técnicos, la sección de planeamiento energético del ECOSUD

debe considerarse una extensión de su predecesora. El área de estudio se ilustra en el mapa 1. El alcance geográfico de los resultados de la expansión de capacidad del ECOSUD y, por lo tanto, del cálculo de uso de materiales en la presente sección, se refieren a todos los países de América del Sur, lo que se considera representa una muestra de la región y permite una aceptable aproximación de la situación y las perspectivas de expansión de la capacidad de generación e interconexión eléctrica a nivel de América Latina.

El ejercicio de expansión óptima de la capacidad de generación y transmisión, realizado como parte del ECOSUD, fue planteado y resuelto para 3 escenarios diferentes: un escenario base y dos optimistas. Las características más relevantes de cada uno de los escenarios se resumen a continuación:

- i) Escenario base (con baja penetración de energías renovables, baja integración de transmisión intrarregional). El escenario base considera una trayectoria de “usual” para satisfacer la demanda proyectada al 2032. Este escenario refleja las tendencias actuales en el despliegue de energía renovable y ninguna integración de transmisión regional adicional. No se definen objetivos generales de generación renovable; se permite la construcción óptima de candidatos de generación con límites anuales por país; la construcción de nuevas interconexiones de transmisión se limita a una lista reducida de proyectos candidatos en firme.
- ii) Escenario de energías renovables (RE) (optimista, con alta penetración de energías renovables, baja integración de transmisión intrarregional). El escenario RE incorpora una alta proporción de generación de energía renovable en la región para 2032 (objetivo del 80%) pero mantiene las interconexiones iguales que en el escenario base. Los límites anuales de construcción de generación por país van aumentando cuidadosamente al final del horizonte de planificación, y la construcción de nuevas interconexiones de transmisión se limita a una lista reducida de proyectos candidatos firmes.
- iii) Escenario de energías renovables conectadas (CORE) (optimista, con alta penetración energías renovables, alta integración de transmisión intrarregional). El escenario CORE incorpora de manera rentable una alta proporción de generación de energía renovable en la región al 2030 (objetivo del 80%), y un alto grado de interconexión intrarregional que permite, de manera rentable, una mejor integración de energías renovables. Además de los supuestos en el escenario RE, todos los candidatos de interconexión de transmisión se pueden construir de manera óptima en este escenario. Estos candidatos pertenecen a una lista de proyectos que han sido evaluados o planteados en alguna oportunidad por los reguladores u otros agentes oficiales de los países (ejemplo, Proyecto de Interconexión Eléctrica Arco Norte⁸).

Mapa 1
Mapa ilustrativo del alcance del estudio ECOSUD



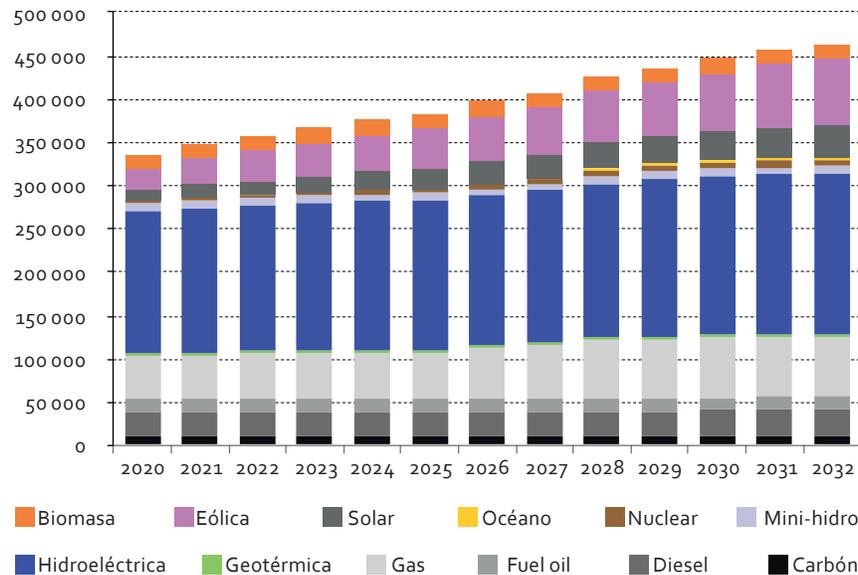
Fuente: Elaboración propia.

⁸ <https://publications.iadb.org/en/publication/12517/arco-norte-electrical-interconnection-study#sthash.LYGK0t5.dpuf>.

Notar que las proyecciones del escenario intermedio RE han sido excluidas del alcance del presente estudio dados los beneficios adicionales, con una menor inversión de capital, que tendría el CORE⁹.

En los gráficos a continuación, se observa que, en los escenarios base y CORE, las tecnologías que predominan en las adiciones de capacidad de generación eléctrica instalada y, por lo tanto, de costo de desarrollo en América del Sur son, fundamentalmente, renovables solares y eólicas. Es posible que el mejor costo nivelado de la región pertenezca aún a las centrales hidroeléctricas convencionales. Sin embargo, otros factores, distintos de los netamente técnico-económicos, limitan la expansión de esta tecnología. Por ejemplo, la creciente resistencia social por la construcción de estas centrales hace que los proyectos de expansión de esta tecnología se limiten únicamente a aquellas iniciativas oficiales en construcción.

Gráfico 1
América del Sur: proyección de la capacidad de generación instalada en el escenario base, desagregada por fuente, 2020-2032
(En MW nominales)



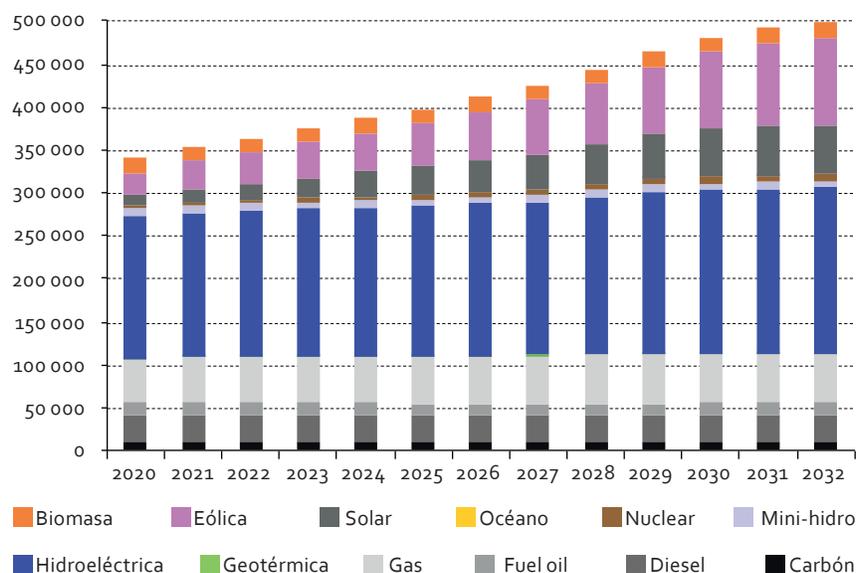
Fuente: Elaboración propia sobre la base de los resultados del programa ECOSUD-Brasil-Chile.

La expansión de la capacidad eléctrica de América Latina, tomando como base del análisis los países de América del Sur, está guiada fundamentalmente por fuentes renovables solares y eólicas. Para el 2032, aproximadamente 26 GW y 50 GW de nueva generación solar FV y eólica, respectivamente, son requeridas en el escenario base. Los restantes 46 GW de expansión, se compone fundamentalmente de generación hidroeléctrica, termoeléctrica a gas, y en menor grado geotérmica y biomasa.

En el escenario CORE, que aprovecha la complementariedad de los recursos de la región, la instalación de generación solar FV y eólica es de 44 GW y 75 GW, respectivamente. Los restantes 36 GW de expansión, tienen una distribución similar al caso de base entre tecnologías hidroeléctricas, termoeléctrica a gas, y en menor grado geotérmica y biomasa.

⁹ De acuerdo con CEPAL (2020), los requerimientos de inversión de capital (en infraestructura y mantenimiento) en el escenario CORE son menores a los del RE y base. Además, el CORE respecto al RE, si bien tendría un impacto similar en el empleo directo y el desarrollo de capacidad de generación eléctrica con energía renovable, presentaría el beneficio adicional de la interconexión intrarregional que tiene efectos positivos para la seguridad energética y la gestión de la variabilidad e intermitencia de las fuentes renovables.

Gráfico 2
América del Sur: proyección de la capacidad de generación instalada en el escenario CORE,
desagregada por fuente, 2020-2032
(En MW nominales)



Fuente: Elaboración propia sobre la base de los resultados del programa ECOSUD-Brasil-Chile.

El programa de expansión de ECOSUD considera solamente la expansión de las interconexiones intrarregionales. La expansión de cada país se considera de acuerdo con cada plan de expansión nacional. Es decir, no se cuenta con una estimación uniforme para el programa de ampliación de transmisión de cada país. Sin embargo, se estima que en América del Sur existen en la actualidad, a 2020, aproximadamente 234.800 km de líneas de alta tensión, de los cuales 160 mil km corresponden al sistema de transmisión de 220 kilovoltio (kV) y superior de Brasil (EPE, 2021). En la proyección de la expansión de transmisión de Brasil se estima que se requiere apropiadamente 3.745 km de nuevas líneas de alta tensión por año. Pero, empleando los factores de distribución de la transmisión calculados en Deetman y otros (2021) se estima que el sistema eléctrico de Brasil requiera un total de 59.650 km de nuevas líneas por año en sus 3 segmentos (alta, media y baja tensión). De forma similar, empleando la información sobre la infraestructura de distribución de la transmisión en Deetman y otros (2021) y extrapolando al resto de la región, sobre la base de observaciones satelitales, proyectos colaborativos de mapas editables y libres (como openstreetmap.org) y otras fuentes masivas de información geo-referenciada, se estima que más de 62.800 mil km de nuevas líneas de transmisión de alta tensión se requieren por año para la integración de los planes de expansión de los países de la región.

