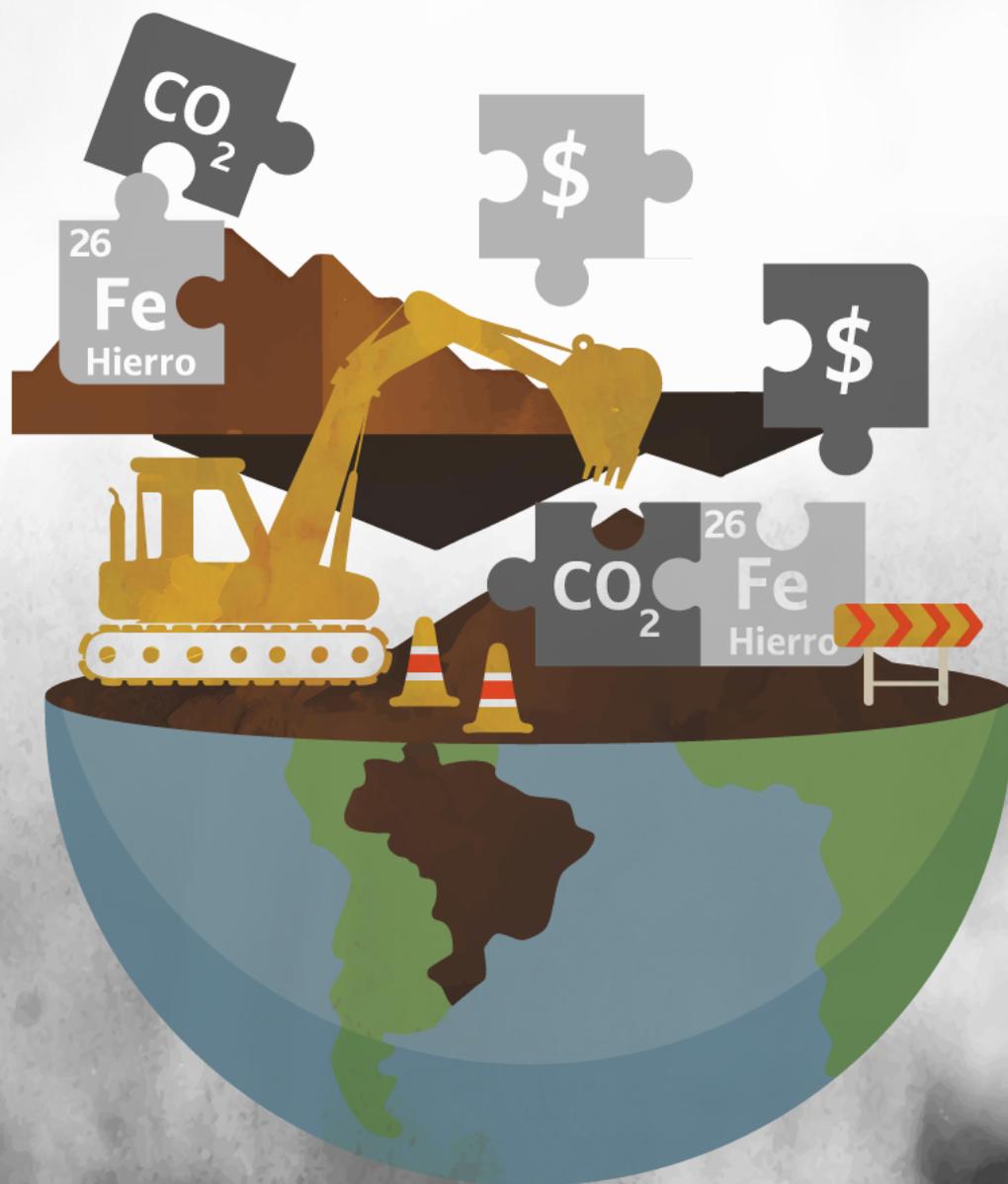


CORTINA DE HUMO: DE HUMO:

EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO
Y MINERÍA DE HIERRO EN BRASIL



Bruno Milanez
Daniele Costa
Luiz Jardim Wanderley

COMITÉ NACIONAL EM
DEFESA DOS TERRITÓRIOS
FRENTE À MINERAÇÃO



CORTINA DE HUMO:

EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y MINERÍA DE HIERRO EN BRASIL¹

Brasil, noviembre de 2024.

Cortina de humo: emisión de gases de efecto invernadero y la minería de hierro en Brasil es una publicación del Comité Nacional en Defensa de los Territorios Frente a la Minería, en colaboración con la Red Iglesias y Minería.

¹ Este texto es una versión traducida del estudio realizado por los mismos autores, que dio origen al artículo *Life Cycle Assessment of Iron Ore in Brazil: The Importance of System Boundaries*, publicado en la revista *The Extractive Industries and Society* en septiembre de 2024.

Organizadores

Bruno Milanez

Daniele Costa

Luiz Jardim Wanderley

Comunicación

Kátia Visentainer

Diagramación y arte

Mayra Souza



Comité Nacional en Defensa de los Territorios Frente a la Minería (Secretaría Operativa)

FASE	Federação de Órgãos para Assistência Social e Educacional
IBASE	Instituto Brasileiro de Análises Sociais e Econômicas
Inesc	Instituto de Estudos Socioeconômicos
JnT	Rede Justiça nos Trilhos
MAM	Movimento pela Soberania Popular na Mineração
PoEMAS	Grupo de Pesquisa e Extensão Política, Economia, Mineração, Ambiente e Sociedade
Sinfrajupe	Serviço Inter - Franciscano de Justiça, Paz e Ecologia

Acceso al Comité



emdefesadosterritorios.org



[@Comiteminerao](https://twitter.com/Comiteminerao)



[@em_defesa_dos_territorios](https://www.instagram.com/em_defesa_dos_territorios)



[@emdefesadosterritorios](https://www.facebook.com/emdefesadosterritorios)



CORTINA DE HUMO:

EMISIÓN DE GASES DE EFECTO INVERNADERO Y MINERÍA DE HIERRO EN BRASIL¹

Bruno Milanez, Daniele Costa, Luiz Jardim Wanderley

DESTAQUES:

Si bien las investigaciones internacionales incluyen las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) vinculadas a la logística en el cálculo de las contribuciones del sector minero para el cambio climático, los estudios realizados en Brasil no suelen incorporar esos valores.

Cuando se estiman las emisiones de GEI de **commodities** minerales, no incluir las emisiones relacionadas con la logística puede generar resultados subestimados para la “huella de carbono” de estos productos.

Entre 2016 y 2020, Brasil exportó el equivalente al 60 % de todo el mineral de hierro extraído en el país, o aproximadamente el 80 % del mineral de hierro procesado.

Según nuestras estimaciones, las operaciones logísticas terrestres y marítimas podrían representar aproximadamente el 40 % de la “huella de carbono” del sector del mineral de hierro.

Se requieren más estudios para mejorar las estimaciones de las emisiones resultantes de la deforestación indirecta causada por la extracción de minerales, especialmente en la Amazonia.

¹ Este texto es una versión traducida del estudio de los mismos autores que originó el artículo *Life cycle assessment of iron ore in Brazil: the importance of system boundaries*, publicado en la revista *The Extractive Industries and Society*, en septiembre de 2024. El artículo completo y el informe de cálculo de las estimaciones están disponibles en <https://doi.org/10.1016/j.exis.2024.101541>.

SUMARIO:

1. Introducción	6
2. Límites y desafíos del estudio de las emisiones de GEI en el sector minero	8
3. La extracción de mineral de hierro y los cambios climáticos en el contexto brasileño	10
3.1 La red global de extracción de mineral de hierro	10
3.2 Mineral de hierro y emisiones de GEI: una evaluación de las estimaciones existentes en Brasil	11
4. Método y resultados	14
4.1 Descripción del sistema y fuentes de datos	14
4.2 Resultados y discusión	17
5. Consideraciones finales	23
6. Anexo metodológico	25
Uso de la tierra	25
Extracción, concentración y peletización	26
Transporte terrestre	26
Comercio internacional	27
Referencias	29

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1. Exportaciones de mineral de hierro de Brasil, 2020 (datos en toneladas)	15
Figura 2. Fronteras del sistema y balance de masa para la producción de mineral de hierro y pellets en Brasil (promedio anual de 2016 a 2020)	16
Figura 3. Estimaciones de emisiones de CO ₂ eq para el sector del mineral de hierro en Brasil	18
Tabela 1. Tasas de emisión de CO ₂ eq de 1 tonelada de concentrado y pellets de mineral de hierro	19
Tabela 2. Principales países importadores de mineral de hierro brasileño	28

1. Introducción

El principal objetivo de este texto es discutir cómo estimar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), o “huella de carbono”, del mineral de hierro extraído en Brasil. En este sentido, se sostiene que cuando evaluamos las emisiones vinculadas a los sectores de *commodities*, como muchos de los minerales brasileños, las actividades logísticas contribuyen significativamente al cambio climático. Esta situación se debe a que las *commodities* generalmente sufren poca transformación industrial y, al mismo tiempo, son transportados a largas distancias para abastecer el mercado internacional, emitiendo grandes cantidades de GEI. Como consecuencia de esta característica, los cálculos que miden únicamente las emisiones provenientes de la extracción y concentración de minerales subestiman las contribuciones del producto final al cambio climático. Utilizamos el caso del mineral de hierro como base de nuestro estudio. Esta elección se debe a que el mineral de hierro juega un papel fundamental en la balanza comercial brasileña; el 2020 fue el segundo producto más exportado por el país (12,3%), solo detrás de la soja (13,7%) (ITC, 2023).

