

Uma Avaliação Preliminar da Pegada de Carbono do Lítio no Brasil

Marisa Nascimento¹, Paulo Sergio Moreira Soares¹

¹Centro de Tecnologia Mineral – CETEM/MCTI, Rio de Janeiro, Brasil (e-mail: marisanascimento@gmail.com)

Resumo: Neste trabalho, estimou-se a pegada de carbono da produção de concentrado mineral de lítio no Brasil com Avaliação do Ciclo de Vida. A unidade funcional foi 1 t de carbonato de lítio equivalente (LCE). A pegada foi de 1.220 kg CO_{2eq}/t LCE. A produção de nitrato de amônio para explosivos foi a maior contribuição (456 kg). A substituição da matriz elétrica por fontes eólica ou solar reduziria a pegada em 22,7% e 14,7% respectivamente.

Palavras-chave: Lítio; pegada de carbono; mineração; avaliação do ciclo de vida.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda por lítio, impulsionada pela transição energética e pela fabricação de baterias para veículos elétricos (VE), torna essencial a compreensão dos impactos ambientais associados à sua produção. Entre esses impactos, a pegada de carbono — que quantifica as emissões de gases de efeito estufa (GEE) ao longo do ciclo de vida de um produto — tem recebido atenção crescente de investidores, consumidores e formuladores de políticas públicas. A descarbonização da economia global coloca o lítio em posição estratégica, sendo considerado um mineral crítico para o desenvolvimento de tecnologias de baixo carbono.

Dados da Agência Internacional de Energia (IEA) mostram que a demanda por baterias para veículos elétricos atingiu mais de 1 TWh em 2024, um aumento de 33% em relação a 2023.

Por outro lado, a demanda por lítio alcançou cerca de 205kt em 2024. O crescimento da demanda mundial média anual do metal aumentou quase 30% no período entre 2021 e 2024, superando significativamente a taxa de crescimento anual de 10% observada na década de 2010. O setor de energia representou 80% do crescimento total da demanda no período 2022-2024 (IEA 2025).

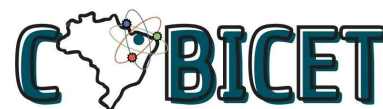
Adicionalmente, espera-se um crescimento significativo da demanda mundial por este elemento nos curto e médio prazos, impulsionado não apenas pela mobilidade elétrica, mas também pela expansão de sistemas de armazenamento de energia estacionários, essenciais para a integração de fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, às redes elétricas.

Além de seu papel central na fabricação de baterias, o lítio é intensivamente utilizado na produção de vidros e cerâmicas especiais, graxas lubrificantes, medicamentos e como fonte de trítio (Li-6) para aplicações em tecnologias de defesa e reatores

nucleares. Essa diversidade de aplicações confere ao lítio um caráter multifacetado, tornando-o um elemento de interesse geopolítico e econômico.

O Brasil possui ambiente geológico favorável para a ocorrência de lítio, particularmente no estado de Minas Gerais, com destaque para o Vale do Jequitinhonha, região que concentra os principais depósitos de pegmatitos litíferos do país. Esse cenário tem incentivado investimentos significativos em novos projetos de pesquisa e lavra (Paes et al., 2023; Vieira e Almeida, 2023). Em 2024, o país produziu aproximadamente 944.114 toneladas de concentrado de espodumênio com teor médio de 5,7% de Li₂O (ANM, 2025). Atualmente, três empresas operam em Minas Gerais: a Companhia Brasileira de Lítio (CBL), com mina subterrânea e planta de beneficiamento em Itinga; a AMG Brasil, com mina a céu aberto em Nazareno, produzindo concentrado de espodumênio como coproduto da extração de tântalo; e a Sigma Lithium, que iniciou operações em 2023 no complexo Grota do Cirilo, em Aracuaí e Itinga, com mina a céu aberto e planta de beneficiamento de alta capacidade (Delboni et al., 2023; SEMAD, 2021). Novos projetos, como os das empresas Atlas Lithium, Lithium Ionic e Latin Resources, encontram-se em estágio avançado de licenciamento e desenvolvimento, com previsão de entrada em operação nos próximos anos, o que deverá posicionar o Brasil como um dos principais produtores mundiais de concentrado de lítio.