Cuadro 9
América del Sur: dimensionamiento físico del sistema de transmisión en el escenario CORE,
desagregado por nivel de tensión, 2020-2032
(En km)

País (región)	Alta tensión		Media tensión		Baja tensión	
	Existente	Expansión (2032)	Existente	Expansión (2032)	Existente	Expansión (2032)
Brasil	158 892	44 945	252 904	71 537	2 118 878	2 118 878
Resto de América del Sur	75 933	1 790	229 316	5 405	1 678 108	39 556
Total América del Sur	234 825	46 735	482 220	76 943	3 796 987	2 158 435

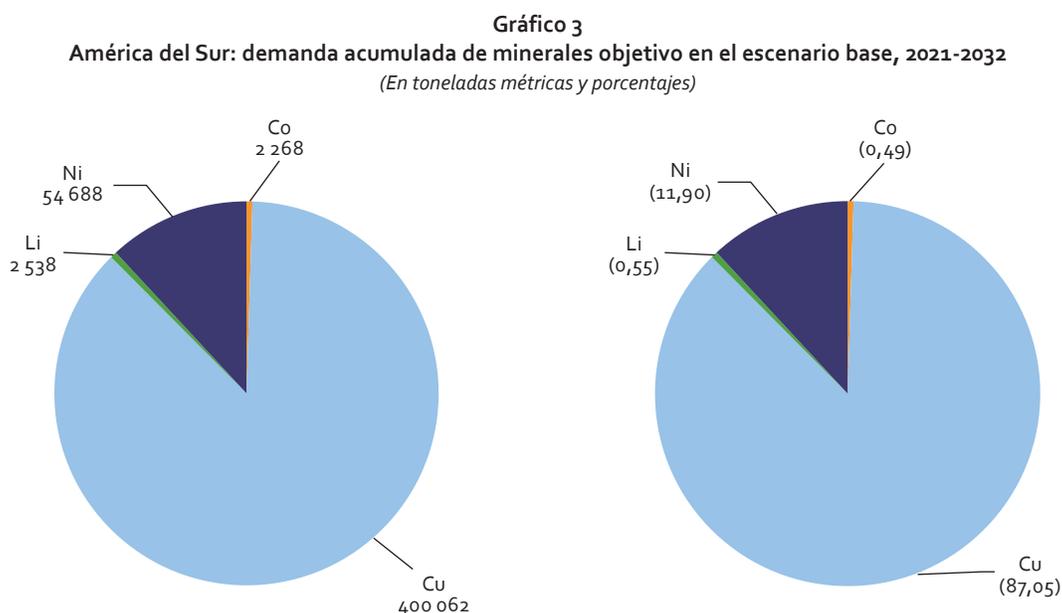
Fuente: Elaboración propia.

B. Demanda de materiales

En función de las estimaciones de intensidad de materiales y de los resultados de la expansión presentados en la sección anterior, se realiza la siguiente estimación de demanda de materiales para la región.

1. Escenario base de expansión

Se observa en el gráfico 3 que la demanda de cobre y níquel liderarían los requerimientos de minerales objetivo de la región conforme al escenario base de expansión. Más de 400 mil toneladas (kt) de cobre resultan de la expansión de la capacidad de generación de la región. El requerimiento de níquel calculado es de 54 kt y se justifica a partir de las superaleaciones de alta temperatura empleadas en las tecnologías geotérmicas y térmicas modernas a gas natural super-críticas. El aumento progresivo de la demanda de otros minerales y tierras raras objetivo, como cobalto, litio, y terbio, se justifican a partir del aumento de las tecnologías renovables solar, eólica y de las baterías¹⁰, en la matriz energética de la región.



Fuente: Elaboración propia.

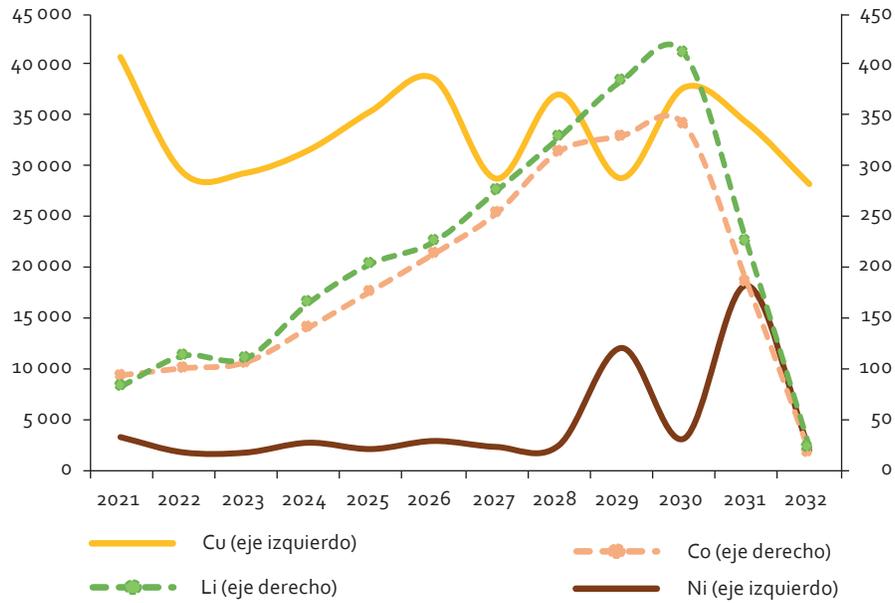
La evolución anual del requerimiento de minerales objetivo, como se observa en el gráfico 4, es relativamente estable para el cobre, que se sitúa en el rango de 30 a 40 kt. Los minerales de cobre y níquel se encuentran en el rango de 5 kt por año hasta 2028, para luego aumentar. Los valores de los otros minerales y tierras raras objetivo, como cobalto, litio y terbio, aumentan a medida que la expansión se centra en el aumento de capacidad instalada de las energías renovables. El decrecimiento del requerimiento de materiales en el último año de evaluación se justifica debido al efecto de "fin de horizonte" de las simulaciones en donde el tiempo de recuperación de inversión es tan corto que las inversiones se contraen¹¹.

El requerimiento de cobre, por su parte, parece "independiente" de la tecnología de expansión. Como se observa en el gráfico 5, la componente de la demanda de cobre por distintas tecnologías varía, pero el total se mantiene en torno a las 35 kt por año.

¹⁰ Se incluyen baterías a nivel industrial solamente.

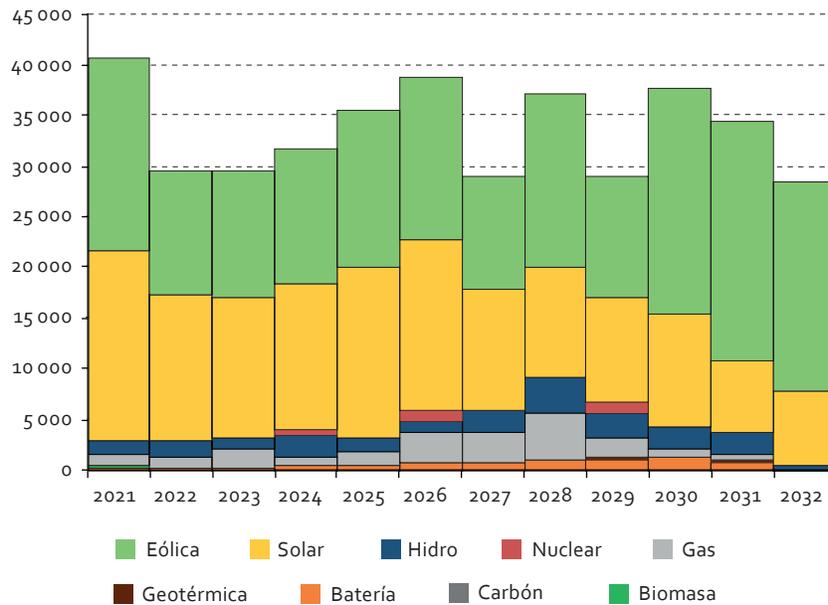
¹¹ De igual forma se empleó la técnica de "perpetuidad" en donde la tasa de retorno se ajusta para simular el resto de la vida económica de las inversiones.

Gráfico 4
 América del Sur: evolución de la demanda de minerales objetivo en el escenario base, 2021-2032
 (En toneladas métricas)



Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 5
 América del Sur: evolución de la demanda de cobre en el escenario base, desagregada por fuente de energía, 2021-2032
 (En toneladas métricas)

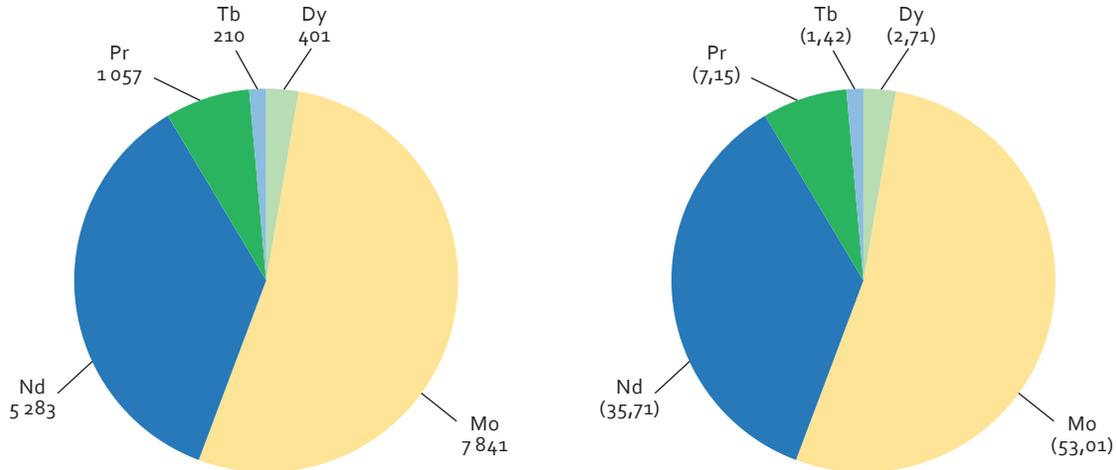


Fuente: Elaboración propia.

La demanda de tierras raras objetivo, empleadas fundamentalmente para la construcción de imanes permanentes (en los generadores eólicos) y superaleaciones, muestra que, aunque en menor escala, sí representan una parte importante de los materiales necesarios de construcción. El total de las tierras raras,

que incluye al molibdeno (Mo) para las proyecciones del escenario base, es de 18.640 toneladas. Se ha incluido dentro de la lista al molibdeno, a pesar de no pertenecer al mismo grupo de elementos químicos denominados "tierras raras", debido a las similitudes de concentración de reservas y actividad minera en la actualidad. El mineral más demandado en esta categoría es el disprosio (Dy), seguido por el mismo molibdeno. Estos dos concentran cerca de tres cuartos de la demanda de tierras raras para la expansión de generación eólica proyectada para la región.