El debate sobre la relación entre minería y cambio climático es un tema relevante, muchas veces dejado en un segundo plano. El sector minero juega un rol muy importante en el cambio climático debido a su alto consumo energético (Irrazabal, 2006; Liu *et al.*, 2021). Las estimaciones de Azadi, Northey, Ali y Edraki (2020) indican que, en 2018, el procesamiento primario de minerales y metales fue responsable de alrededor del 10 % de las emisiones globales de GEI relacionadas con el consumo de energía. Las emisiones de GEI pueden estar directa o indirectamente relacionadas con las actividades de minería. Las emisiones directas están asociadas al consumo de combustibles fósiles a través de equipos como palas cargadores y camiones dentro de las minas, así como a las emisiones derivadas de la transformación de materiales (como es el caso de la liberación de perfluorocarbonos mediante el proceso de electrólisis del aluminio). Por otro lado, las emisiones indirectas pueden estar vinculadas, por ejemplo, a la generación de energía eléctrica utilizada en plantas concentradoras de minerales (Irrazabal, 2006; Liu *et al.*, 2021).

A pesar de la gran contribución de las actividades mineras al cambio climático, la literatura internacional sobre el tema aún resulta escasa y poco transparente. Azadi *et al.* (2020) afirman que los impactos de la minería en el cambio climático no se contabilizan en su totalidad. Además, Odell, Bebbington y Frey (2018) señalan que la mayor parte de las investigaciones sobre el tema son realizadas por organizaciones del sector o agencias gubernamentales asociadas al mismo, por lo que existen pocos datos verdaderamente independientes disponibles.

El presente estudio tiene como objetivo estimar la “huella de carbono” del mineral de hierro extraído en Brasil, considerando no solo las actividades de extracción y concentración, sino también las contribuciones de la deforestación y la cadena logística. Para este fin, se organiza en cuatro secciones, además de esta introducción. La Sección 2 analiza los desafíos y limitaciones del cálculo de las emisiones de GEI del sector minero. A continuación, brindamos una descripción general del sector del mineral de hierro en diferentes contextos y analizamos los datos existentes en relación a las emisiones de GEI en Brasil. En la Sección 4, describimos nuestro método de investigación, presentamos los resultados y los comparamos con estudios existentes. Por último, destacamos las limitaciones de nuestra investigación y evaluamos sus posibles impactos. Además de estas secciones, también hemos incluido un anexo donde describimos con más detalle nuestra metodología y las fuentes de datos utilizadas.

2.

2 Límites y desafíos del estudio de las emisiones de GEI del sector minero

Estudios e estimativas sobre emissão de GEEs normalmente se baseiam em ferraLos estudios y estimaciones sobre emisiones de GEI suelen basarse en herramientas de Análisis del Ciclo de Vida (ACV). El ACV consiste en una metodología de recolección de datos y simulación que, en teoría, permiten evaluar diferentes impactos ambientales de diferentes productos (de Haes, 1993). El uso del ACV ganó mayor atención a partir de la década de 1990, en ese momento nuevas herramientas permitieron visibilizar la responsabilidad de los fabricantes más allá de su proceso productivo y comprender cómo sus decisiones se reflejaban en los impactos causados por los productos fabricados. A partir del entendimiento de que los impactos ambientales de los productos deben medirse “desde la cuna hasta la puerta”, comenzaron a surgir conceptos como responsabilidad extendida del productor, responsabilidad posconsumo, economía circular, entre otros. Por ello, trasladar el foco de análisis de los procesos aislados al producto en su conjunto se ha aceptado como la estrategia más adecuada en el contexto de la gestión ambiental.

Sin embargo, la aplicación de tales herramientas al sector minero todavía genera cierta discusión. Por un lado, existe cierto optimismo y autores como Nuss y Eckelman (2014) creen que es posible medir y cuantificar adecuadamente los impactos ambientales, incluidas las emisiones del sector. Por otro lado, otros investigadores identifican limitaciones metodológicas que generan resultados inconsistentes. Estos problemas están asociados, por ejemplo, con las incertidumbres y la calidad de los datos (Yellishetty, Ranjith, Tharumarajah y Bhosale, 2009). Como consecuencia, los resultados pueden variar según el método utilizado, el modelo de simulación adoptado y el mineral estudiado (Farjana, Huda, Mahmud y Saidur, 2019).

Awuah-Offei y Adekpedjou (2011) mencionan que una limitación de los estudios es la falta de uniformidad en las unidades utilizadas, por ejemplo, si el estudio trata de mineral en bruto o mineral procesado. Argumentan además que la intensidad de los impactos puede variar, dependiendo del contexto de extracción; por ejemplo, la escala y la productividad de las minas pueden comprometer la comparación.

La elección de “fronteras de análisis” también se identificó como otro aspecto crítico de los estudios sobre los impactos de la minería. “Las fronteras del análisis son los criterios adoptados que definen qué procesos se incluyen en un ACV (ISO, 2006). En el caso del mineral de hierro, por ejemplo, un estudio puede estudiar los impactos únicamente de la extracción, otro de la extracción y concentración y otro de la extracción, concentración y producción de arrabio. Como las fronteras son diferentes, los resultados serán diferentes. Ya en 2001, Stewart (2001) mencionó inconsistencias relacionadas a las fronteras de evaluaciones, ya que definir las fronteras podría generar resultados más favorables a los intereses del proponente. También comentó que las diferencias en los límites del sistema dificultarían la comparación de diferentes estudios.

También relacionado a las fronteras de análisis, Farjana *et al.* (2019) comentaron que la falta de datos adecuados restringió el desarrollo de estudios más amplios. En consecuencia, la mayoría de los estudios se restringirían al análisis desde la cuna hasta la puerta (Haque, 2022), considerando la “puerta” como la salida de la mina. En otras palabras, los estudios solo se centran en la extracción y el procesamiento, y no contemplan todo el “ciclo de vida” de los minerales. Sin embargo, en el caso del mercado de *commodities*, como se propone en este estudio, debido al tamaño global y al alto volumen del mercado de minerales, este enfoque limitado subestimaría el impacto real del mineral de hierro.

Otro problema asociado con el estudio de los impactos del sector minero tiene que ver con la dificultad de acceder a los datos. Por ejemplo, Awuah-Offei y Adekpedjou (2011) describieron la información minera dentro de las bases de datos de ACV como cajas negras; Asimismo, Haque (2022) afirmó que muchas evaluaciones son inadecuadas debido a la limitada disponibilidad de datos públicos. Esta cuestión es aún más complicada para los estudios fuera de Europa, ya que las bases de datos relacionadas con países periféricos, como Brasil, aún están bastante incompletas (de Eicker *et al.*, 2010).

Debido a estos desafíos, aún existe la necesidad de mejorar las metodologías para cuantificar los impactos ambientales del sector minero. Esta mejora es aún más urgente en el caso de las emisiones de GEI, ya que existe la expectativa de que la contribución del sector a las emisiones globales aumente significativamente en el futuro. Según la OCDE (2018), se espera que la extracción y el procesamiento de solo siete metales (aluminio, cobre, hierro, manganeso, níquel, plomo y zinc) sean responsables del 9% de las emisiones totales de GEI en 2060. Como una forma de contribuir al debate, presentamos aquí una propuesta de metodología más amplia para estimar la “huella de carbono” del mineral de hierro extraído en Brasil.

3.

La extracción de mineral de hierro y cambio climático en el contexto brasileño

3.1 La red global de extracción de mineral de hierro

En esta sección presentamos brevemente las características de la extracción de mineral de hierro en Australia, Brasil y China, para complementar con las evaluaciones que se presentarán en la Sección 4. En nuestro trabajo intentamos repetir la metodología que han adoptado investigadores internacionales, especialmente en estudios en Australia y China. Por lo tanto, conocer el contexto de estos países es importante para orientar la evaluación de los resultados encontrados en una perspectiva comparada.

El mineral de hierro es un ejemplo particularmente relevante para el debate sobre las emisiones de GEI del sector minero debido a la cantidad extraída y el considerable volumen comercializado a nivel mundial. Según ITC (2023), en 2020 las exportaciones de mineral de hierro alcanzaron los 1,6 mil millones de toneladas, más de 10 veces la cantidad de minerales y concentrados de aluminio, el segundo metal en el ranking de exportaciones de minerales, que totalizaron 149,0 millones de toneladas (Mt).

Australia es el mayor productor y exportador de mineral de hierro del mundo (Tuck, 2022). En 2020, representó el 55,7% de las exportaciones mundiales (ITC, 2023). Ha sido un exportador relevante desde la década de 1960. El hierro australiano se extrae principalmente en la región de Pilbara, que es responsable de más del 95 % de la producción del país; desde Pilbara, el mineral de hierro se transporta por ferrocarril a distancias que varían entre 210 y 426 km (Beresford, Pettit y Liu, 2011). Debido al alto grado de sus reservas, el mineral se exporta con un procesamiento mínimo, y la transformación consiste principalmente en trituración y cribado (Holmes, Lu y Lu, 2022).