Estudos que fornecem estimativas detalhadas da pegada de carbono das operações iniciais da cadeia do lítio, como mineração e beneficiamento mineral, têm sido pouco frequentes na literatura especializada (Jiang et al., 2020). A maioria das avaliações de ciclo de vida (ACV), importantes para essas estimativas, concentram-se nas etapas finais da cadeia, notadamente na fabricação de baterias e na montagem de veículos elétricos. No entanto, a importância de examinar a pegada de carbono nessas etapas iniciais torna-se evidente ao comparar diferentes cadeias



produtivas, pois as operações finais de fabricação são relativamente padronizadas, enquanto as etapas iniciais apresentam diferenças significativas decorrentes da diversidade dos depósitos minerais, dos métodos de lavra, dos teores de minério e das rotas de beneficiamento empregadas (Manjong et al., 2021; Khakmardan et al., 2023).

O teor do minério, por exemplo, é um fator determinante. Como é comum em atividades de mineração, os teores tendem a diminuir ao longo dos anos, o que implica maior consumo de energia e, consequentemente, maiores emissões de GEE por unidade de metal produzido. Estudos sobre minas de cobre mostram que um declínio de 25% no teor ao longo de uma década resultou em um aumento de 46% no consumo total de energia (Calvo et al., 2016). Para o lítio, a situação é análoga: depósitos com teores mais baixos exigem a movimentação de maiores volumes de minério e estéril, aumentando a intensidade energética da operação.

Além do teor, o tipo de matriz energética utilizada no projeto mineiro tem efeito significativo na contabilização da pegada de carbono (Khakmardan et al., 2023; Fraunhofer-UMSICHT, 2023). Plantas de produção mineral de países com matrizes energéticas baseadas em fontes renováveis, como é o caso do Brasil, tendem a apresentar menor pegada de carbono e contribuem menos para o aquecimento global. A substituição de fontes de energia fósseis por energias renováveis nos processos de mineração e beneficiamento pode proporcionar benefícios ambientais significativos, além de reduzir custos operacionais no longo prazo (Valikandi e Choi, 2024). Estudos recentes indicam que a eletrificação da frota de equipamentos móveis e a implantação de sistemas de geração renovável no local da mina são estratégias viáveis e cada vez mais adotadas pela indústria mineral global.

Diante do cenário descrito, o presente estudo teve como objetivo estimar, utilizando uma abordagem de ciclo de vida, a pegada de carbono do lítio produzido no Brasil, com foco nas etapas de mineração e beneficiamento mineral, desde a extração até a obtenção do concentrado final (abordagem *cradle-to-gate*). Pretende-se, com isso, contribuir para o preenchimento da lacuna identificada na literatura nacional e fornecer subsídios para a tomada de decisão por parte de empresas, governos e demais partes interessadas na cadeia produtiva do lítio.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado utilizando uma abordagem de ciclo de vida para o cálculo da pegada de carbono, considerando as emissões de GEE ao longo das etapas analisadas. A metodologia segue, de forma geral, as diretrizes das normas ISO 14040 e ISO 14044, que

estabelecem os princípios e estrutura para a condução de estudos de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV).

2.1 Objeto de Estudo e Empresas Analisadas

Para a modelagem do sistema de produto da produção de lítio no Brasil, foram utilizados dados publicamente disponíveis das três empresas que atualmente exploram pegmatitos ricos em lítio no estado de Minas Gerais: CBL (Companhia Brasileira de Lítio), AMG Brasil e Sigma Lithium. Adicionalmente, foram consultadas publicações do governo do estado de Minas Gerais, incluindo documentos de licenciamento ambiental, relatórios técnicos e estudos de impacto ambiental (Pereira et al., 2014; SEMAD, 2021; Delboni et al., 2023).

A CBL opera a mina Cachoeira, no município de Itinga, com lavra subterrânea por câmaras e pilares. Sua planta de beneficiamento mineral tem capacidade para produzir 45.000 toneladas anuais de concentrado de espodumênio com teor médio de 5,5% de Li_2O , utilizando operações de britagem, classificação granulométrica, separação em meio denso e separação óptica e por raios-X (CBL, 2024).

A AMG Brasil opera a mina Volta Grande, no município de Nazareno, com lavra a céu aberto. O espodumênio é produzido como coproduto da extração de tântalo. O minério bruto é britado e enviado para espirais concentradoras, gerando duas frações: a fração pesada segue para as linhas de produção de tântalo e estanho, enquanto a fração leve, com cerca de 1% de Li_2O , é direcionada à planta de concentração de espodumênio, que conta com hidrociclones, deslamagem, separação magnética e células de flotação. O concentrado final atinge teores entre 5,5% e 6,4% de Li_2O , com capacidade anual de 90.000 toneladas (AMG, 2024).