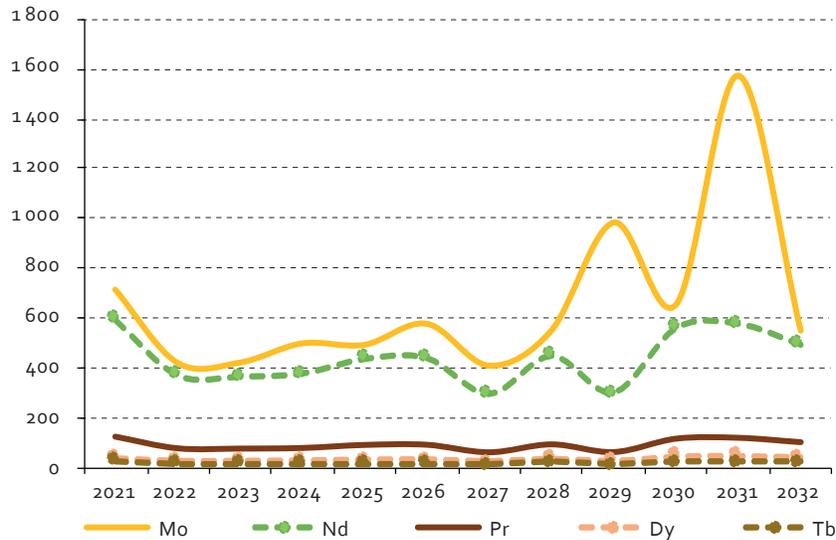
Gráfico 6
América del Sur: demanda acumulada de tierras raras objetivo en el escenario base, 2021-2032
(En toneladas métricas y en porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: El molibdeno (Mo) no pertenece al grupo de tierras raras y se categorizó como otros minerales en el capítulo I pero se presenta junto a estas.

Gráfico 7
América el Sur: evolución de la demanda de tierras raras objetivo en el escenario base, 2021-2032
(En toneladas métricas)



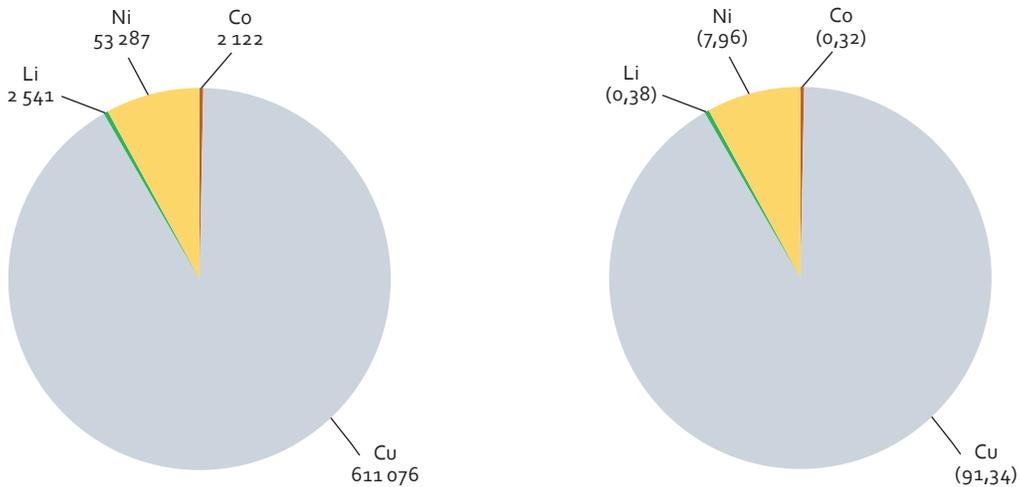
Fuente: Elaboración propia.

Nota: El molibdeno (Mo) no pertenece al grupo de tierras raras y se categorizó como otros minerales en el capítulo I pero se presenta junto a estas.

2. Escenario CORE de expansión

Se observa que, para el escenario CORE, las proporciones se mantienen similares a las del escenario base. Sin embargo, las cantidades en general aumentan. La demanda total de cobre aumenta a 611 kt, en comparación a las 400 kt del escenario base. Las demandas de otros minerales objetivo se mantienen parecidas al del escenario base.

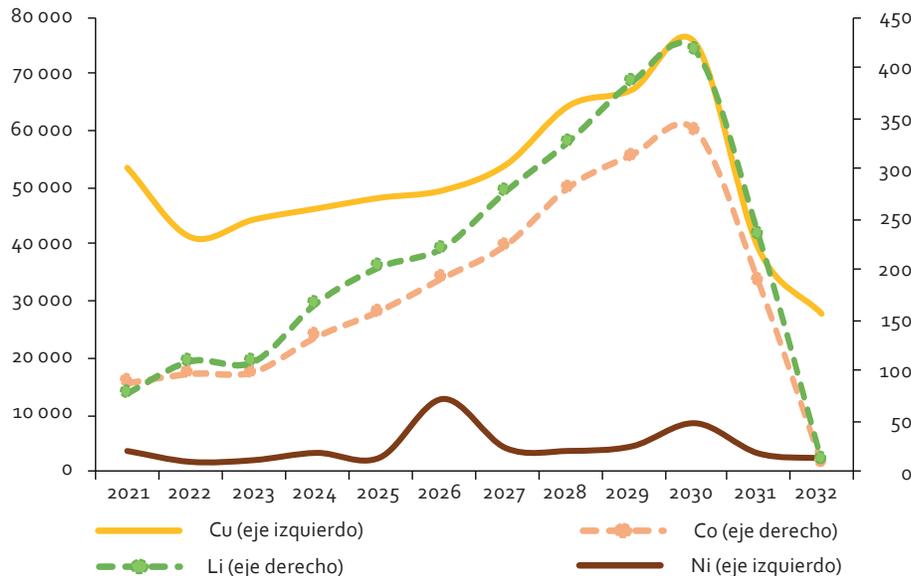
Gráfico 8
América del Sur: demanda acumulada de minerales objetivo en el escenario CORE, 2021-2032
(En toneladas métricas y en porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

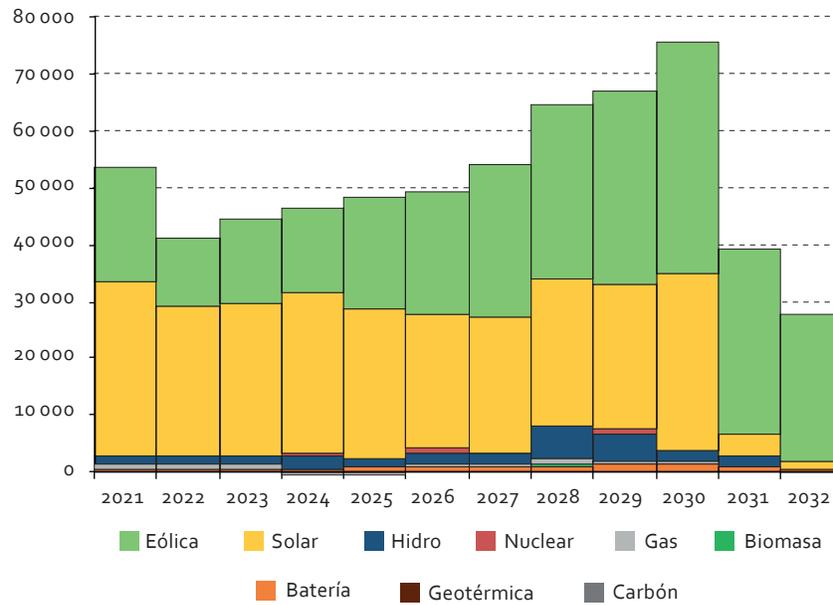
Se observa que la demanda de minerales objetivo tendría un crecimiento alrededor de 2030. Esto se debe a que en el ejercicio de expansión de capacidad integrada se establecen objetivos de participación de renovables para ese año y, conforme a la compleja estructura de costos y operación del sistema eléctrico, la solución óptima indicaría el "retraso" de las inversiones hasta madurar los costos y la industria local de estas tecnologías. Es decir, concentrar las mayores inversiones en renovables cercanas a este año objetivo.

Gráfico 9
América del Sur: evolución de la demanda de minerales objetivo en el escenario CORE, 2021-2032
(En toneladas métricas)



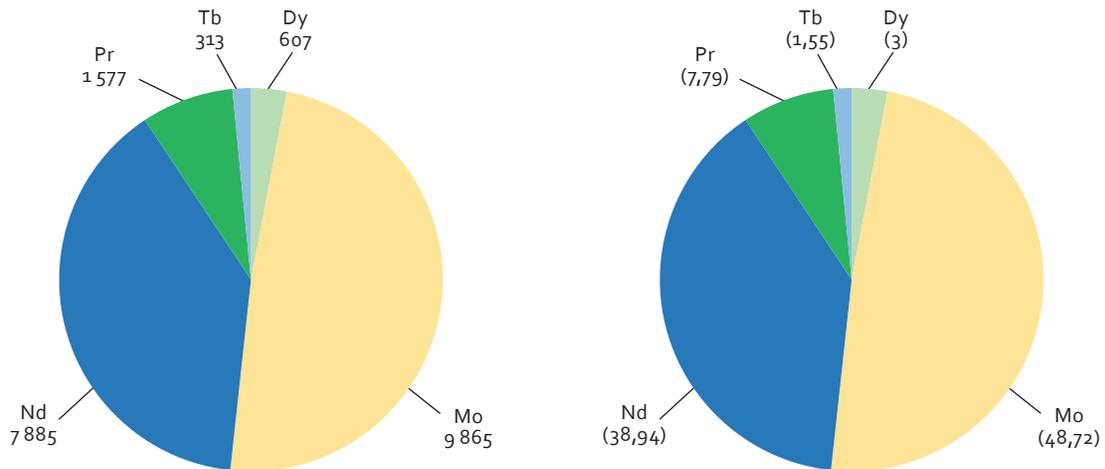
Fuente: Elaboración propia.