Brasil es el segundo exportador más importante de mineral de hierro. En 2020, fue responsable del 16 % de la extracción mundial (Tuck, 2022) y del 18,3 % de las exportaciones (ITC, 2023). Al mismo tiempo, la minería brasileña depende en gran medida del mercado global. En 2020, Brasil extrajo 388,0 Mt (Tuck, 2022) y exportó 341,5 Mt (ITC, 2023), lo que significa que el 88 % del total extraído en Brasil se dirigió a consumidores internacionales.

China es el mayor productor y exportador de mineral de hierro del mundo. En 2020, representó el 75,3 % de las importaciones mundiales (ITC, 2023). Además, China también extrae una gran cantidad de mineral de hierro, alrededor del 15 % del total mundial (Tuck, 2022) en 2020. Las reservas chinas de hierro son escasas, con una concentración media del 35,5 % de Fe. Por tanto, requieren mucho procesamiento, lo que se traduce en elevados costes (Holmes *et al.*, 2022). En consecuencia, debido a la enorme demanda del sector siderúrgico del país, China depende en gran medida de proveedores internacionales (Holmes *et al.*, 2022).

3.2 Mineral de hierro y emisiones de GEI: una evaluación de las estimaciones existentes en Brasil

En Brasil, la información oficial sobre la contribución de la minería a las emisiones de GEI es limitada. Existen diferentes agencias públicas que brindan datos, pero tienden a separar las emisiones por procesos y agregarlas por minerales, lo que dificulta la evaluación por tipo de mineral a lo largo de su ciclo de vida. Por otro lado, las estimaciones publicadas por el sector privado tienen algunas restricciones metodológicas.

El informe sobre las estimaciones anuales brasileñas de emisiones de GEI agrega datos mineros sin separar minerales específicos. En 2020, las emisiones mineras relacionadas con la energía alcanzaron casi 4 billones de kg de CO₂ eq, lo que equivale a más del 15 % de todas las emisiones residenciales asociadas al consumo de energía (MCTI, 2022). Además de las emisiones de energía, también existen emisiones ligadas a procesos industriales, sin embargo, los datos disponibles solo consideran las derivadas de la producción de cemento, cal, vidrio y otros procesos relacionados con el carbonato. Aunque MCTI (2022) publica datos del sector siderúrgico, en esta estimación separa el aporte de las actividades extractivas, y solo incluye los procesos de transformación, que incluyen la producción de arrabio y la refinación de acero.

El Balance Energético Brasileño, publicado por la Empresa de Investigación Energética (EPE, 2022), no presenta información específica para la extracción de mineral de hierro; considera el consumo energético de la minería en su conjunto, junto con las actividades de peletización. En 2020, estos dos sectores consumieron 2,1 mil toneladas equivalentes de petróleo (tep), cuyas principales fuentes de energía fueron la electricidad (47,5 %), el gas natural (10,5 %) y el fueloil (5,4 %). Esta demanda correspondió al 7,6% del consumo residencial de energía de todo el país. El informe de la EPE no permite identificar solamente el consumo de mineral de hierro, ni convierte el consumo de energía en emisiones de GEI.

La información oficial relacionada con las emisiones específicas de la extracción de mineral de hierro en Brasil está bastante desactualizada. El Ministerio de Minas y Energía (MME) publicó la última versión de su "Plan de Minería con Bajas Emisiones de Carbono" en 2013, basado en datos recopilados por la Asociación Brasileña de Minería (IBRAM). El MME (2013) concluyó que, en 2008, el sector minero del hierro emitió 1,5 mil millones de kg de CO₂ eq, y la tasa de emisión fue de 3,09 kg de CO₂ eq/t ROM². Considerando la producción de 350,7 Mt (65,9 % Fe) en 2008 (DNPM, 2010), la tasa de emisión se puede estimar en 4,3 kg CO₂ eq/t para el concentrado de mineral de hierro. El informe también estimó que la producción de pellets emitió 5,9 mil millones de kg de CO₂ eq (MME, 2013), lo que podría estimarse en 107,7 kg de CO₂ eq/t.

El año siguiente, el IBRAM (2014) presentó nuevas estimaciones para el sector del mineral de hierro. Ha considerado el 2011 como año de referencia y estimó unas emisiones totales de 1,6 billón de kg de CO₂ eq, incluidas las emisiones directas y las relacionadas con la compra de electricidad. El inventario del IBRAM se limitó a las emisiones totales y no estimó ninguna tasa de emisión. Según el Departamento Nacional de Producción Mineral, ese año el país produjo 398,1 Mt de mineral de hierro (64,7 % Fe), por lo que se podría estimar una tasa de emisión de 4,1 kg CO₂ eq/t. El informe también calculó en 5,9 mil millones de kg de CO₂ las emisiones anuales de la producción de pellets. Considerando que Brasil produjo 62,4 Mt de pellets, la tasa de emisión sería igual a 94,5 kg de CO₂ eq/t (DNPM, 2012).

A pesar de un discurso creciente sobre la preocupación del sector por sus emisiones de GEI, el IBRAM tardó diez años en actualizar sus estimaciones. En 2024, publicó un nuevo informe, con base en el año 2022, que consideró las emisiones relacionadas con el desmonte y apertura de frentes de explotación (cambio de uso de suelo/remoción de cobertura vegetal y uso de vehículos), extracción, procesamiento (actividades de separación y obtención de concentrado), movimiento de máquinas y transporte interno, recuperación de áreas abiertas, cierre de frentes de explotación y emisiones asociadas a la adquisición de energía eléctrica. A partir de datos obtenidos junto a las empresas del sector, IBRAM estimó en 8 kg CO₂ eq/t las emisiones asociadas al mineral de hierro (IBRAM, 2024)³.

² Run of mine (ROM): corresponde al material bruto extraído de la mina, tal como se encamina a los camiones, contenedores o cintas transportadoras y antes de cualquier tipo de tratamiento (U.S. Bureau of Mines, 1996).

³ En este sentido, cabe realizar un breve comentario sobre las estimaciones de emisiones de GEI.

La metodología más comúnmente utilizada separa las emisiones en tres grupos: Alcance 1, 2 y 3. Las emisiones de alcance 1 son emisiones directas asociadas con operaciones que son propiedad y control de una empresa. El alcance 2 se refiere a las emisiones vinculadas a la energía (electricidad, vapor, calefacción o refrigeración) compradas por las empresas. Las emisiones de alcance 3 incluyen una diversidad de emisiones indirectas que ocurren a lo largo de la cadena de valor de las empresas (Greenhouse Gas Protocol, 2022).

El IBRAM (2024) presenta conjuntamente datos referentes a las emisiones de Alcance 1 y 2, estimadas en 8 kg CO₂ eq/t. Respecto al alcance 3, solo calculó los valores para "procesamiento de producto vendido" (categoría 10). En el caso del mineral de hierro, el valor estimado fue de 1,270 kg CO₂ eq/t; sin embargo, el informe no explica cuáles serían estos procesos, por ejemplo, si incluirían la peletización, la producción de arrabio o la fabricación de acero.

A diferencia de lo realizado en 2014, en su más reciente publicación, el IBRAM no presentó una comparación entre los inventarios realizados en el pasado y las cifras actualizadas, ni discutió en profundidad posibles cambios en la metodología. Por ejemplo, el estudio de 2014 separó las emisiones asociadas a la remoción de la cubierta vegetal, algo que no se hizo en la versión actual. Asimismo, no describió la metodología adoptada para dicha estimación, lo que dificulta una evaluación en profundidad (IBRAM, 2014, 2024).

Además de la falta de claridad sobre las emisiones asociadas al cambio de uso del suelo, otra limitación del estudio publicado en 2024 fue la no inclusión de las emisiones vinculadas a la logística, en particular las relacionadas con el transporte ferroviario y marítimo. Por lo tanto, este inventario deja fuera las emisiones provenientes del “transporte y distribución de productos vendidos” (categoría 9 del Alcance 3) (IBRAM, 2024).

Como se describirá en la siguiente sección, este descuido deriva a una subestimación de la “huella de carbono” del mineral de hierro extraído en Brasil. En 2020, el consumo de energía ferroviaria equivalió al 0,5 % del consumo total de energía en Brasil (EPE, 2022) y, en ese año, el transporte de mineral de hierro representó el 85,3 % del total de carga ferroviaria en Brasil (ANTT, 2021). Por tanto, el transporte ferroviario, que tiene a diferentes empresas mineras como concesionarias, es un importante contribuyente al cambio climático. Además, como se mencionó anteriormente, Brasil extrae mineral de hierro principalmente para abastecer el mercado internacional, y el envío al exterior también contribuye en gran medida a las emisiones de GEI. Por este motivo, consideramos que la no inclusión de estos elementos subestima significativamente las emisiones asociadas al mineral de hierro y, por esto, intentamos incluir dichos datos en nuestras estimaciones, entendiendo que, de esta forma, contribuimos a valores más precisos de las emisiones asociadas al mineral de hierro extraído en Brasil.

4.