A Sigma Lithium iniciou operações em 2023 no complexo Grota do Cirilo, nos municípios de Aracuaí e Itinga, com lavra a céu aberto nas cavas Xuxa Sul e Xuxa Norte. A planta de beneficiamento utiliza classificação, separação magnética e separação em meio denso, produzindo concentrados com teor médio de 6% de Li_2O . A capacidade instalada é de 222.000 toneladas anuais, com previsão de expansão para 520.000 toneladas a partir de 2025 (Sigma Lithium, 2024).

2.2 Unidade Funcional e Limites do Sistema

A unidade funcional adotada foi 1 tonelada de carbonato de lítio equivalente (LCE) no concentrado mineral médio, considerando um teor de 14,6% LCE, que corresponde a aproximadamente 6% de Li_2O . O LCE é uma unidade convencionalmente utilizada na indústria para padronizar a comparação entre

diferentes produtos de lítio, independentemente da forma química em que se apresentam.

Os limites do estudo abrangeram as etapas de produção desde as matérias-primas em seu "berço" até o concentrado mineral entregue no "portão da fábrica" (abordagem *cradle-to-gate*), conforme ilustrado na Figura 1 que representa o Sistema de Produto objeto do presente estudo. Isso inclui:

Etapas de primeiro plano (*foreground*): mineração (perfuração, desmonte, carregamento e transporte) e beneficiamento mineral (britagem, moagem, classificação e concentração).

Etapas de fundo (*background*): produção e fornecimento de insumos (explosivos, combustíveis, reagentes de flotação e corpos moedores), bem como a geração de eletricidade consumida no processo.

As etapas posteriores da cadeia produtiva (refino químico, fabricação de baterias, uso e disposição final) não foram incluídas, bem como a embalagem, transporte de materiais e resíduos para destinação final, construção e descomissionamento de infraestrutura, e fabricação de equipamentos e veículos. A exclusão dessas etapas segue a prática comum em estudos de ACV do tipo *cradle-to-gate*, com foco na avaliação de matérias-primas minerais.

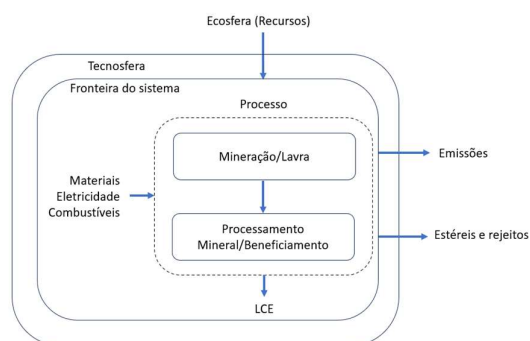


Figura 1. Sistema de produto

2.3 Inventário do Ciclo de Vida (ICV)

Foi realizado um inventário do ciclo de vida para quantificar as entradas (matérias-primas, insumos e energia) e saídas (emissões atmosféricas, efluentes e resíduos sólidos) associadas à produção do concentrado de lítio. Os dados de inventário foram calculados usando uma média ponderada dos dados coletados para cada uma das três empresas, com fatores de ponderação correspondentes à massa de LCE contida nos respectivos produtos, considerando suas capacidades instaladas de produção.

Essa abordagem visa representar, de forma agregada, o perfil médio da produção nacional de concentrado

de lítio, refletindo a contribuição relativa de cada operação para o total produzido no país.

2.4 Dados de Fundo (*Background*)

Os dados de fundo foram selecionados nos bancos de dados Ecoinvent 3.10 (Ecoinvent, 2024) e Agri-footprint 6.0 (Mérieux NutriSciences, 2024), priorizando, sempre que disponíveis, os conjuntos de dados com cobertura geográfica brasileira. Para insumos não disponíveis especificamente para o Brasil, foram utilizados conjuntos de dados globais ou representativos de outras regiões, com as devidas adaptações.

Os principais processos de fundo considerados incluem:

- Produção de diesel e gás natural;
- Geração de eletricidade (matriz brasileira);
- Fabricação de nitrato de amônio (explosivos);
- Produção de reagentes de flotação (ácido graxo, silicato de sódio, amina);
- Fabricação de corpos moedores e material para operação de equipamentos de concentração em meio denso (aço, ferro-silício);
- Produção de óleos lubrificantes e graxas.