Gráfico 10
América del Sur: evolución de la demanda de cobre en el escenario CORE, 2021-2032
 (En toneladas métricas)



Fuente: Elaboración propia.

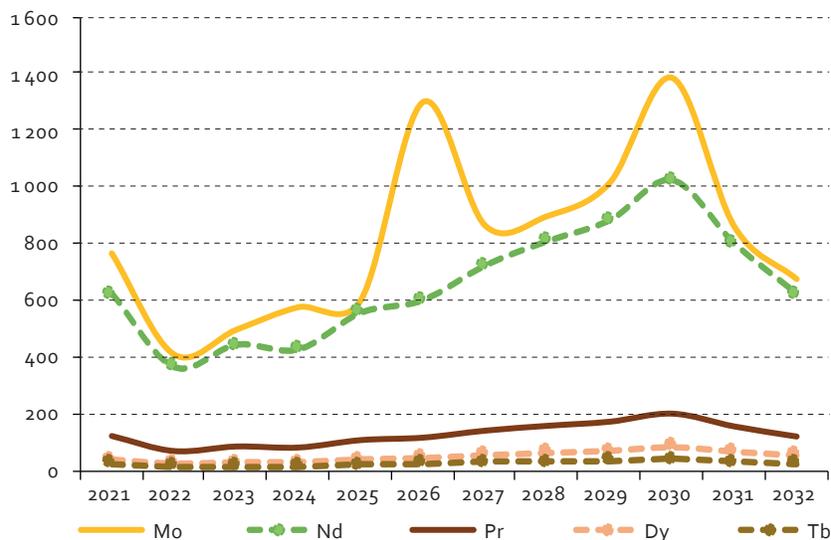
Gráfico 11
América del Sur: demanda acumulada de tierras raras objetivo en el escenario CORE, 2021-2032
 (En toneladas métricas y en porcentajes)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: El molibdeno (Mo) no pertenece al grupo de tierras raras y se categorizó como otros minerales en el capítulo I pero se presenta junto a estas.

Gráfico 12
América del Sur: evolución de la demanda de tierras raras objetivo en el escenario CORE, 2021-2032
 (En toneladas métricas)



Fuente: Elaboración propia.

Nota: El molibdeno (Mo) no pertenece al grupo de tierras raras y se categorizó como otros minerales en el capítulo I pero se presenta junto a estas.

3. Redes de transmisión

El programa de expansión ECOSUD considera en su escenario CORE la posible expansión de las interconexiones intrarregionales que se consideran viables, desde un punto de vista técnico, y óptimas, desde un punto de vista de la planificación centralizada de la región. Sin embargo, la expansión de la transmisión interna de cada país no se encontraba dentro de los objetivos del programa. Por lo tanto, no hay estimaciones de expansión de transmisión a nivel nacional desde dicha fuente. Sin embargo, como se explica en la sección "A Programa de expansión integrado" se hizo una estimación basada en observaciones satelitales, proyectos colaborativos de mapas editables y libres (como [openstreetmap.org](https://www.openstreetmap.org)) y otras fuentes masivas de información geo-referenciada.

Aplicando una metodología basada en Deetman y otros (2021), se estima que la expansión del sistema de transmisión de alta tensión de América del Sur entre 2020 y 2032 requerirá una adición de 63 mil km, que demandarán 7 kt de cobre, 802 kt de aluminio y 9 kt de plomo. Los valores incluyen la construcción de torres, anclajes y otros elementos. Utilizando la metodología propuesta por Carrara y otros (2020), se estima que la construcción de 1.062 subestaciones y 3.343 unidades de transformación de potencia que, empleando valores de densidad de cobre en transformadores modernos de 100 mega voltio-amperios (MVA), requieran unas 142 kt adicionales de cobre. El total de cobre estimado, de 149 kt, sólo considera el sistema de potencia de alta tensión. Se han excluido valores de media y baja tensión debido a la complejidad de su estimación, ya que la especificidad de cada país hace que las estimaciones mediante valores estándares puedan resultar imprecisas.

Cuadro 10
América del Sur: demanda de materiales para el sistema de transmisión de alta tensión
en el escenario CORE, 2020-2032
(En miles de toneladas métricas)

Material	Líneas transmisión AT	Subestaciones	Transformadores	Total	Promedio anual
Hormigón	9 314	132	2 166	11 612	968
Acero	2 326	16	990	3 331	278
Al	573	35	2	610	50,8
Cu	5	5	137	147	12,2
Pb	6	0	-	6	0,5
Vidrio	49	-	-	49	4,1

Fuente: Elaboración propia sobre la base de la metodología aplicada por Deetman y otros (2021).

IV. Materiales para la transición energética de América Latina en el contexto mundial

Habiendo presentado los requerimientos de materiales objetivo (comprendidos, según la categorización, minerales objetivo, tierras raras objetivo, otros minerales y otros materiales) para los escenarios de expansión de la capacidad de generación eléctrica de América Latina (sobre la base de los países de América del Sur incluidos en la muestra), en este capítulo, se intenta determinar si la región podría cubrir esta demanda de materiales objetivo con parte de su producción. Es una aproximación hipotética dado que la capacidad de producción que se puede tener de un determinado mineral no está directamente relacionada al nivel de reservas que se dispone, sino que hay muchos otros factores que determinan que la exploración y explotación se lleven a cabo y de manera exitosa. Además, producir el mineral, la materia prima o los subproductos, no asegura que se destinen a la manufactura de componentes o productos para la construcción de las tecnologías (o sub-tecnologías) requeridas para los escenarios de expansión.

Los países de América Latina en su conjunto poseen reservas de minerales que permiten teóricamente cubrir las necesidades de materiales objetivo como cobre, níquel, molibdeno y litio. En general y como se analizará, sí existe capacidad de producción de minerales en la región. Sin embargo, otros materiales como cobalto y algunas tierras raras son marginalmente explotados, las reservas son limitadas y dependen de influencias externas. A continuación, se revisan cada una de las demandas de estos materiales objetivo en el contexto mundial.

A. Cobre

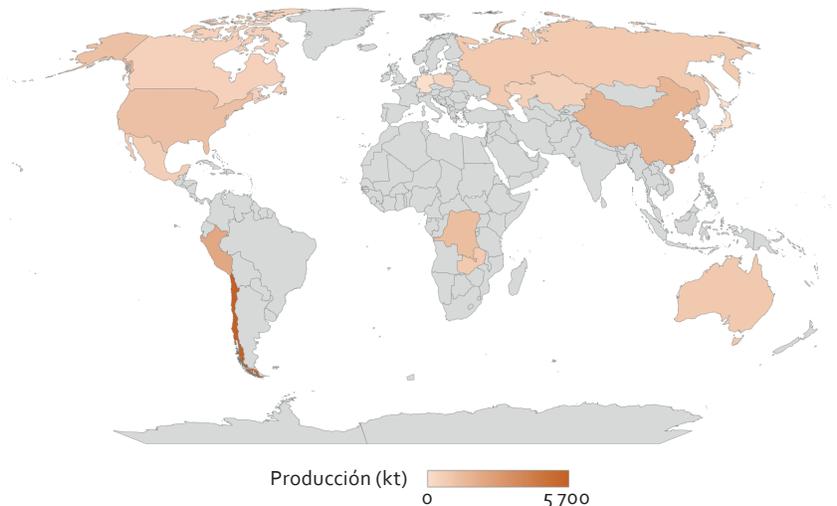
El cobre es uno de los minerales más importantes en el sector energético debido a las bondades de sus propiedades eléctricas. Como referencia, la conductividad volumétrica del aluminio es aproximadamente el 62% de la del cobre. Es el mineral presente en todas las tecnologías de generación, tanto convencionales como renovables, y es empleado para transmisión, transformación y distribución de electricidad, así como en maquinaria y equipo industrial y residencial.

Cuadro 11
Demanda de cobre en el contexto de producción mundial

Necesidad	Producción
De acuerdo con los escenarios de expansión (base y CORE), se proyecta que la demanda de cobre anual estaría en promedio entre 33 kt y 36 kt. Esto incluye el material necesario para la construcción e instalación de nuevas centrales eléctricas. Además, la necesidad de adaptación de los sistemas de transmisión de alta tensión requiere de aproximadamente 12,2 kt de cobre adicionales para cubrir los 76 mil km de nuevas líneas y las 3.343 unidades de transformación de potencia.	La producción actual de cobre en la región es liderada por Chile, con una producción estimada de 5.700 kt anuales, seguido de Perú con una producción de 2.200 kt. En la actualidad, cerca del 7% de la producción de cobre es destinada a la industria de energía, por lo que estos 2 países combinados producen 553 kt, lo que permitiría abastecer la demanda de mineral por los próximos 12 años. Sin embargo, es de recordar que Chile es el principal productor mundial (29% de la producción mundial) y que su capacidad de producción, contando proyectos firmes únicamente, no se espera varíe en los próximos 10 años (Jones y otros, 2021).

Fuente: Elaboración propia.

Mapa 2
Mundo: principales países productores de cobre, 2020



Fuente: Elaboración propia sobre la base de USGS (2021).

En cuanto al reciclaje, se estima que la tasa de reciclaje del cobre se encuentra entre el 43% y 53%. Sin embargo, el contenido efectivamente reutilizado en productos nuevos es del 20% - 37% (World Bank, 2020). Según cifras de IRENA (Gielen, 2021), en 2018 se procesaron para reciclado alrededor de 8,5 millones de toneladas (Mt) de cobre de productos al final de su vida útil. Pero, se estima que solo 4,0 Mt fueron reutilizados para la producción de otros productos. Queda una gran brecha entre las 13 Mt de cobre que se produjeron en 2018 y las 4 Mt que en realidad se estima fuera reutilizadas. Mayores tasas de recuperación de chatarra reducirán la necesidad de extraer el mineral. Actualmente, en algunos países, la tasa de recolección de reciclables del cobre alcanza el 90% (World Bank, 2020).