Método y resultados

4.1 Descripción del sistema y fuentes de datos

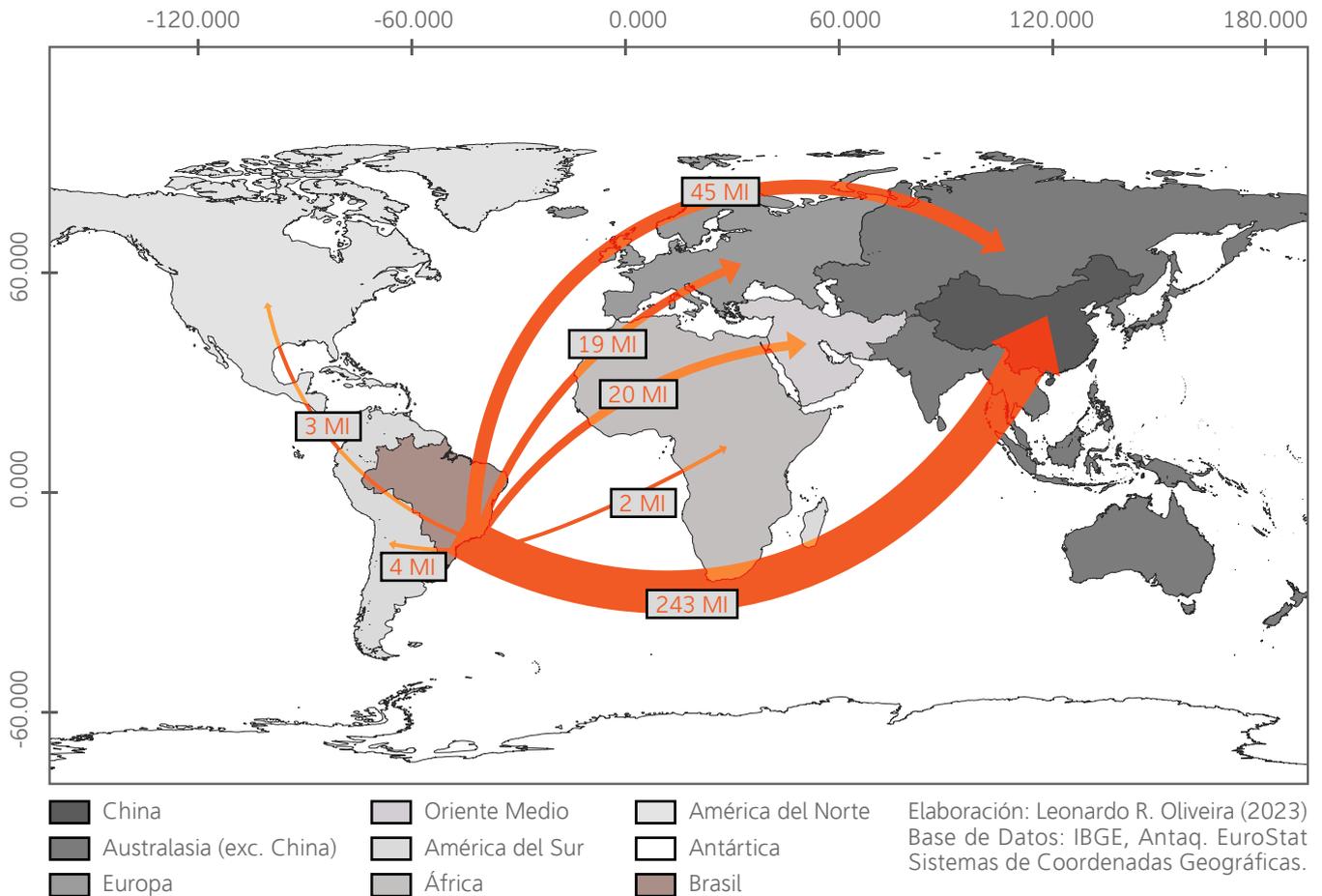
La extracción de mineral de hierro en Brasil se concentra en dos regiones; en 2020, el 55,2% de la extracción de ROM provino del estado de Minas Gerais y el 43,4 % del estado de Pará (ANM, 2020). Dependiendo del precio del mineral de hierro y de los problemas operativos, como los dos grandes desastres de presas de desechos ocurridos en Minas Gerais en 2015 y 2019 (Milanez, Ali y Puppim Oliveira, 2021), los dos estados podrían cambiar de posición en el liderazgo del ranking.

Desde Pará, el mineral se transporta por el Ferrocarril de Carajás (972 km) hasta los puertos del estado de Maranhão. En Minas Gerais, una pequeña cantidad se transporta por oleoductos y la mayor parte se transporta por tren a través de la Estrada de Ferro Vitória a Minas (905 km) o por MRS Logística (alrededor de 480 km) hasta los puertos de los estados de Espírito Santo y Río de Janeiro (ANTT, 2023). La empresa minera Vale S.A. es la concesionaria total o parcial de los tres ferrocarriles. Luego de llegar a los puertos, algunos de los cuales también son administrados por empresas mineras, el mineral se exporta a otros países (ANTT, 2020; Holmes *et al.*, 2022). Una pequeña fracción del material extraído se transporta en camiones a plantas de arrabio y acerías cuando se encuentra cerca de las minas (Lovón-Canchumani, Lima y Oliveira, 2015). Parte del mineral de hierro se transforma en pellets antes de ser vendido a acerías en Brasil o en el extranjero. Las usinas de peletización se encuentran principalmente en la costa, cerca de los puertos.

El mineral de hierro y los pellets son exportados principalmente por empresas de logística tercerizadas. Sin embargo, el transporte marítimo es un elemento crucial en la estrategia de las empresas mineras, especialmente por su importancia en el costo total. En 2008, Vale encargó barcos Valemax, que pueden transportar hasta 400.000 t de mineral de hierro; tienen el doble de capacidad que los barcos graneleros Capesize (aprox. 180.000 t), tradicionalmente utilizados por las mineras. Los barcos Valemax se utilizan principalmente para viajes de larga distancia, especialmente a Asia, para reducir los costos operativos (MESDE, 2012; Papadionysiou, 2014; Yang, 2016).

El papel del comercio internacional es fundamental para estimar la “huella de carbono” del mineral de hierro, ya que, entre 2016 y 2020, Brasil exportó el equivalente al 80% del mineral procesado. Como se ilustra en la Figura 1, este mineral abastece principalmente a Asia, la mayor parte a China.

Figura 1: Exportaciones de mineral de hierro de Brasil, 2020 (datos en toneladas)



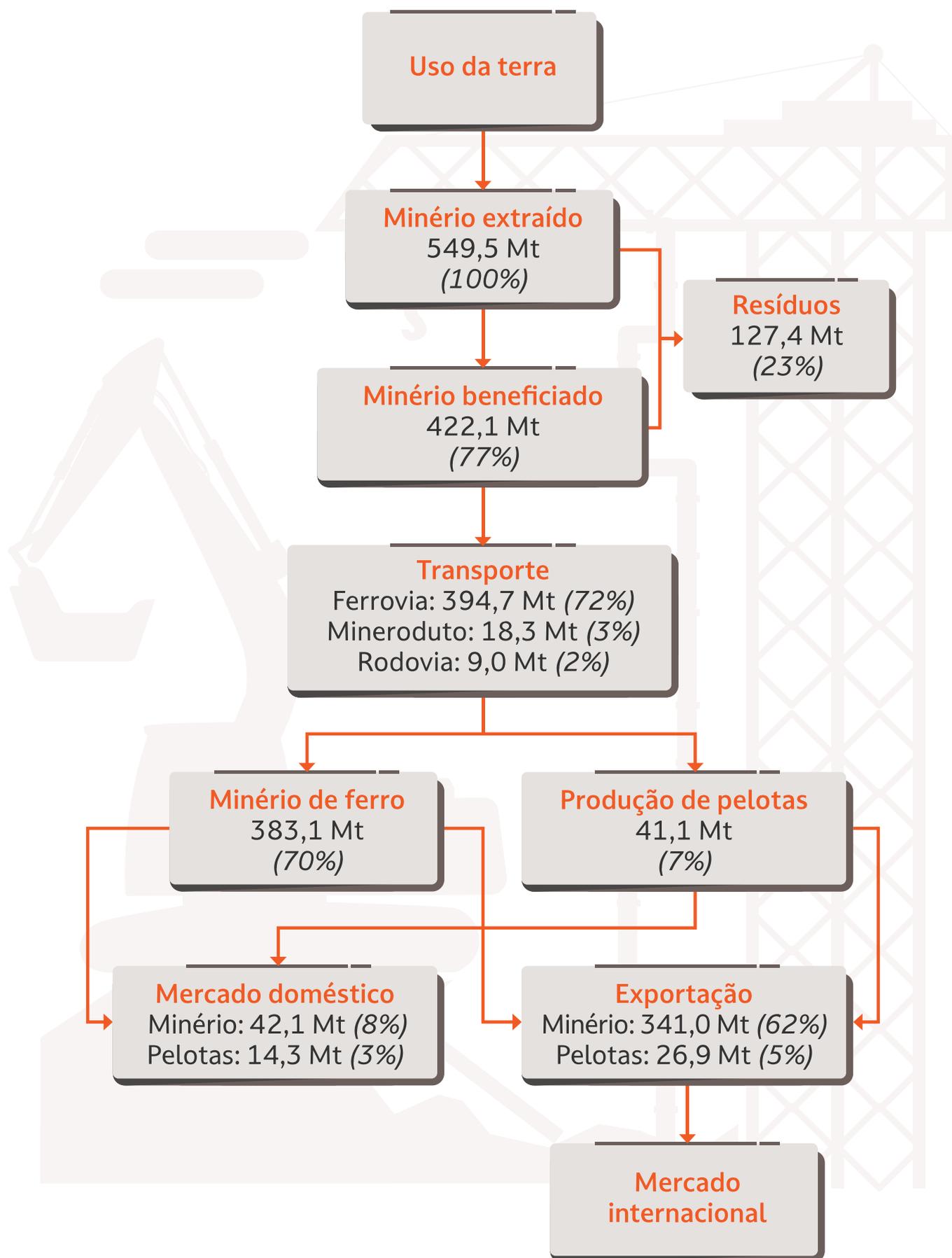
Fuente: Secex (2023)