2.5 Cálculo da Pegada de Carbono e Método de Avaliação de Impacto

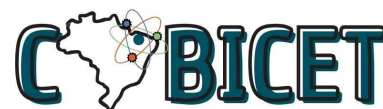
A pegada de carbono foi calculada utilizando o Potencial de Aquecimento Global (GWP) como métrica, considerando um horizonte de tempo de 100 anos (GWP100). O software utilizado foi o SIMAPRO 9.5, e o método de avaliação de impacto foi o ReCiPe 2016 Midpoint (H) (Huijbregts et al., 2017), que é um dos métodos mais amplamente utilizados em estudos de ACV e permite a caracterização dos impactos segundo diversas categorias ambientais. Os resultados foram expressos em kg de CO₂ equivalente (CO_{2eq}) por tonelada de LCE.

2.6 Estimativa de Emissões Atmosféricas

As emissões atmosféricas provenientes da combustão de combustíveis e da detonação de explosivos foram estimadas utilizando a metodologia descrita nos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2006; Buendia et al., 2019). Foram considerados os seguintes fatores de emissão para combustão de diesel em equipamentos móveis e estacionários:

$$\text{CO}_2 = 74.100 \text{ kg/TJ}$$

$$\text{CH}_4 = 4,15 \text{ kg/TJ}$$



$N_2O = 28,6 \text{ kg/TJ}$

O poder calorífico inferior do diesel utilizado foi de 10.100 kcal/kg, com densidade de 840 g/L, conforme dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2021).

Para as emissões decorrentes da detonação de explosivos, adotou-se o fator de referência de 0,17 t CO_{2eq} por tonelada de explosivo (GHG Protocol, 2016), considerando explosivos do tipo ANFO (nitrato de amônio + óleo combustível), com composição típica de 94% de nitrato de amônio e 6% de óleo diesel em massa. Este fator contempla tanto as emissões diretas da detonação quanto as emissões indiretas associadas à fabricação dos explosivos.

2.7 Análise de Sensibilidade

Foi realizada uma análise de sensibilidade para avaliar o efeito da substituição da matriz elétrica sobre a pegada de carbono do sistema de produto. Três cenários de geração foram considerados:

(i) Cenário base: utilização da matriz elétrica atual do Brasil, conforme dados do banco Ecoinvent para eletricidade de média tensão no país, que reflete uma matriz majoritariamente renovável (predomínio de hidroeleticidade, com participação crescente de fontes eólica, solar e biomassa).

(ii) Cenário com 100% de energia eólica: substituição total da eletricidade consumida por energia gerada em parques eólicos onshore, considerando conjuntos de dados específicos para o Brasil disponíveis no banco de dados Ecoinvent.

(iii) Cenário com 100% de energia solar (fotovoltaica): substituição total da eletricidade consumida por energia gerada em usinas solares fotovoltaicas, considerando conjuntos de dados disponíveis no banco de dados Ecoinvent para o Brasil.

A análise de sensibilidade permite quantificar o potencial de redução das emissões de GEE associado à adoção de fontes renováveis na matriz energética do setor mineral brasileiro, e pode fornecer subsídios para a tomada de decisão em relação a investimentos em geração própria ou contratação de energia no mercado livre.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Tabelas 1 e 2 apresentam o inventário do ciclo de vida para a produção de 1 tonelada de LCE no concentrado mineral de lítio no Brasil. Todos os insumos e saídas representam médias ponderadas da capacidade de produção nacional. Nenhum ônus ambiental foi alocado para coprodutos, ou seja, 100% da carga foi atribuída ao concentrado de lítio.

Tabela 1. Inventário do ciclo de vida de 1 tonelada de LCE produzido no Brasil: entradas no sistema de produto.

Insumos da ecosfera	
Água de rio (m^3)	7,24
Água de poço (m^3)	$1,64 \times 10^{-3}$
Uso da terra (ha.ano)	1,39
Oxigênio (kg)	$3,09 \times 10^{-2}$
Insumos da tecnosfera	
Diesel (kg)	$6,64 \times 10^1$
Gás natural (m^3)	$1,69 \times 10^1$
Argônio (kg)	$2,63 \times 10^{-1}$
Óleo lubrificante (kg)	$3,01 \times 10^{-1}$
Nitrato de amônio (kg)	$1,71 \times 10^2$
FeSi (t)	$1,59 \times 10^{-2}$
Barrilha (kg)	$1,33 \times 10^{-2}$
Pallets (unidades)	$2,30 \times 10^{-1}$
Eletricidade (MWh)	1,3

Tabela 2. Inventário do ciclo de vida de 1 tonelada de LCE produzido no Brasil: Saídas do sistema de produto.