B. Cobalto

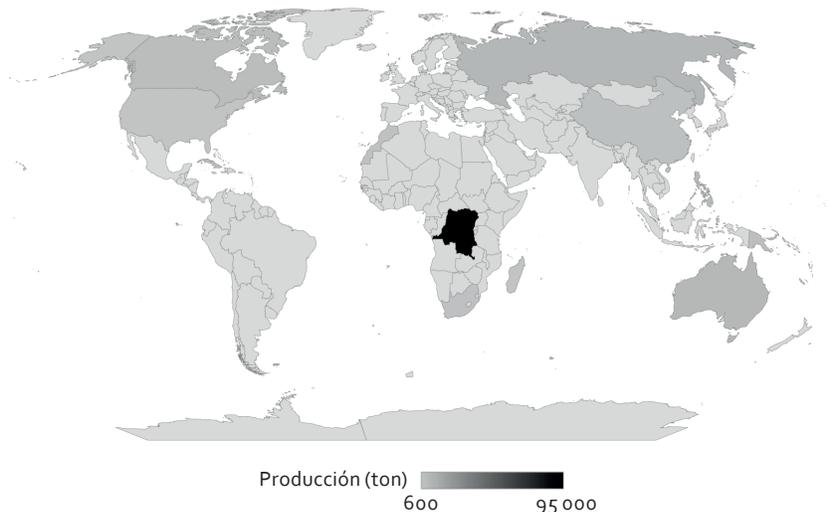
Las baterías serán el campo principal de aplicación del cobalto en el futuro (Gielen, 2021). Alrededor del 62% de todo el cobalto se usó para baterías ion-litio en 2020 (USGS, 2021). La mayoría del cobalto producido en la actualidad es un subproducto de la minería de cobre y níquel. Dado que se prevé que la demanda de cobalto crezca relativamente mucho más rápido que la demanda de níquel y cobre, se necesitarán avances en la minería. Aunque las reservas de cobalto se encuentran en todo el mundo, se concentran en el cinturón de cobre de África Central, con más del 50% de las reservas y del 60% de la producción global en un solo país: la República Democrática del Congo (USGS, 2021).

Cuadro 12
Demanda de cobalto en el contexto de producción mundial

Necesidad	Producción
<p>La proyección de la demanda de cobalto de la región es relativamente baja en comparación a otras regiones del mundo, como Asia, América del Norte o Europa, cuyo desarrollo de baterías ion-litio es mucho mayor. Esto, debido a diversos factores, algunos relacionados a la industria y la cadena de valor de las baterías, otros a los mercados que sirven, y también al tipo y grado de apoyo y promoción para el desarrollo de baterías y vehículos eléctricos. Se proyecta un promedio anual de 189 t de demanda de cobalto, de las cuales el 89% sería destinado a baterías a nivel industrial. El 11% restante sería empleado en superaleaciones de nuevas turbinas de gas y de ciclos combinados.</p>	<p>Actualmente la producción de cobalto de la región, representada por Cuba —que no ha sido parte del estudio—, comparte menos del 3% de la producción global. La concentración de la producción en la República Democrática del Congo, con más del 60%, y en un número pequeño de productores, crea preocupaciones a nivel mundial debido a la baja estabilidad política del país. Además, se estima que, en este país, las reservas representan más del 50% de las reservas mundiales, esto es, 3.600 kt (USGS, 2021).</p>

Fuente: Elaboración propia.

Mapa 3
Mundo: principales países productores de cobalto, 2020



Fuente: Elaboración propia sobre la base de USGS (2021).

En cuanto a su reemplazo, el contenido de cobalto en las baterías ion-litio (el principal destino del cobalto a nivel mundial en la actualidad) se ha visto reducido en las últimas tendencias tecnológicas en desarrollo, abriendo paso a posibles sustitutos libres de cobalto que utilizan hierro y fósforo. Asimismo, posibles sustitutos en otras aplicaciones, como en imanes, incluyen ferritas de bario o estroncio, aleaciones de neodimio-hierro-boro, o níquel-hierro.

Por otra parte, se estima que el 68% de los productos que contienen cobalto, que alcanzaron su final de vida útil, son procesados para reciclado; sin embargo, sólo un 32% del total original puede ser efectivamente reutilizado (World Bank, 2020).

C. Níquel

En la industria de energía de la actualidad, el níquel se utiliza principalmente para la producción de acero inoxidable y otras aleaciones anticorrosivas. El uso intensivo del níquel está relacionado a la necesidad de tuberías de alta presión y temperatura para tecnologías actuales y futuras de centrales termoeléctricas a gas natural y geotérmicas. De hecho, las centrales geotérmicas tienen la mayor intensidad de material de todas las tecnologías revisadas en el documento.

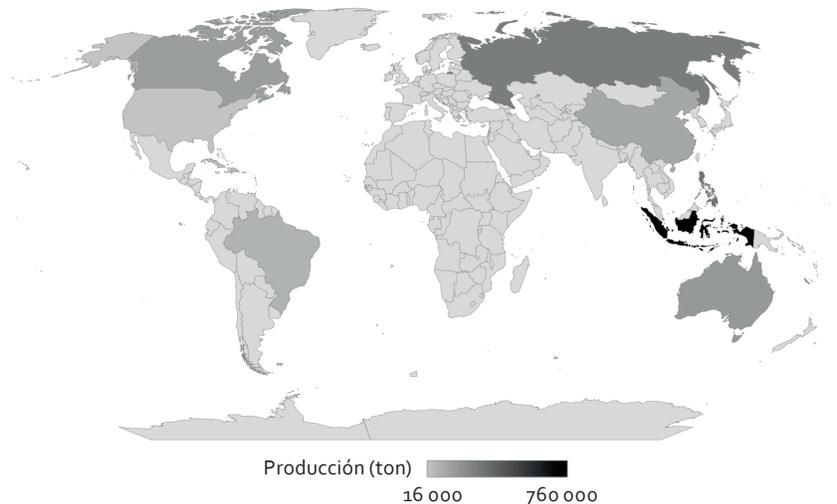
Actualmente se están desarrollando más de 2.000 proyectos mineros en el mundo, donde el níquel es el producto principal o un subproducto (USGS, 2021). De estos proyectos, 300 se encuentran ya en operación. Se extrajeron aproximadamente 2,54 Mt de níquel de minas subterráneas y a cielo abierto en 27 países en seis continentes en 2019. Las principales regiones productoras de níquel fueron Asia Sudoriental y Oceanía con un total del 60% de la producción mundial.

Cuadro 13
Demanda de níquel en el contexto de producción mundial

Necesidad	Producción
<p>La proyección de la demanda anual de níquel de la región es de 4.785 t en promedio para 2020-2030. Este valor es sensible a la selección de tecnologías de expansión de la capacidad instalada que hagan uso del gas natural como fuente principal. Además, la expansión de centrales geotérmicas en el programa ECOSUD es relativamente prudente debido fundamentalmente a los elevados costos de inversión (no así su potencial). Los valores proyectados podrían incrementarse, incluso en forma drástica en el más largo plazo, si se incorporan tecnologías más eficientes que hacen uso de muy alta temperatura, como las centrales geotérmicas, térmicas solares (CSP) y termoeléctricas de vapor supercríticas.</p>	<p>Brasil fue el noveno productor de níquel en 2020, con 73 kt, pero se ubica en el tercer lugar en reservas, con 16 Mt. Pero, Cuba y República Dominicana, también se destacan por su producción en el ranking mundial de productores de níquel, sumando en conjunto 96 kt en 2020. La principal preocupación en el abastecimiento de níquel es el constante aumento de su demanda en el sector energético. Se estima que para el 2050, la demanda de sólo el sector de energía representará el 99% de la producción actual de níquel (World Bank, 2020).</p>

Fuente: Elaboración propia.

Mapa 4
Principales productores de níquel a nivel mundial



Fuente: Elaboración propia sobre la base de USGS (2021).

El níquel en forma de aleación se recupera del procesamiento de desechos (chatarra) que lo contienen, como, por ejemplo, viruta de molienda, cascarilla de laminación y granalla generada durante la fabricación de acero inoxidable pero también soluciones de enchapado; catalizadores usados, y todo tipo de baterías usadas que contienen este mineral. Las aleaciones que contienen níquel y la chatarra de acero inoxidable también se pueden fundir y reutilizar para producir nuevas aleaciones y acero inoxidable. Según (USGS, 2021), en 2020, el níquel reciclado en todas sus formas representó aproximadamente 50% del consumo aparente de Estados Unidos. Sin embargo, la reutilización efectiva del níquel se estima en el rango de 29%-41% (World Bank, 2020).

D. Litio

El principal campo de aplicación del litio en el sector energético es en la fabricación de baterías. Se espera que en este campo haya un fuerte aumento de la demanda del mineral debido a las múltiples tecnologías actualmente en desarrollo que requieren baterías (desde equipos de comunicación pasando por sensores hasta medios de transporte, de pasajeros o carga, en sus distintas modalidades). Bloomberg (2021) proyecta el consumo de litio en el rango de 240 kt-375 kt para 2030, con una tasa de crecimiento de 3-5 veces mayor que los niveles actuales. Si bien señala que uno de los principales impulsores del aumento proyectado de la demanda de litio es el uso de vehículos eléctricos, estos no están incluidos en el presente análisis (solo baterías a nivel industrial).