Este estudio asigna las emisiones a lo largo del ciclo de vida y tiene como unidad funcional 1 t de concentrado de mineral de hierro y 1 t de pellets, incluido el transporte al primer consumidor. Las fronteras de análisis se consideran desde la cuna hasta la puerta, asumiendo la “puerta del consumidor”, es decir, las siderúrgicas nacionales e internacionales. Para reflejar este sistema, los procesos de extracción de mineral de hierro se han dividido en las siguientes etapas:

- Cambio de uso de la tierra: deforestación
- Minería: desmonte, carga y transporte.
- Procesamiento: trituración, molienda, cribado y clasificación.
- Peletización: espesamiento, filtrado y secado.
- Transporte terrestre: ferrocarril, carretera y oleoductos
- Exportación

La Figura 2 resume las fronteras del sistema y el balance de masa de mineral de hierro y pellets con base en el promedio anual para el período entre 2016 a 2020. Para la producción de pellets se asumió que 0,948 toneladas de mineral de hierro producen 1 tonelada de pellets (Lovón-Canchumani *et al.*, 2015).

Figura 2: Fronteras del sistema y balance de masa para la producción de mineral de hierro y pellets en Brasil (promedio anual de 2016 a 2020)



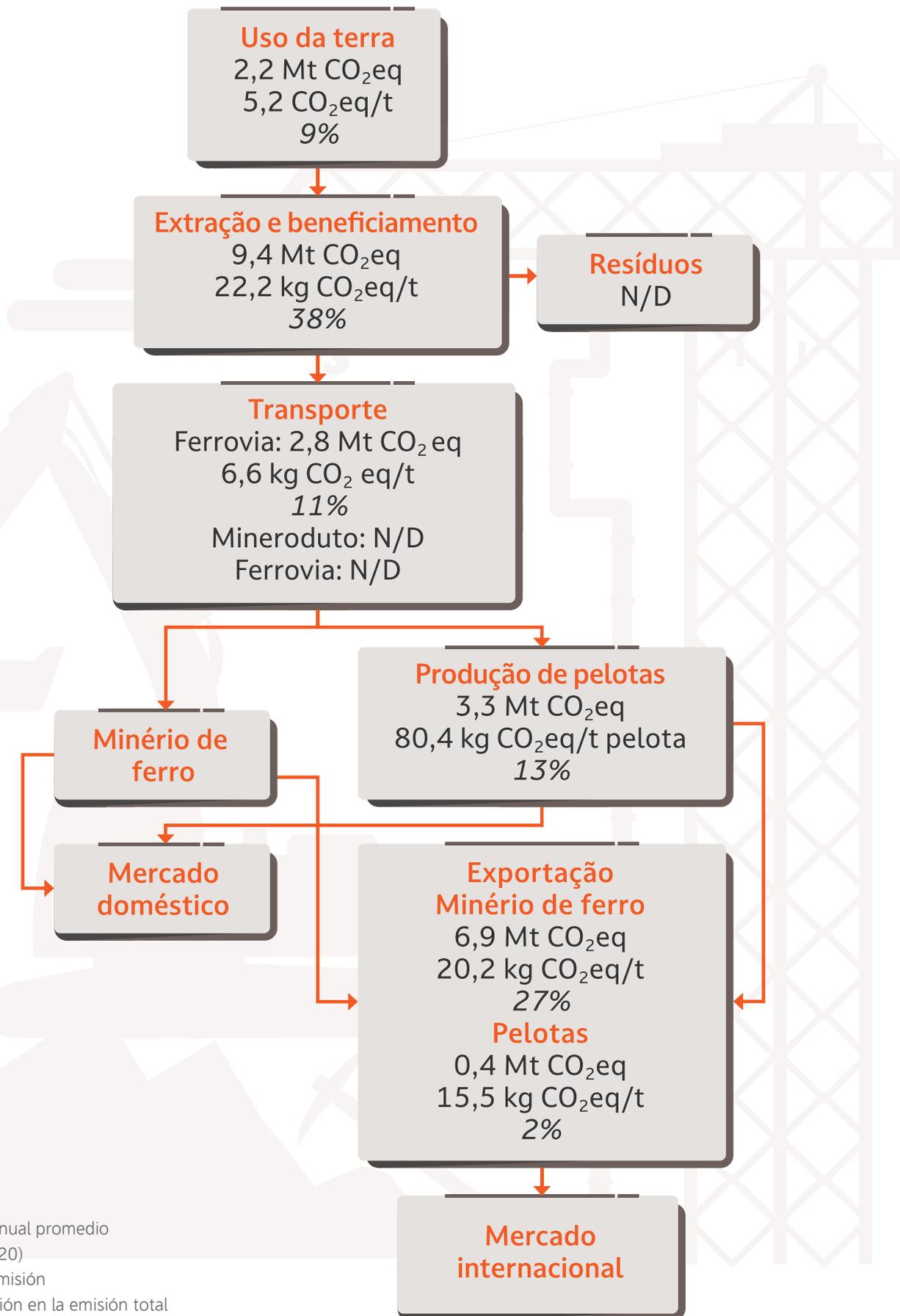
Fuente: Los autores se basan en datos proporcionados por ANM, ANTT, SECEX, varios años.

El estudio se basó en datos secundarios obtenidos en bancos de datos públicos mantenidos por órganos federales, como la Agencia Nacional de Minería (ANM), la Agencia Nacional de Transportes Terrestres (ANTT) y la Secretaría de Comercio Exterior (SECEX). Para garantizar la comparabilidad de las diferentes fuentes, el intervalo de datos se refiere al período de 2016 a 2020. Hubo dificultades considerables para encontrar referencias confiables actualizadas y respecto a todo Brasil sobre la emisión de GEI para la extracción y concentración de minerales, así como para la peletización. Para estas actividades, basamos nuestras estimaciones en la base de datos Ecoinvent versión 3.8 (Wernet *et al.*, 2016), con el software Activity Browser (Steubing, de Koning, Haas, e Mutel, 2020).

4.2 Resultados y discusión

Los resultados del estudio se resumen en la Figura 3. Esta muestra estimaciones para cada etapa, considerando las emisiones anuales para el período 2016-2020, la tasa de emisión y la participación de cada actividad en las emisiones totales. Los datos se estimaron para 1 t de mineral de hierro concentrado, excepto peletización y transporte de pellets, que se refieren a 1 t de pellets.

Figura 3: Estimaciones de emisiones de CO₂ eq para el sector del mineral de hierro en Brasil.



Leyenda:

Emisión anual promedio (2016-2020)

Tasa de emisión

Participación en la emisión total

Fuente: Ver Anexo metodológico.

Los datos presentados en la Figura 3 muestran la importancia de incluir las actividades logísticas en las estimaciones para el sector del mineral de hierro. En nuestro caso, el transporte terrestre y el transporte marítimo transoceánico son responsables, en conjunto, del 40 % de las emisiones totales. La investigación también indica la importancia de las emisiones relacionadas con el cambio de uso de la tierra. Como se indicó anteriormente, la deforestación puede ser responsable de casi el 10 % de las emisiones totales del sector del mineral de hierro. En la Tabla 1, estimamos las tasas de emisión relacionadas con 1 t de concentrado de mineral de hierro y 1 t de pellets.

Tabela 1: Tasas de emisión de CO₂ eq de 1 tonelada de concentrado y pellets de mineral de hierro

Actividad	Concentrado de mineral de hierro	Pellets
Uso de la tierra	5,2	4,9
Extracción y concentración	22,2	21,0
Transporte	6,6	6,3
Peletización	0	80,4
Exportación	20,2	15,5
Total	54,2	128,1

Fonte: Ver anexo metodológico
Observación: Todos los valores están en kg CO₂ eq/t.

Como se analizó en la Sección 2, existen muchos desafíos en el desarrollo de estudios sobre emisiones de GEI para el sector minero, y enfrentamos la mayoría de ellos en esta investigación. Estas limitaciones crean dificultades a la hora de comparar resultados de diferentes estudios. Sin embargo, aquí resumimos algunos estudios existentes para colocar nuestra investigación en perspectiva.

Pocos autores han intentado evaluar las emisiones de GEI del sector del mineral de hierro en Brasil. Por ejemplo, Lovón-Canchumani *et al.* (2015) estudiaron varios impactos ambientales de producir 1 t de pellets. La investigación se basó en datos de Samarco Mineração, en 2013. Los autores consideraron actividades de minería, concentración y peletización. Consideraron los impactos hasta el momento en que los pellets llegan al puerto para su exportación. En este caso, las emisiones logísticas fueron bajas porque Samarco utiliza ductos, no ferrocarriles, para transportar su

mineral desde Minas Gerais a las plantas de peletización en Espírito Santo. Desde el punto de vista de las emisiones de GEI, los autores encontraron que las actividades más relevantes fueron la concentración de minerales (30 %), la electricidad (18 %) y la minería (11 %). Si bien se trata de un estudio relevante, el trabajo se limitó a observar la participación relativa de las actividades y no estimó la cantidad de GEI emitidos.