Emissões atmosféricas	
CO_2 (kg)	$2,38 \times 10^2$
CH_4 (kg)	$1,16 \times 10^{-2}$
N_2O (kg)	$8,03 \times 10^{-2}$
NO_x (kg)	$4,21 \times 10^1$
Material particulado (kg)	1,18
SO_x (kg)	$2,11 \times 10^{-1}$
Hidrocarbonetos (kg)	1,01
Fluxos de resíduos	
Estéril (t)	$6,06 \times 10^2$
Rejeitos (t)	$2,52 \times 10^1$
Resíduos perigosos (kg)	$3,60 \times 10^1$
Resíduos não perigosos (kg)	$2,89 \times 10^{-1}$
Resíduos inertes (kg)	$5,73 \times 10^1$
Resíduos de óleo (t)	$3,63 \times 10^{-2}$
Resíduos de esgoto (t)	$5,04 \times 10^{-2}$
Resíduos de lâmpadas (kg)	$9,19 \times 10^{-3}$



Resíduos de embalagens plásticas (kg)	$3,45 \times 10^{-3}$
Resíduos de cobre (kg)	$2,30 \times 10^{-3}$
Outros resíduos metálicos (kg)	$3,45 \times 10^{-1}$

A pegada de carbono da produção de 1 tonelada de LCE no concentrado mineral foi estimada em 1.220 kg de CO_{2eq}. Deste total, 262 kg (21,5%) correspondem à contribuição direta dos processos de primeiro plano, resultante principalmente das emissões do consumo de combustível em equipamentos de perfuração/desmante, veículos de transporte interno e uso de explosivos.

Nos processos de fundo, a maior contribuição foi de 456 kg de CO_{2eq} (37,4%), proveniente das emissões associadas à fabricação de explosivos (nitrato de amônio) utilizados na mineração. Este resultado está alinhado com outros estudos que apontam a produção de explosivos como uma fonte significativa de emissões de CO_{2eq} nos processos de fundo (Yao et al., 2021). As emissões de GEE do nitrato de amônio são responsáveis por mais de 90% da contribuição para o aquecimento global na produção de explosivos, devido principalmente ao uso de amônia e ácido nítrico (Ferreira et al., 2015).

A segunda maior contribuição para a pegada de carbono deve-se à geração de energia elétrica, responsável por 290 kg de CO_{2eq}/t de LCE (23,8%).

A Figura 2 apresenta o diagrama Sankey com a contribuição à pegada de carbono para a produção de 1 t de LCE no Brasil decorrente da produção /utilização de diferentes insumos.

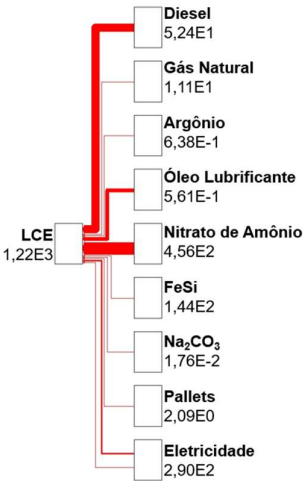


Figura 2. Contribuições para a pegada de carbono associada à produção de 1 tonelada de LCE no Brasil (kg de CO_{2eq})

A comparação com outros estudos revela uma ampla variabilidade nas estimativas de pegada de carbono para concentrados de lítio em todo o mundo. Na Austrália, maior produtor mundial de lítio de rocha dura, projetos como Greenbushes e Mt. Cattlin apresentam contribuições que variam de 5.000 a 26.000 kg CO_{2eq}/t LCE, significativamente superiores à estimativa deste trabalho, principalmente devido ao consumo de diesel para geração de energia elétrica (Khakmardan et al., 2023). Em outras operações na Austrália, Canadá e Finlândia, as emissões variam de 760 a 3.400 kg CO_{2eq}/t LCE (Chordia et al., 2022). Essa variabilidade é atribuída às características geológicas de cada depósito, aos processos de beneficiamento empregados e, fundamentalmente, às fontes de energia utilizadas.