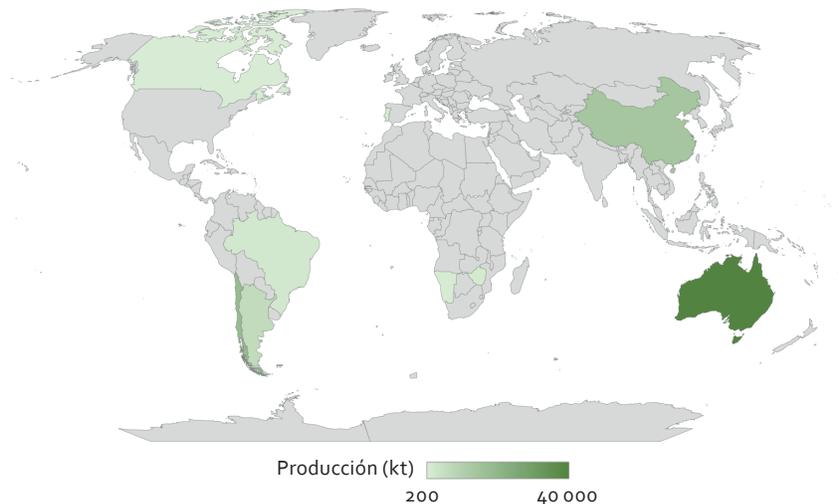
Cuadro 14
Demanda de litio en el contexto de producción mundial

Necesidad	Producción
<p>La proyección de la demanda de litio anual para baterías a nivel industrial de la región, pertenecientes al sistema eléctrico de potencia, sin contar generación distribuida, aumentará desde 81 t a 411 t. Este valor es conservador respecto a la proyección mundial de demanda de litio para todos los sectores energéticos. Sin embargo, si bien estas proyecciones son conservadoras, fundamentalmente por los costos de inversión proyectados en el programa ECOSUD (2017), se espera que en la región la demanda del mineral experimente un aumento de 5 veces al 2030, lo que es coincidente con las proyecciones de Bloomberg a nivel global (BloombergNEF, 2021). A nivel mundial, se espera que la demanda de productos de litio, para los distintos sectores de aplicación, crezca más de 1,3 millones de toneladas entre 2019 y 2030, siendo la electromovilidad el 80% del destino del litio (B. Jones, 2021).</p>	<p>Chile es el segundo productor de litio en el mundo, seguido por Argentina y Brasil, en el cuarto y quinto lugar, respectivamente. En total, estos 3 países producen 26 kt de litio al año, lo que representa el 32% de la producción mundial. En cuanto a las reservas de litio, Chile tiene las mayores reservas globales, estimadas en 8,6 Mt (más del 50% de las reservas a nivel global) (USGS, 2021). La producción de carbonato de litio a partir de salares representa alrededor del 40 % de la producción mundial (Argentina, Bolivia y Chile), y esto se complementa con la producción a partir de recursos basados en roca —mineral espodumena— (en Australia, Canadá, China y Estados Unidos). Ambas alternativas de producción se están expandiendo rápidamente. Dado que la producción desde salares implica un importante drenaje de aguas subterráneas, no está claro en qué medida esta producción puede expandirse en las zonas desérticas de América del Sur, donde actualmente se practica (Gielen, 2021) (USGS, 2020). Se estima que la demanda de litio, sólo para el abastecimiento de la demanda del sector energético, requiera 488% de la producción actual en 2050 (World Bank, 2020). Existen 20 expansiones y nuevos proyectos en Argentina, Chile y Bolivia (Estado Plurinacional de). En conjunto, éstos representan un potencial total de aumento en la capacidad de producción de 530 kt. La oferta total de Chile podría alcanzar 233.911 toneladas al 2030. Argentina podría alcanzar 391.500 toneladas de producción al mismo año. Bolivia, a pesar de ser un país con grandes recursos (estimado de 21 millones de toneladas), la producción podría alcanzar 45.000 toneladas/año en 2024 si se materializan proyectos en la región de Potosí (Jones y otros, 2021).</p>

Fuente: Elaboración propia.

Las empresas dedicadas al reciclaje de litio son pocas. Están en desarrollo y hasta hace poco se había registrado que solo una empresa canadiense (de Columbia Británica) había recolectado desechos de litio desde 1992 (USGS, 2021). Pero en 2002 se registraron otras siete iniciativas y en 2021 llegaron a 25, ubicadas en Canadá, Estados Unidos y Europa (y esta fuente no considera otras regiones o países, como podría ser ciertamente el caso de China). Sin embargo, se estima que en la actualidad menos del 1% del litio es reciclado (World Bank, 2020).

Mapa 5
Principales productores de litio a nivel mundial



Fuente: Elaboración propia sobre la base de USGS (2021).

E. Tierras raras

Las tierras raras se refieren a aquel grupo de 17 elementos químicos también conocidos como metales u óxidos tierras raras. Aunque son abundantes en la superficie terrestre, estimándose las reservas en aproximadamente 120 Mt en diversas formas en más de 15 países, las concentraciones explotables son menos común que para la mayoría de los demás productos mineros (USGS, 2021). Sólo 11 minas se encontraban en operación en 2017 (Gielen, 2021).

Las tierras raras, en particular el neodimio y el disprosio, son empleadas en la construcción de imanes permanentes en rotores y estatores de generación eléctrica (por ejemplo, para turbinas eólicas) y en motores eléctricos (para vehículos eléctricos). La intensidad de uso de imanes permanentes en los generadores eólicos *offshore* puede alcanzar los 500 kg/MW de capacidad instalada. Un vehículo eléctrico (tipo sedan) requiere alrededor de 3 kg de imanes permanentes por unidad de producción. A nivel mundial, estas aplicaciones podrían requerir alrededor de 150 kt de producción anual de imanes permanentes para 2030 y generar alrededor de 50 kt de demanda de elementos de tierras raras (Gielen, 2021).

Los tres materiales más importantes utilizados en los imanes incluyen neodimio, disprosio y terbio. Los imanes de neodimio-hierro-boro (NdFeB) son de diseño compacto (lo que resulta en menores costos de fabricación), aunque en la versión comercial sinterizada de estos imanes el neodimio suele ser reemplazados por otras tierras raras, como el praseodimio, el disprosio y el terbio. El terbio es uno de los más difíciles de conseguir porque la producción, la extracción y la fabricación de imanes se centran en China (World Bank, 2020). El suministro de disprosio es aún más limitado que el de neodimio. Para que los imanes de neodimio funcionen a temperaturas elevadas se les agrega disprosio hasta 12% del peso de neodimio (Gielen, 2021). Pero, en términos de abundancia relativa en la corteza terrestre, el disprosio constituye menos del 1% de todas las tierras raras, por lo que el suministro de disprosio no puede expandirse lo suficientemente rápido para satisfacer la creciente demanda de imanes de neodimio de alta temperatura (para los vehículos eléctricos). Encontrar alternativas de aditivos se hace necesario en este caso (Gielen, 2021).

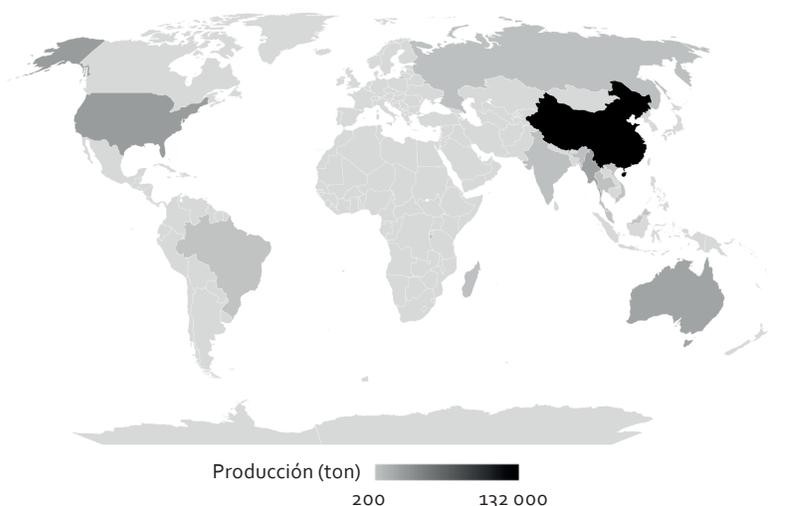
Cuadro 15
Demanda de tierras raras en el contexto de producción mundial

Necesidad	Producción
<p>La demanda de tierras raras es principalmente guiada por la generación eólica <i>offshore</i> que aún no tiene aplicación en América del sur. La demanda anual de Dy, Mo, Nd y Pr se proyecta que podría alcanzar las 750 t. Esto conforme a la posibilidad de aumento del <i>market share</i> de turbinas de imán permanente, lo que dependerá de la necesidad y viabilidad económica de los parques eólicos <i>offshore</i>. Varias iniciativas de Petrobras se encuentran en proceso de análisis en Brasil (EPE, 2021).</p>	<p>La principal preocupación es la concentración minera de tierras raras en China. Estados Unidos importa aproximadamente el 80% de tierras raras desde China (USGS, 2021). De un total de 240 kt de tierras raras producidas en 2020, 140 kt fueron producidas en el país asiático. En la región, sólo Brasil figura como productor de algunas tierras raras, extrayendo aproximadamente 1 kt de mineral (0,5%), de los cuales ninguno es de los empleados en las tecnologías de generación eléctrica.</p>

Fuente: Elaboración propia.

Aunque se recuperan cantidades limitadas de tierras raras de baterías, imanes permanentes y lámparas fluorescentes (USGS, 2021), los valores exactos de reciclado no son conocidos. La cantidad de molibdeno reciclado como parte del acero (y otros desechos) pueden representar hasta el 30% del suministro aparente de molibdeno (USGS, 2021).

Mapa 6
Principales productores de metales tierras raras a nivel mundial



Fuente: Elaboración propia sobre la base de USGS (2021).

F. Molibdeno

El molibdeno, por su parte, es empleado en casi todas las tecnologías convencionales de generación eléctrica. Su principal aplicación es en la construcción de aceros y fundiciones de hierro (USGS, 2021). Ha visto aumentar su aplicación en la construcción de generadores de fuentes renovables, impulsado por sus aleaciones para centrales térmicas solares y geotérmicas y en góndolas (*nacelles*) de generadores eólicos. El uso del molibdeno ha permitido la creación de nuevos materiales que se benefician de sus propiedades de aleación.

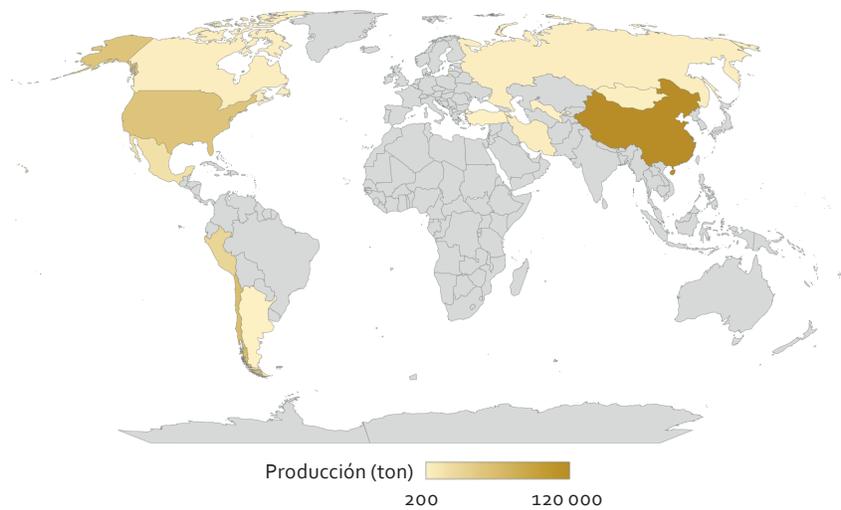
No existen procesos para la recuperación y refinado por separado de molibdeno secundario a partir de sus aleaciones. Es decir, el molibdeno no es recuperado por separado del acero reciclado y superaleaciones, pero el contenido de molibdeno de las aleaciones recicladas es significativo, y el contenido de molibdeno puede ser reutilizado (USGS, 2020).