En otro trabajo, Ferreira y Leite (2015) intentaron evaluar los impactos ambientales del mineral de hierro en Brasil; en este caso, identificaron los impactos en términos absolutos. Los autores también utilizaron datos primarios de Samarco Mineração, además de otra información secundaria. Su unidad de análisis fue 1 t de concentrado de mineral de hierro "en la puerta". Las actividades involucradas incluyeron extracción, concentración y sistemas de soporte (incluido transporte de personas y gestión de residuos). Al debatir sobre el cambio climático, los autores concluyeron que la producción de 1 t de concentrado de mineral de hierro libera 13,3 kg de CO₂ eq; asocian las emisiones de GEI principalmente al consumo de electricidad en la planta de concentración (31,5 %), molienda (17,0 %) y sistemas de soporte (8,9 %). A pesar de la similitud en la definición de fronteras, los resultados presentados por Ferreira y Leite (2015) para la extracción y procesamiento de minerales son superiores a los encontrados por MME (2013) e IBRAM (2014, 2024), que se presentaron en la Sección 3.2.

Nuestras estimaciones exclusivamente para las actividades de extracción y concentración fueron superiores a las cifras de IBRAM (2014, 2024) y de Ferreira y Leite (2015). Esta evaluación puede sugerir algunas limitaciones en nuestros supuestos, posiblemente asociadas con el contenido del mineral utilizado en nuestros análisis. Sin embargo, la adopción de factores de emisión de estos estudios fortalece aún más nuestro argumento, ya que aumenta la importancia relativa de las actividades logísticas .

Además de estas investigaciones que analizan específicamente a Brasil, otros estudios han intentado estimar las emisiones de GEI de la extracción de mineral de hierro con base en datos de países específicos, como Australia y China. En gran medida, nuestra investigación se inspiró en estos estudios, ya que buscaban estimar las emisiones a lo largo de todo el ciclo de vida del producto y no considerar solo algunos procesos específicos.

Haque (2022) desarrolló un estudio muy detallado sobre el consumo de energía y las emisiones de GEI del mineral de hierro en Australia. Actualizó y amplió investigaciones anteriores (Norgate y Haque, 2010) basadas principalmente en datos primarios e información de la literatura. Definió una unidad funcional como 1 t de mineral de hierro "lista para ser cargada en un barco". Esto equivaldría a 1 t de concentrado de mineral, pero, como se mencionó anteriormente, debido al alto grado de las reservas australianas, la mayor parte del mineral requiere menos

transformación que el extraído en Minas Gerais. El autor incluyó en su estudio los impactos de la perforación y detonación, carga y transporte, trituración y cribado, apilamiento y recuperación, transporte ferroviario y operaciones portuarias. La gran distancia entre las minas y los puertos de Australia justifica la inclusión del transporte ferroviario. Este estima las emisiones en 11,9 kg de CO₂ eq/t y asocia las emisiones principalmente a la carga y transporte (50,5%), trituración y cribado (21,0%) y transporte ferroviario (10,9%). Utilizando datos de 2011, el autor concluye que las emisiones anuales procedentes de la extracción y el procesamiento del mineral de hierro equivalen a 5,800 mil millones de kg de CO₂ eq.

En la segunda parte de su artículo, Haque (2022) presenta algunos escenarios relacionados con el transporte marítimo internacional. Estima la contribución de diferentes actividades, considerando los puertos chinos como la "puerta". En este análisis, las emisiones de GEI relacionadas con el transporte marítimo de mineral de hierro equivalieron al 56,9 % de todas las emisiones, casi siete veces las emisiones de "carga y transporte", que fueron los principales contribuyentes en su primera evaluación. Estos datos indican la relevancia del transporte marítimo internacional y cómo definir su alcance puede modificar considerablemente los resultados de una investigación.

Gan y Griffin (2018) desarrollaron otro estudio muy completo para evaluar las emisiones de GEI de la extracción de mineral de hierro en China. Su unidad funcional fue 1 t de concentrado de mineral de hierro entregado en la usina siderúrgica. Los autores incluyeron en su análisis la minería a cielo abierto y subterránea, el procesamiento de minerales, el transporte ferroviario y los procesos de aglomeración (peletización y sinterización). A diferencia de estudios anteriores, estimaron las emisiones derivadas de la descomposición de la biomasa reemplazada por las minas y la reducción de la productividad fotosintética durante la vida útil de las minas. Los datos se recopilaron de literatura científica e informes gubernamentales. Los autores presentaron tres escenarios diferentes, que suponían diferentes fuentes de consumo de energía.

El estudio concluyó que la minería a cielo abierto emite entre 35 y 39 kg de CO₂ eq/t, según el escenario. Las actividades más significativas fueron carga y transporte (67%), seguidas de vegetación y remoción de suelo (24%). Al agregar concentración de mineral, las emisiones aumentaron de 100 a 120 kg CO₂ eq/t. La inclusión del transporte y la aglomeración hizo que la tasa de emisión alcance 270 - 280 kg CO₂ eq/t. Las emisiones de la sinterización se estimaron en 200 - 280 kg CO₂ eq/t, y la contribución de la peletización se estimó en 25 - 30 kg CO₂ eq/t.

Cuando miramos los estudios internacionales, vemos que tienden a ser más completos que los realizados en Brasil. No se limitan a las actividades de extracción y concentración, sino que incluyen la logística y el uso del suelo. Estas experiencias refuerzan nuestro argumento de que dichas actividades también se deben incluir en los estudios realizados en Brasil.

Además, los estudios existentes muestran que el contexto local (por ejemplo, ley del mineral, distribución espacial de las minas, infraestructura logística, fuentes de energía, etc.) - probablemente resulte en diferencias considerables en las emisiones de mineral de hierro en diferentes países. Debido a tales diferencias, cualquier comparación de valores con otros países debe hacerse con cautela. En comparación con el trabajo de Haque (2022), nuestros resultados de extracción y concentración son más altos. Por otro lado, nuestros datos son considerablemente más bajos que los presentados por Gan y Griffin (2018). Hasta cierto punto, este resultado era esperado, principalmente debido a las diferencias en los grados del mineral de hierro en los tres países, sin embargo no son concluyentes, ya que pueden ser necesarios otros ajustes metodológicos.

5.

Consideraciones finales

A lo largo de este texto, sostenemos que, al evaluar las emisiones de los productos minerales, casi siempre orientados a la exportación, la metodología “de la cuna a la puerta” debería considerar la “puerta del consumidor” en lugar de la “puerta de la mina”. En otras palabras, al intentar medir la “huella de carbono” de un producto, basándose en los principios del ACV, el foco de los análisis debe ir más allá del “proceso”, considerando impactos que van más allá de los que ocurren “dentro de las paredes” de las empresas. En este sentido, con esta investigación intentamos adaptar metodológicamente los datos sobre la “huella de carbono” del mineral de hierro extraído en Brasil en base a estándares adoptados internacionalmente.

Históricamente, los datos oficiales y las investigaciones académicas en Brasil sobre las emisiones de GEI relacionadas con el mineral de hierro se han limitado a las etapas de extracción y concentración. Esta definición restringida de los límites del sistema resulta en la subestimación de la intensidad real de emisiones del mineral extraído en el país. Al adoptar propuestas metodológicas descritas en la literatura internacional e incorporar emisiones relacionadas con la logística, nuestros resultados difieren considerablemente de estudios anteriores. De esta manera, planteamos la necesidad de ampliar los debates sobre cómo mejorar las estimaciones de emisiones asociadas a minerales en el país.

Además, nuestra investigación también sugiere la necesidad de estudios más detallados sobre las emisiones relacionadas con la deforestación y el cambio de uso de la tierra resultante de proyectos minerales. Nuestras estimaciones solo para estas emisiones correspondieron a alrededor del 65 % de la intensidad total de emisiones estimada por el IBRAM (2024). El Instituto, sin embargo, no describe la metodología adoptada en sus estimaciones, lo que impidió comparar los resultados.

Como se menciona en la sección 2, uno de los mayores obstáculos para realizar investigaciones de esta naturaleza es la dificultad para acceder a los datos. La realización de este estudio enfrentó muchos desafíos, en particular en lo que respecta a las emisiones de las actividades de extracción y concentración. Si las bases de información que utiliza el sector para sus cálculos fueran de acceso abierto, sería posible realizar estimaciones independientes con mayor precisión. Además, algunas de las estimaciones presentadas en este trabajo solo fueron posibles debido a la hegemonía del mineral de hierro en el sector extractivo brasileño y la consiguiente existencia de algunos datos públicos para este segmento. Por lo tanto, se requiere una mayor transparencia del sector para permitir investigaciones similares sobre otros minerales.

En términos generales, entendemos que el principal aporte de esta investigación es metodológico. Debido a todas las dificultades descritas a lo largo del trabajo, no es posible decir que encontramos “el valor correcto” de la “huella de carbono” del mineral de hierro extraído en Brasil. Por el contrario, entendemos que nuestro mayor aporte se basa en “cómo” estimar este valor.

Dado que Brasil será el anfitrión de la COP30 en 2025, es probable que diferentes sectores de uso intensivo de energía, como la minería, se vean cada vez más presionados a presentar datos sobre sus emisiones de GEI. Nuestra investigación se centra en experiencias internacionales y sugiere la necesidad de estudios más completos que los que se están realizando hasta la fecha. Esperamos que sirva de inspiración para que otros investigadores, y el propio sector, sigan este camino para presentar una mejor estimación del impacto de la minería en el cambio climático.