O Brasil, por possuir uma matriz elétrica constituída sobretudo por fontes renováveis, detém uma vantagem competitiva natural em relação à contribuição da geração de eletricidade para o aquecimento global. Para avaliar o potencial de redução na pegada de carbono associada à produção de 1t de LCE, a ser obtida com a substituição da matriz elétrica atual do Brasil por fontes 100% renováveis, foi realizada uma análise de sensibilidade preliminar (Figura 3). Os resultados indicam que a adoção de energia eólica poderia reduzir a pegada de carbono em 22,7%, enquanto a energia solar fotovoltaica proporcionaria uma redução de 14,7%. Isso demonstra que a descarbonização das operações de mineração é um caminho viável para aumentar a sustentabilidade do setor. (Valikandi e Choi, 2024).

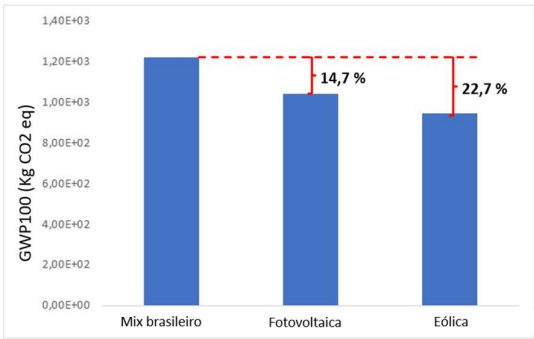
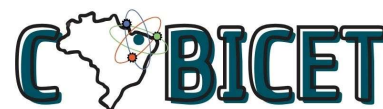


Figura 3. Análise de sensibilidade com a substituição da matriz elétrica atual no sistema de produto por fontes 100% renováveis.

CONCLUSÃO

O presente estudo estimou, de forma preliminar, a pegada de carbono da produção de concentrado mineral de lítio no Brasil, utilizando uma abordagem de avaliação do ciclo de vida do "berço ao portão". A contribuição para o aquecimento global foi estimada em 1.220 kg de CO_{2eq} por tonelada de carbonato de lítio equivalente (LCE).



A análise identificou que a maior parcela das emissões está associada a processos de fundo, destacando a produção de nitrato de amônio para explosivos (456 kg CO_{2eq}/t LCE), seguida pela geração de energia elétrica (290 kg CO_{2eq}/t LCE). As emissões diretas dos processos de primeiro plano corresponderam a 262 kg CO_{2eq}/t LCE, provenientes principalmente do consumo de combustível e do uso de explosivos nas operações de mina.

A comparação com estudos internacionais revela que a pegada de carbono do lítio brasileiro encontra-se na faixa inferior das estimativas globais para concentrados de espodumênio, o que pode ser atribuído, em grande parte, à matriz elétrica majoritariamente renovável do país. Adicionalmente, a análise de sensibilidade demonstrou que a substituição da matriz elétrica atual por fontes eólica ou solar poderia reduzir a pegada de carbono em 22,7% e 14,7%, respectivamente, indicando um caminho promissor para a descarbonização do setor.

Por fim, ressalta-se que este estudo é uma avaliação preliminar, baseada em dados públicos e médias ponderadas de capacidades instaladas de produção. Os resultados podem servir como referência inicial para futuras avaliações mais aprofundadas de pegadas e carbono associadas à produção de LCE à medida que novos projetos de lítio entrem em operação no país e dados primários adicionais se tornem disponíveis.

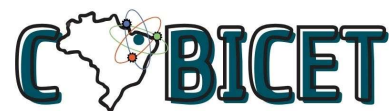
AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao MCTI e à Finep pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). **Sumário Mineral Brasileiro**. Brasília: ANM, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/assuntos/economia-mineral/publicacoes/sumario-mineral>. Acesso em: 2 mar. 2026.
- AMG BRASIL. **AMG Brasil**. 2024. Página institucional. Disponível em: <https://amg-br.com/pt/>. Acesso em: 30 jun. 2024.
- BUENDIA, C. et al. **2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Geneva: IPCC, 2019.
- CBL. **CBL - Companhia Brasileira de Lítio: Página Institucional**. 2024. Disponível em: <https://www.cblitio.com.br/>. Acesso em: 5 jun. 2024.
- CALVO, G. et al. Decreasing Ore Grades in Global Metallic Mining: A Theoretical Issue or a Global Reality? **Resources**, v. 5, n. 4, p. 36, 2016.