Cuadro 16
Demanda de molibdeno en el contexto de producción mundial

Necesidad	Producción
La demanda de molibdeno anual de la región se proyecta alcance un <i>peak</i> de 1.570 t en el 2030. La demanda anual sería en promedio de 653 t y se reparten principalmente en las tecnologías eólicas (60%) y geotérmicas (40%).	El principal productor de molibdeno del mundo es China con un 40% de la producción mundial. Aunque esto pueda ser de preocupación para algunos países con alta demanda del mineral, como Estados Unidos que demanda 14,000 t/año, en la región Chile es el segundo productor de Molibdeno, Perú el cuarto y Argentina es el décimo primero. Además, México —que no ha sido parte del estudio— también se encuentra entre los principales productores del mineral (en quinto lugar en 2020) (USGS, 2021).

Fuente: Elaboración propia.

Mapa 7
Principales productores de molibdeno a nivel mundial



Fuente: Elaboración propia sobre la base de USGS (2021).

V. Conclusiones

Se han presentado en el documento los resultados de las intensidades de materiales de las industria actual y proyectada de generación y transmisión eléctrica. Se basa en la determinación del estado del arte en uso de materiales de construcción a partir de la revisión exhaustiva de fuentes de información especializadas, particularmente análisis de “ciclos de vida” de las tecnologías. Se ha considerado la composición de las diferentes sub-tecnologías, en particular aquellas renovables de mayor uso industrial como solar FV y eólica, para poder estimar la dinámica del *market share* a medida que avanza el progreso tecnológico.

La expansión de la capacidad eléctrica de América Latina, tomando como base del análisis los países de América del Sur, está guiada fundamentalmente por fuentes renovables solares y eólicas. Para el 2032, aproximadamente 26 GW y 50 GW de nueva generación solar FV y eólica, respectivamente, son requeridas en el escenario base. Los restantes 48 GW de expansión, se compone fundamentalmente de generación hidroeléctrica, termoeléctrica a gas y, en menor grado, geotérmica y biomasa. Esto proyecta una demanda de 2.268 toneladas de cobalto, 400 mil toneladas de cobre, 2.538 toneladas de litio y 54.688 toneladas de níquel. En el escenario CORE, que aprovecha la complementariedad de los recursos de la región, la instalación de generación solar FV y eólica es de 47 GW y 75 GW, respectivamente. Este aumento de capacidad de ambas tecnologías proyecta una demanda de materiales objetivo de: 2.541 toneladas de cobalto, 611 mil toneladas de cobre, 2.122 toneladas de litio y 53.287 toneladas de níquel. Se observa el beneficio adicional de la complementariedad, reflejada en el escenario CORE por conexión intrarregional, dado que, aunque se aumenta la participación de energías renovables (80% de la generación de fuentes renovables), la demanda de materiales objetivo resulta similar, con la excepción del cobre. Esto se justifica porque los vastos recursos hídricos actuales se complementan (mejor) con la estacionalidad y ubicación de las fuentes renovables.

América del Sur produce 3 de los 4 minerales que representan preocupación a nivel mundial: litio, cobre y níquel. Chile encabeza la lista de productores de la región, siendo el primer productor de cobre (40%) y el segundo de litio y molibdeno. Perú y Argentina también tienen cuota de producción en estos minerales. Sin embargo, en el caso del litio, hay 2 preocupaciones principales en cuanto a la región: la sostenibilidad de la extracción desde salares (y su impacto en aguas subterráneas) y cubrir el aumento proyectado de 5 veces de la demanda. Disponer de reservas y/o producción de minerales no asegura disponer de la tecnología y competitividad de costos, las cuales requieren otras capacidades de procesamiento, refinación, de manufactura, etc. Por lo tanto, se requiere que la industria minera de la

región se mantenga actualizada para atender las oportunidades de mercado que se prevén. De hecho, se estima que la producción de litio en los próximos 20 años, sólo para el abastecimiento de la demanda del sector energético, deba ser 4,88 veces la producción actual.

El principal reto en la elaboración de las intensidades de material es la diversidad de las fuentes de información. Aunque hay publicaciones que resumen algunos valores, resulta complejo establecer el estado del arte debido a que algunas referencias antiguas citan composición de materiales que no resultan en tecnologías competitivas hoy en día. Además, las fuentes de información no son uniformes, no mencionan los mismos materiales, emplean distintas unidades y tienen elementos compuestos tales como aleaciones y/o productos intermedios. Sin embargo, el establecimiento del *market share* de sub-tecnologías es quizás lo más variado y disperso. Se han tomado los valores del caso base del estudio de la IEA (2020), sin embargo, otras referencias proponen escenarios con una distribución muy diferente. Además, el horizonte de estos escenarios es discreto y requirió de ciertas interpolaciones para plantear un *market share* continuo para el período de estudio.

Bibliografía

- Ashby Michael F. (2013), *Materials for low-carbon power* [Book Section] // *Materials and the Environment*. Second Edition. - [s.l.] : Elsevier Inc.
- B. Jones, F. Acuña, V. Rodríguez (2021), *Cambios en la demanda de minerales: análisis de los mercados del cobre y el litio, y sus implicaciones para los países de la región andina* [Report]. - Santiago : Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL).
- Ballinger, B., Stringer, M., Schmeda-Lopez, D., Kefford, B., Parkinson, B., Greig, C., Smart, S. (2019), *The vulnerability of electric vehicle deployment to critical mineral supply* [Journal] // *Applied Energy* - Vol. 255.
- Bank Inter-American (2018), *Development Grid of the Future - Development of a Clean and Sustainable Electric Grid* [Report]. - Washington DC : IADB.
- Bauer D., Diamond, D., Li, J., Sandalow, D., Telleen, P. y Wanner, B. (2010), *Critical Materials Strategy 2010* [Report]. - [s.l.] : U.S. Department of Energy.
- Bauer D., Diamond, D., Li, J., McKittrick, M. Sandalow, D., Telleen, P. (2011), *Critical Materials Strategy 2011* [Report]. - [s.l.] : U.S. Department of Energy.
- BloombergNEF BloombergNEF ups battery demand forecast [Online]. - June 30, 2021. - March 2022. - <https://www.canadianminingjournal.com/news/bloombergnef-ups-battery-demand-forecast/>.
- Carrara S., Alves Dias, P., Plazzotta, B., Pavel, C.(2020), *Raw materials demand for wind and solar PV technologies in the transition towards a decarbonised energy system* [Report]. - Luxemburgo : Publications Office of the European Union.
- Deetman S., de Boer, H.S., Van Engelenburg, M., van der Voet, E., van Vuuren, D.P. (2021), *Projected material requirements for the global electricity infrastructure – generation, transmission and storage* [Journal] // *Resources, Conservation & Recycling*. - 2021. - January : Vol. 164.
- Deetman, S., Pauliuk, S., van Vuuren, D.P., van der Voet, E., Tukker, A. (2018), *Scenarios for Demand Growth of Metals in Electricity Generation Technologies, Cars, and Electronic Appliances* [Journal] // *Environ. Sci. Technol.* - [s.l.] : American Chemical Society, 2018. - 8 : Vol. 52. - pp. 4950-4959.
- Elia, A., Taylor, M., Ó Gallachóir, B., Rogan, F. (2020), *Wind turbine cost reduction: A detailed bottom-up analysis of innovation drivers* [Journal] // *Energy Policy*. - 2020. - Vol. 147.
- Elshkaki Ayman and Graedel T.E. (2013), *Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies* [Journal] // *Journal of Cleaner Production*. - Nov 2013. - Vol. 59. - pp. 260-273.
- EPE (2021), *Plano Decenal de Expansão de Energia 2030* [Report]. - Rio de Janeiro : www.epe.gov.br/.
- Fraunhofer Institute (2021), *Photovoltaics Report* [Report]. - Freiburg : Fraunhofer ISE.
- Gielen Dolf (2021), *Critical Materials for the Energy Transition* [Report]. - Abu Dhabi : IRENA.

- IEA (2020a) Annual Energy Outlook 2020 [Report]. - [s.l.] : <https://www.iea.org/>, 2020.
- _____(2020b) The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions [Report]. - [s.l.] : www.iea.org.
- Igogo, T., Sandor, D., Mayyas, A., Engel-Cox, J. (2019), Supply Chain of Raw Materials Used in the Manufacturing of Light-Duty Vehicle Lithium-Ion Batteries [Report]. - Golden : NREL.
- IRENA(2018), Renewable Power Generation Costs in 2018 [Online] <https://www.irena.org/publications/2019/May/Renewable-power-generation-costs-in-2018>.
- Moss, R., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P., Arendorf, J., Tercero Espinoza, L. (2013), Critical Metals in the Path towards the Decarbonisation of the EU Energy Sector [Report]. - Petten : European Commission.
- Moss, R., Tzimas, E., Kara, H., Willis, P., Kooroshy, J. (2011), Critical Metals in Strategic Energy Technologies [Report]. - Petten : European Union.
- Öhrlund Isak (2011), Future Metal Demand from Photovoltaic Cells and Wind Turbines [Report]. - Brussels : Science and Technology Options Assessment (STOA) unit, European Parliament.
- Pihl, E., Kushnir, D., Sandén, B., Johnsson, F. (2012), Material constraints for concentrating solar thermal power [Journal] // Elsevier Energy. Vol. 44. - pp. 944-954.
- Rydh Carl Johan (1999), Environmental assessment of vanadium redox and lead-acid batteries for stationary energy storage [Journal] // Journal of Power Sources . Vol. 80. - pp. 21-29.
- USGS (2021) Mineral Commodity Summaries 2021 [Report]. - Reston : <https://www.usgs.gov>.
- _____(2020) Mineral Commodity Summaries 2020 [Report]. - Reston : <https://www.usgs.gov>.
- VDMA (2020), International Technology Roadmap for Photovoltaic (ITRPV) 2019 including maturity report 2020 [Report]. - Frankfurt : VDMA.
- World Bank (2020) Minerals for Climate Action: The Mineral Intensity of the Clean Energy Transition [Report]. Washington, DC : World Bank Publications.
- _____(2017), The Growing Role of Minerals and Metals for a Low Carbon Future. - Washington DC : World Bank Publications.