6.

Anexo metodológico

Para realizar este estudio se debieron asumir una serie de presupuestos. Además, se consultaron diferentes fuentes de información, bases de datos, así como artículos técnicos y científicos. Para no fatigar a los lectores, los detalles metodológicos de la investigación no se incluyeron en el cuerpo del texto. Por otro lado, optamos por presentar esta información en este anexo, para permitir que otros investigadores conozcan nuestra metodología, la aprovechen y la mejoren. Los datos están organizados por actividad evaluada, específicamente: uso del suelo; extracción, concentración y peletización; transporte terrestre; y comercio internacional.

Uso de la tierra

Los vínculos entre la minería, la deforestación y las emisiones de GEI se encuentran ampliamente documentados en la literatura. Liu *et al.* (2021) destacan que la expansión de la minería en áreas forestales conduce a la pérdida de árboles y al aumento de emisiones. Grantham *et al.* (2021) identificaron que las concesiones de extracción de minerales amenazan el 11 % de las áreas forestales intactas del mundo. Los autores también señalaron que Brasil representa el 60 % del total de áreas amenazadas. También respecto de Brasil, Giljum *et al.* (2022) mencionaron que las actividades mineras pueden provocar deforestación hasta 50 km más allá de los límites de la concesión. En la misma línea, Sonter *et al.* (2017) estimaron que la deforestación inducida por la minería en la Amazonia puede alcanzar hasta 12 veces el tamaño de los polígonos explorados. Los autores sostienen que este alto nivel de impacto se debe a actividades de apoyo, como la logística y descarte de residuos, y a efectos indirectos, como el desplazamiento de agricultores y la expansión urbana.

Para estimar las emisiones asociadas con la deforestación, utilizamos dos fuentes de datos principales. En cuanto al tamaño de las áreas, adoptamos los números del Proyecto Mapbiomas (2023), que, a partir de imágenes satelitales, estima las áreas deforestadas directamente asociadas a la minería. Los procedimientos para estas evaluaciones fueron descritos por Souza Jr *et al.* (2020).

Siguiendo la propuesta de Sonter *et al.* (2017), para la Región Amazónica multiplicamos por 12 el área directamente asociada a la minería por el Proyecto Mapbiomas (2023). Esto se hizo para incluir la deforestación inducida por proyectos mineros. Sin embargo, para otros biomas solo se consideró la deforestación directa. Esta decisión se basó en la falta de información sobre la deforestación indirecta fuera de la Amazonia. Además, considerando la red urbana de Minas Gerais, asumimos que la deforestación inducida por la minería en este estado es menor que en la Región Amazónica.

Para estimar la cantidad de emisiones de carbono asociadas con la deforestación, seguimos los procedimientos descritos por Gan y Griffin (2018) e incluimos las emisiones relacionadas con las reservas de carbono de la vegetación y la pérdida de producción primaria neta. Las emisiones asociadas al stock de carbono se refieren a los GEI generados por la deforestación y se estimaron con base en la variación anual del área forestal entre 2016 y 2020. La producción primaria neta, a su vez, está asociada a la cantidad neta de carbono que los bosques capturan de la atmósfera a través de la fotosíntesis. La inclusión de esta variable se basa en el supuesto de que, luego de que un área es deforestada, deja de capturar carbono. Para estimar la pérdida de producción primaria neta, aplicamos coeficientes de incremento de carbono de los bosques vírgenes a toda el área deforestada, según biomas específicos (Amazonas, Cerrado y Caatinga). Las emisiones se basaron en Shimbo *et al.* (2022), quienes describieron los procedimientos metodológicos del Sistema de Estimación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

Extracción, concentración y peletización.

Aunque existen numerosas estadísticas públicas sobre el sector del mineral de hierro, proporcionan poca información sobre las emisiones de GEI del sector. Los datos publicados periódicamente incluyen la cantidad de mineral extraído y procesado y la cantidad de pellets producidos. Hay algunos datos más antiguos sobre emisiones de años específicos, como se describe en la Sección 3.2, pero no hay detalles disponibles sobre eficiencia energética o emisiones relacionadas con actividades específicas. En cuanto a los trabajos académicos, suelen centrarse en datos y en una sola empresa, lo que dificulta la generalización. Ante esta falta de datos, para estimar las emisiones de GEI provenientes de la extracción y procesamiento, ajustamos la información de la base de datos Ecoinvent al contexto brasileño, considerando la matriz energética y la calidad del diésel utilizado en el país.

Se encontraron las mismas dificultades y limitaciones para las estimaciones de las emisiones asociadas con la peletización. En este caso, también adaptamos la información de Ecoinvent a la realidad brasileña.

Transporte terrestre

Como se describe en la Sección 4.1, en Brasil el mineral de hierro se transporta principalmente por ferrocarril. ANTT (2021) publica informes periódicos en los que presenta, para todas las empresas ferroviarias en operación, información como carga total, carga de productos específicos (por ejemplo, mineral de hierro, carbón, fertilizantes, azúcar, soja, etc.) y consumo promedio de combustible. Esta información se utilizó para estimar el consumo de combustible relacionado con el transporte de mineral de hierro por ferrocarril y las emisiones se calcularon con base en datos del Programa Brasileño GHG Protocol (FGVces, 2023).

Durante el período analizado, alrededor del 4% del mineral de hierro fue transportado por ductos. Dos empresas, Anglo American y Samarco, utilizan este sistema logístico. Sin embargo, debido al colapso de la presa de relaves de Fundão en diciembre de 2015, Samarco interrumpió su operación al año siguiente y reanudó la extracción recién en 2020. Por lo tanto, las cifras referentes al transporte por ductos se refieren principalmente a Anglo American (Anglo American, 2023; Samarco, 2023). Esta información se utilizó principalmente para alimentar el balance de masa, ya que las emisiones de GEI del transporte por ductos se consideraron extremadamente bajas y no se incluyeron en nuestras estimaciones.

Por último, no existen datos agregados sobre el transporte por carretera de mineral de hierro. Aunque es poco común, existe para algunos casos concretos. Aunque estimamos la cantidad de mineral transportado por camiones, no incluimos su contribución a las emisiones de GEI debido a la falta de datos consistentes, especialmente sobre la distancia recorrida. Debido a esta decisión, se puede suponer que las emisiones del transporte terrestre probablemente sean incluso mayores que las presentadas.

Comercio internacional

Entre 2016 y 2020, Brasil exportó mineral de hierro a más de 200 países. Para estimar las distancias de transporte, organizamos los datos según las diferentes regiones del mundo (Asia, Europa, Medio Oriente, América del Sur, América del Norte, América Central y Oceanía) y consideramos la distancia promedio ponderada de los países que sumaron más de 50 % del mercado en cada región en 2020. Utilizamos los datos proporcionados por Bertoli, Goujon y Santoni (2016), que consideran las distancias entre puertos relevantes considerando el camino más corto entre ellos. El número de países representativos, su participación en el comercio regional y sus respectivas distancias se presentan en la Tabla 1. Después de definir la distancia promedio ponderada, consideramos la proporción de mineral de hierro y pellets exportados a cada región para estimar la tasa promedio de emisión de GEI.

Tabela 2: Principales países importadores de mineral de hierro brasileño

Región	Principales países importadores	% das importaciones dentro de la región	Distancia de Brasil (km)
Asia	China	85%	21.462
Europa	Países Bajos	32%	10.110
	Turquía	23%	12.045
Oriente Medio	Omán	54%	14.682
	Bahréin	44%	16.771
América del Sur	Argentina	73%	2.690
América del Norte	Estados Unidos	55%	9.777
	Canadá	45%	9.373
África	Egito	69%	12.755
América Central y Caribe	Trinidad y Tobago	82%	6.122
Oceanía	Australia	100%	17.774

Fuente: Adaptado de Bertoli *et al.* (2016); Secex (2023).

Además de la distancia, era necesario considerar otras variables. Entre los parámetros más relevantes incluimos el material que se transporta, el tamaño del barco y la eficiencia de carbono del sistema de transporte, de acuerdo a las orientaciones de Azadi *et al.* (2020). En esta investigación, asumimos que las empresas mineras utilizan barcos Capesize o Valemax y las emisiones se estimaron con base en literatura especializada (Lucena, 2018). Presumimos que los Valemax solo transportan mineral de hierro (y no pellets) y que apenas realizan viajes entre Brasil y China; el resto de la carga de mineral de hierro se transporta en barcos Capesize. En cuanto al transporte de pellets, asumimos únicamente el uso de barcos Capesize.

Referencias

Anglo American. (2023). Reports library. Acessado em: Nov 09, 2023, Disponível em: <https://www.angloamerican.com/investors/annual-reporting/reports-library/report-2023>

ANM. (2020). *Anuário Mineral Brasileiro 2020. Ano base 2019 Principais substâncias metálicas*. Brasília: Agência Nacional de Mineração.

ANTT. (2020). *Relatório de anual de atividades - exercício 2019*. Brasília: Agência Nacional de Transportes Terrestres.