- CHORDIA, M. et al. Life cycle environmental impacts of current and future battery-grade lithium supply from brine and spodumene. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 187, p. 106634, 2022.
- DELBONI, H. Jr. et al. **Grota Do Cirilo Lithium Project – NI 43-101 Technical Report**. [S.l.]: Sigma Lithium, 2023.
- ECOINVENT. **Ecoinvent Version 3.10**. Disponível em: <https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.10>. Acesso em: 6 ago. 2024.
- EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanço Energético Nacional – Manual Metodológico – Nota Técnica EPE DEA 005/2021**. Rio de Janeiro: EPE, 2021. Disponível em: <http://www.epe.gov.br>. Acesso em: 20 mar. 2022.
- FERREIRA, C.; FREIRE, F.; RIBEIRO, J. Life-cycle assessment of a civil explosive. **Journal of Cleaner Production**, v. 89, p. 159-164, 2015.
- FRAUNHOFER-UMSICHT. **LCA of Battery-Grade Lithium**. Oberhausen: Fraunhofer-UMSICHT, 2023.
- GHG PROTOCOL. **Emissões de CO₂ pela detonação de explosivos industriais – versão 1.0**. São Paulo: FGV-EAESp, 2016.
- HUIJBREGTS, M. A. J. et al. **ReCiPe 2016: A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level**. Bilthoven: RIVM, 2017.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global Critical Minerals Outlook 2025**. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025>. Acesso em: 18 mar. 2026.
- IPCC. **2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories**. Geneva: IPCC, 2006.
- JIANG, S. et al. Environmental impacts of lithium production showing the importance of primary data of upstream process in life-cycle assessment. **Journal of Environmental Management**, v. 262, p. 110253, 2020.
- KHAKMARDAN, S. et al. Comparative Life Cycle Assessment of Lithium Mining, Extraction, and Refining Technologies: A Global Perspective. **Procedia CIRP**, v. 116, p. 606-611, 2023.
- MANJONG, N. B. et al. Life cycle modelling of extraction and processing of battery minerals – A parametric approach. **Batteries**, v. 7, n. 3, p. 57, 2021.



MÉRIEUX NUTRISCIENCES. **Agri-Footprint 6.0**. Disponível em: <https://blonksustainability.nl/agri-footprint>. Acesso em: 8 ago. 2024.

PAES, V. J. C. et al. **O Projeto Avaliação do Potencial do Lítio no Brasil na Província Pegmatítica Oriental do Brasil**. Rio de Janeiro: CPRM, 2023.

PEREIRA, N. T. L.; PEREIRA, M. G.; MARCOS, E. M. **Relatório de Avaliação de Desempenho Ambiental – RADA – Mina Volta Grande**. Belo Horizonte: SEMAD, 2014.

SECRETARIA DE ESTADO DE MEIO AMBIENTE E DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL (SEMAD). **Parecer n. 10/2021**. Belo Horizonte: SEMAD, 2021.

SIGMA LITHIUM. **Sigma Lithium Receives Binding Commitment from BNDES for a BRL 487 Million, 16-Year Loan to Fully Fund Second Greentech Carbon Neutral Plant in Brazil**. 2024. Disponível em: <https://sigmalithiumresources.com/sigma-lithium-receives-binding-commitment-from-bndes-for-a-brl-487-million-16-year-loan-to-fully-fund-second-greentechcarbon-neutral-plant-in-brazil/>. Acesso em: 2 out. 2024.

VALIKANDI, E. M.; CHOI, Y. Utilization of solar and wind power-generation systems in the mining industry: Recent trends and future prospects. **Journal of Sustainable Mining**, v. 23, n. 4, p. 388-396, 2024.

VIEIRA, G. L. G.; ALMEIDA, M. H. M. Lítio e o potencial geológico das jazidas do norte de Minas Gerais. **Portal Ambiente Legal**, 27 jun. 2023. Disponível em: <https://www.ambientelegal.com.br/litio-e-o-potencial-geologico-das-jazidas-do-norte-de-minas-gerais/>. Acesso em: 3 nov. 2024.

YAO, K. A. F. et al. Mining Impacts Assessment Using the LCA Methodology: Case Study of Afema Gold Mine in Ivory Coast. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v. 17, n. 2, p. 465-479, 2021.