Anexos

Anexo 1

Detalle de cálculo intensidad de material

Los cuadros a continuación muestran el detalle de los resultados de las intensidades de material, en (kg/kWnom), para las principales tecnologías de generación y transmisión.

Cuadro A1
Intensidad de material tecnologías solares fotovoltaicas
(Valores en kg/kWnom)

Materiales	PV-a-Si		PV-CdTe		PV-CIGS		PV-c-Si	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Co	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	2,41	2,34	2,41	4,47	26,60	19,47	2,44	2,37
Li	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	-	-	-	-	-	-	0,0013	0,0013
Tb	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A2
Intensidad de material tecnologías solares térmicas
(Valores en kg/kWnom)

Materiales	CSP-Through		CSP-Tower	
	2020	2030	2020	2030
Co	-	-	-	-
Cu	2,98	2,98	2,27	2,27
Li	-	-	-	-
Ni	0,94	0,94	1,80	1,80
Tb	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A3
Intensidad de material tecnologías eólicas
(Valores en kg/kWnom)

Materiales	GB-DFIG		DD-PMSG		GB-PMSG		DD-EESG	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Co	-	-	-	-	-	-	-	-
Cu	1,96	1,96	7,90	7,90	0,95	0,95	5,00	5,00
Li	-	-	-	-	-	-	-	-
Ni	0,53	0,53	0,24	0,24	0,44	0,44	0,34	0,34
Tb	0,004	0,004	0,007	0,007	0,001	0,001	0,001	0,001

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A4
Intensidad de material tecnologías térmicas convencionales
(Valores en kg/kWnom)

Materiales	Nuclear		GT-CCGT		Carbón	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Co	0,0001	0,0001	0,0092	0,0092	0,1007	0,1007
Cu	0,7272	0,7272	0,8593	0,8593	1,0498	1,0498
Li	-	-	-	-	-	-
Ni	0,4932	0,4932	0,0423	0,0423	0,7210	0,7210
Tb	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A5
Intensidad de material otras tecnologías renovables
(Valores en kg/kWnom)

Materiales	Batt-Li-ion		Geotérmica		Hidroeléctrica		Biomasa	
	2020	2030	2020	2030	2020	2030	2020	2030
Co	0,1578	0,1578	-	-	-	-	0,07	0,07
Cu	0,5818	0,5818	2,6525	2,6525	1,0671	1,0671	0,76	0,76
Li	0,1969	0,1969	-	-	-	-	-	-
Ni	0,2490	0,2490	120,1550	120,1550	0,0310	0,0310	0,04	0,04
Tb	-	-	-	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A6
Intensidad de material líneas de transmisión
(Valores en kg/km)

Material	AT		MT		BT	
	Línea aérea	Cable subterráneo	Línea aérea	Cable subterráneo	Línea aérea	Cable subterráneo
Hormigón	209 138	17 500	-	-	-	-
Acero	52 266	-	802	-	-	177
Al	12 883	-	-	824	981	531
Cu	-	11 650	1 488	663	-	-
Pb	-	14 050	-	-	-	-
Vidrio	1 097	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A7
Intensidad de material de subestaciones y transformadores
(Valores en kg/unidad)

Material	Sub-estación			Transformador		
	AT	MT	BT	AT	MT	BT
Hormigón	123 900	127 021	476	648 000	46 826	176
Acero	14 652	1 815	38	296 000	22 659	480
Al	33 204	1 228	1 228	497	21	85
Cu	4 611	279	1	40 909	6 877	13
Vidrio	0	-	-	-	-	-

Fuente: Elaboración propia.

Anexo 2

Producción de minerales objetivo y tierras raras

Los cuadros a continuación muestran el detalle de los resultados de la producción actual (2020) de los minerales objetivo y los metales tierras raras. Para los minerales objetivo las fuentes citadas son los reportes de *commodities* de la U.S. Geological Survey (USGS, 2020 y 2021). Para las tierras raras de interés, se hicieron cálculos en base a la información en Bauer y otros (2010) y Bauer y otros (2011), con el apoyo de las estimaciones de USGS (2021).

Cuadro A8
Principales países productores de cobre
(Valores en miles de toneladas métricas)

País	Producción	Reservas
Estados Unidos	1 200	48 000
Australia	870	88 000
Canadá	570	9 000
Chile	5 700	200 000
China	1 700	26 000
El Congo (Kinshasa)	1 300	19 000
Alemania	0	2 000
Japón	0	0
Kazakistán	580	20 000
República de Corea	0	0
México	690	53 000
Perú	2 200	92 000
Polonia	400	32 000
Federación de Rusia	850	61 000
Zambia	830	21 000
Otros países	3 300	200 000
Total (mundial)	20 000	870 000
América del Sur	7 900	292 000

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A9
Principales países productores de cobalto
(Valores en toneladas métricas)

País	Producción	Reservas
Estados Unidos	600	55 000
Australia	5 700	1 200 000
Canadá	3 200	230 000
China	2 300	80 000
El Congo (Kinshasa)	95 000	3 600 000
Cuba	3 600	500 000
Madagascar	700	120 000
Marruecos	1 900	18 000
Nueva Caledonia	1 600	-
Papúa Nueva Guinea	2 800	56 000
Filipinas	4 700	260 000
Federación de Rusia	6 300	250 000
Sudáfrica	1 800	50 000
Otros países	6 400	570 000
Total (mundial)	140 000	7 000 000
América del Sur	0	0

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A10
Principales países productores de litio
(Valores en toneladas métricas)

País	Producción	Reservas
Estados Unidos		630 000
Argentina	6 200	1 700 000
Australia	40 000	2 800 000
Brasil	1 900	95 000
Canadá	200	370 000
Chile	18 000	8 600 000
China	14 000	1 000 000
Namibia	500	
Portugal	1 200	60 000
Zimbabwe	1 600	230 000
Otros países	0	1 100 000
Total (mundial)	82 000	17 000 000
América del Sur	26 100	10 395 000

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A11
Principales países productores de níquel
(Valores en toneladas métricas)

País	Producción	Reservas
Estados Unidos	16 000	110 000
Australia	170 000	20 000 000
Brasil	73 000	11 000 000
Canadá	150 000	2 800 000
China	120 000	2 800 000
Cuba	49 000	5 500 000
República Dominicana	47 000	
Indonesia	760 000	21 000 000
Nueva Caledonia	200 000	
Filipinas	320 000	4 800 000
Federación de Rusia	280 000	6 900 000
Otros países	290 000	14 000 000
Total (mundial)	2 500 000	89 000 000
América del Sur	73 000	11 000 000

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A12
Principales países productores de molibdeno
(Valores en toneladas y miles de toneladas métricas)

País	Producción <i>(en toneladas)</i>	Reservas <i>(en kt)</i>
Estados Unidos	49 000	2 700 000
Argentina	600	100 000
Australia	7 000	150 000
Canadá	2 700	100 000
Chile	58 000	1 400 000
China	120 000	8 300 000
Irán (República Islámica del)	3 500	43 000

Cuadro A12 (conclusión)

País	Producción (en toneladas)	Reservas (en kt)
México	17 000	130 000
Mongolia	1 800	210 000
Perú	30 000	2 900 000
Federación de Rusia	2 800	1 000 000
Turquía	400	700 000
Uzbekistán	200	60 000
Total (mundial)	300 000	18 000 000
América del Sur	88 600	4 400 000

Fuente: Elaboración propia.

Cuadro A13
Principales países productores de metales tierras raras
(Valores en toneladas métricas)

País	Dy	Nd	Pr	Tb	Y	Total producción tierras raras	Total reservas tierras raras
Estados Unidos	22,8	5 160,0	1 860,0	13,2	-	26 000	1 500 000
Australia	163,2	8 468,9	2 417,1	55,4	815,3	21 000	4 100 000
Brasil	-	-	-	-	-	1 000	21 000 000
Burma	-	-	-	-	-	22 000	n/a
Burundi	-	-	-	-	-	600	n/a
Canadá	-	-	-	-	-	-	830 000
China	1 882,1	23 525,7	6 940,1	376,4	12 351,0	132 000	44 000 000
Groenlandia	-	-	-	-	-	-	1 500 000
India	-	552,0	168,0	-	-	3 000	6 900 000
Madagascar	1,2	52,8	24,0	0,5	-	2 000	n/a
Malasia	-	-	-	-	-	200	30 000
Federación de Rusia	0,8	9,4	2,8	0,2	4,9	2 700	12 000 000
Sudáfrica	40,8	996,0	300,0	4,8	300,0	-	790 000
Tanzania	-	-	-	-	-	-	890 000
Tailandia	-	-	-	-	-	1 800	n/a
Vietnam	-	384,0	144,0	-	25,2	900	22 000 000
Otros países	-	-	-	-	-	60	310 000
Total (mundial)	2 110,8	39 148,8	11 856,0	450,5	13 496,4	210 000	120 000 000

Fuente: Elaboración propia.

En esta investigación, se analiza y documenta cuantitativamente la intensidad de uso de minerales de las distintas tecnologías de generación y transmisión eléctrica, particularmente las basadas en energías renovables, considerando distintos escenarios de transición energética proyectados para los países de América del Sur que han formado parte de la simulación llevada a cabo con el programa PLEXOS, en el marco del programa Complementariedad Energética y Desarrollo Sostenible (ECOSUD), cuyo objetivo es la planificación de la expansión óptima de la capacidad instalada del sector eléctrico regional hacia 2032. Conocer la intensidad de uso de minerales permite dimensionar la importancia que tiene la actividad minera en otros sectores de la economía; en este estudio en concreto, el de las energías renovables. Por otro lado, dados los efectos negativos que puede acarrear la explotación de los recursos mineros, se hace un nuevo llamado a reflexionar sobre la necesidad de gestionar estos recursos de manera más sostenible para apoyar la transición energética y el desarrollo de las economías de América Latina.