ANTT. (2021, 25 Jan). Tabelas Excel. *Agência Nacional de Transporte Terrestres*. Acessado em: 18 Feb 2023, Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/anuario-do-setor-ferroviario/arquivos-tabelas-excel>

ANTT. (2023, Aug 21). Transporte de Carga - Origem Destino- 2006 - julho 2023. Acessado em, Disponível em: <https://www.gov.br/antt/pt-br/assuntos/ferrovias/anuario-do-setor-ferroviario/arquivos-tabelas-excel>

Awuah-Offei, K., e Adekpedjou, A. (2011). Application of life cycle assessment in the mining industry. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, 82-89.

Azadi, M., Northey, S. A., Ali, S. H., e Edraki, M. (2020). Transparency on greenhouse gas emissions from mining to enable climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 13(2), 100-104.

Beresford, A., Pettit, S., e Liu, Y. (2011). Multimodal supply chains: iron ore from Australia to China. *Supply Chain Management: An International Journal*, 16(1), 32-42.

Bertoli, S., Goujon, M., e Santoni, O. (2016). The CERDI-seadistance database, *Études et Documents*, nº 7, CERDI. Acessado em, Disponível em: <https://ferdi.fr/en/indicators/the-cerdi-seadistance-database>

de Eicker, M. O., Hischier, R., Kulay, L. A., Lehmann, M., Zah, R., e Hurni, H. (2010). The applicability of non-local LCI data for LCA. *Environmental Impact Assessment Review*, 30(3), 192-199.

de Haes, H. A. U. (1993). Applications of life cycle assessment: expectations, drawbacks and perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 1(3-4), 131-137.

DNPM. (2010). *Sumário Mineral 2009*. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, Ministério de Minas e Energia.

DNPM. (2012). *Sumário Mineral 2012*. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral, Ministério de Minas e Energia.

EPE. (2022). *Brazilian Energy Balance*. Brasília: Empresa de Pesquisa Energética, Ministério de Minas e Energia.

Farjana, S. H., Huda, N., Mahmud, M. P., e Saidur, R. (2019). A review on the impact of mining and mineral processing industries through life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 231, 1200-1217.

Ferreira, H., e Leite, M. G. P. (2015). A Life Cycle Assessment study of iron ore mining. *Journal of Cleaner Production*, 108, 1081-1091.

FGVces. (2023). Programa Brasileiro GHG Protocol. Version 2023.0.3. Acessado em, Disponível em: <https://eaesp.fgv.br/centros/centro-estudos-sustentabilidade/projetos/programa-brasileiro-ghg-protocol>

Gan, Y., e Griffin, W. M. (2018). Analysis of life-cycle GHG emissions for iron ore mining and processing in China—Uncertainty and trends. *Resources Policy*, 58, 90-96.

Giljum, S., Maus, V., Kuschnig, N., Luckeneder, S., Tost, M., Sonter, L. J., e Bebbington, A. J. (2022). A pantropical assessment of deforestation caused by industrial mining. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 119(38), e2118273119.

Grantham, H. S., Tibaldeschi, P., Izquierdo, P., Mo, K., Patterson, D. J., Rainey, H., . . . Jones, K. R. (2021). The emerging threat of extractives sector to intact forest landscapes. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4, 692338.

Greenhouse Gas Protocol. (2022, Jun). Scope 3 Frequently Asked Questions. Acessado em: May 24, 2024, Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2022-12/Scope%203%20Detailed%20FAQ.pdf>

Haque, N. (2022). Life cycle assessment of iron ore mining and processing. In L. Lu (Ed.), *Iron ore: mineralogy, processing and environmental sustainability* (pp. 691-710). Pullenvale (Brisbane): Elsevier.

Holmes, R. J., Lu, Y., e Lu, L. (2022). Introduction: overview of the global iron ore industry. In L. Lu (Ed.), *Iron ore: mineralogy, processing and environmental sustainability* (pp. 1-56). Pullenvale (Brisbane): Elsevier.

IBRAM. (2014). *II Inventário de gases efeito estufa do setor mineral*. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração.

IBRAM. (2024). *Inventário de emissões de gases de efeito estufa do setor mineral 2024. Ano base 2022*. Brasília: Instituto Brasileiro de Mineração.

Irarrázabal, R. (2006). Mining and climate change: towards a strategy for the industry. *Journal of Energy & Natural Resources Law*, 24(3), 403-422.

ISO. (2006). *ISO 14040:2006 Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework*. Geneva: International Organisation for Standardisation.

ITC. (2023). Trade Map. *International Trade Centre*. Acessado em: 25 Feb, Disponível em: <https://www.trademap.org>

Liu, L.-y., Ji, H.-g., Lü, X.-f., Wang, T., Zhi, S., Pei, F., e Quan, D.-l. (2021). Mitigation of greenhouse gases released from mining activities: A review. *International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials*, 28, 513-521.

Lovón-Canchumani, G. A., Lima, F. M. R. S., e Oliveira, P. P. (2015). *Avaliação do Ciclo de Vida na mineração: estudo da produção de minério de ferro*. Rio de Janeiro: Centro de Tecnologia Mineral.

Lucena, A. F. P. (2018). *Sustainable freight transport in support of the 2030 Agenda for Sustainable Development*. In: UNCTAD Multiyear Expert Meeting on Transport, Trade Logistics and Trade Facilitation, Geneva.

MCTI. (2022). Sistema de Registro Nacional de Emissões (Sirene). Resultados da 6a Edição das Estimativas MCTI (1990-2020). *Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações*. 6th. Acessado em: May 24, 2024, Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene>

MESDE. (2012). *CO2 Information for transport services: Application of Article L. 1431-3 of the French transport code*. Paris: Ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.

Milanez, B., Ali, S. H., e Puppim Oliveira, J. A. (2021). Mapping industrial disaster recovery: lessons from mining dam failures in Brazil. *The extractive industries and society*, 8(2), 100900.

MME. (2013). Plano setorial de mitigação e de adaptação à mudança do clima na mineração. Plano de Mineração de Baixa Emissão de Carbono (Plano MBC). Brasília: Ministério de Minas e Energia.

Norgate, T., e Haque, N. (2010). Energy and greenhouse gas impacts of mining and mineral processing operations. *Journal of Cleaner Production*, 18(3), 266-274.

Nuss, P., e Eckelman, M. J. (2014). *Life cycle assessment of metals: a scientific synthesis*. *PloS one*, 9(7), e101298.

Odell, S. D., Bebbington, A., e Frey, K. E. (2018). Mining and climate change: A review and framework for analysis. *The extractive industries and society*, 5(1), 201-214.

OECD. (2018). *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic drivers and environmental consequences*. Paris: Organisation for Economic Co-operation and Development.

Papadionysiou, S. (2014). *Analysis of the economics of Valemax vessels*. (M.Sc.), Norwegian School of Economics, Bergen.

Projeto Mapbiomas. (2023). Mining (Collection 8) da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil. Acessado em: Nov 20, 2023, Disponível em: <https://brasil.mapbiomas.org/en/estatisticas/>

Samarco. (2023). Relatórios de sustentabilidade. Acessado em: Nov 09, 2023, Disponível em: <https://www.samarco.com/relatorios/>

Secex. (2023). Comex Stat. *Secretaria de Comércio Exterior, Ministério da Indústria, Comércio Exterior e Serviços*. Acessado em: Nov 09, 2023, Disponível em: <http://comexstat.mdic.gov.br/pt/home>

Shimbo, J., Souza, E., Silva, C., Zimbres, B., Alencar, A., Jr., A. B., . . . Azevedo, T. (2022). *Nota Metodológica SEEG 9 Setor Mudança de Uso da Terra e Florestas (Versão 4)*. Belém: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM); Sistema de Estimativa de Emissão de Gases de Efeito Estufa.

Sonter, L. J., Herrera, D., Barrett, D. J., Galford, G. L., Moran, C. J., e Soares-Filho, B. S. (2017). *Mining drives extensive deforestation in the Brazilian Amazon*. *Nature communications*, 8(1), 1013.

Souza Jr, C. M., Z. Shimbo, J., Rosa, M. R., Parente, L. L., A. Alencar, A., Rudorff, B. F., . . . Souza-Filho, P. W. (2020). Reconstructing three decades of land use and land cover changes in brazilian biomes with landsat archive and earth engine. *Remote Sensing*, 12(17), 2735.

Steubing, B., de Koning, D., Haas, A., e Mutel, C. L. (2020). The Activity Browser—An open source LCA software building on top of the brightway framework. *Software Impacts*, 3, 100012.

Stewart, M. (2001). *MMSD Life Cycle Assessment Workshop: The application of Life Cycle Assessment to mining, minerals and metals*. Sydney: Mining, Minerals and Sustainable Development (MMSD) Project, International Institute for Environment and Development.

Tuck, C. C. (2022). *Iron ore*. In USGS (Ed.), *Mineral Commodity Summaries*. Reston: U.S. Geological Survey.

U.S. Bureau of Mines. (1996). *Dictionary of Mining, Mineral, and Related Terms*. Washington: U.S. Bureau of Mines.

Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., e Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21, 1218-1230.

Yang, Y. (2016). *Economic analysis on the 400K DWT VLOC*. (M.Sc.), World Maritime University, Shanghai.

Yellishetty, M., Ranjith, P. G., Tharumarajah, A., e Bhosale, S. (2009). Life cycle assessment in the minerals and metals sector: a critical review of selected issues and challenges. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 14, 257-267.



COMITÊ NACIONAL EM
DEFESA DOS TERRITÓRIOS
FRENTE À MINERAÇÃO



IGREJAS Y MINERÍA

Apoyo:

CAFOD
Just one world