

Data Centers, Minerais Críticos, Energia e Geopolítica: as bases da Inteligência Artificial

Data Centers, Critical Minerals, Energy, and Geopolitics: The Foundations of Artificial Intelligence

João Henrique Santana Stacciarini¹ 

Ricardo Junior de Assis Fernandes Gonçalves² 

Palavras-chave

Infraestrutura
Transição energética
Economia
Digital

Resumo

A inteligência artificial (IA) tem se expandido significativamente nos últimos anos, permeando diversos setores da economia e da vida cotidiana. Entretanto, essa rápida adoção exige uma análise das contrapartidas associadas ao seu funcionamento, muitas vezes desconhecidas pelo público. Com base em uma análise de dados extraídos de artigos acadêmicos, relatórios técnicos, repositórios de dados e documentos governamentais, este artigo explora as dimensões físicas, energéticas e geopolíticas subjacentes à IA. Apesar de frequentemente vista como imaterial, a IA depende de uma vasta e complexa infraestrutura física, sustentada por data centers que abrigam milhares de equipamentos produzidos a partir de uma ampla gama de minerais e metais, muitos deles classificados como críticos. Atualmente, existem cerca de 12 mil data centers em operação globalmente, incluindo 992 de hiperescala, que ocupam áreas de milhares de metros quadrados. O curto ciclo de vida dos equipamentos desses centros, combinado ao descarte inadequado, retira metais valiosos da cadeia de suprimentos, intensificando a extração mineral e agravando impactos socioambientais. Paralelamente, a disputa entre Estados Unidos e China pelo controle de minerais críticos e pela liderança em tecnologias de IA tem acirrado tensões geopolíticas, com restrições mútuas à exportação de tecnologias avançadas e minerais essenciais. Outro aspecto importante é o alto consumo energético das aplicações de IA: nos Estados Unidos, os data centers já representam cerca de 4% do consumo nacional de eletricidade, com previsão de atingir 9,1% até 2030. Embora as grandes empresas de tecnologia invistam em fontes renováveis, como solar e eólica, para suprir essa demanda crescente, tais fontes também requerem volumes significativos de minerais críticos. Esse conjunto de fatores evidencia a complexa interconexão entre Inteligência Artificial, Data Centers, Minerais Críticos, Energia e Geopolítica.

Keywords

Infrastructure
Energy Transition
Economy
Digital

Abstract

Artificial Intelligence (AI) has expanded significantly in recent years, permeating various sectors of the economy and daily lives. However, this rapid adoption requires an analysis of the underlying trade-offs associated with its operation, which are often unknown to the public. Based on an analysis of data extracted from academic articles, technical reports, data repositories, and government documents, this article explores the physical, energy, and geopolitical dimensions underpinning AI. Despite often being perceived as immaterial, AI relies on a vast and complex physical infrastructure, supported by data centers that house thousands of pieces of equipment manufactured from a wide range of minerals and metals, many of which are classified as critical. Currently, approximately 12,000 data centers are in operation worldwide, including 992 hyperscale facilities that cover areas of thousands of square meters. The short life cycle of data center equipment, combined with inadequate disposal, removes valuable metals from the supply chain, intensifying mineral extraction and exacerbating socio-environmental impacts. Meanwhile, the competition between the United States and China for control over critical minerals and leadership in AI technologies has heightened geopolitical tensions, with mutual restrictions on the export of advanced technologies and essential minerals. Another key aspect is the high energy consumption of AI applications: in the United States, data centers already account for about 4% of national electricity consumption, with projections reaching 9.1% by 2030. Although major technology companies invest in renewable energy sources, such as solar and wind, to meet this growing demand, these sources also require significant volumes of critical minerals. This set of factors highlights the complex interconnection between Artificial Intelligence, Data Centers, Critical Minerals, Energy, and Geopolitics.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, o termo "inteligência artificial (IA)" tornou-se um dos tópicos mais discutidos em noticiários e pesquisas ao redor do mundo. Embora sua definição seja ampla e complexa, refletindo a diversidade de áreas que engloba e as diferentes abordagens empregadas para compreender e aplicar esse conceito, grande parte das interpretações converge para a ideia de que máquinas desenvolvidas pelo ser humano podem não apenas executar tarefas exaustivas, mas também adquirir capacidades intelectuais semelhantes às humanas (Jiang *et al.*, 2022).

Um exemplo desse crescimento é o ChatGPT, um *chatbot* desenvolvido pela empresa norte-americana OpenAI. Projetado para facilitar a comunicação e resolver problemas por meio de conversas interativas e dinâmicas, o ChatGPT tornou-se o aplicativo de internet com o crescimento mais rápido entre os consumidores, alcançando 100 milhões de usuários em apenas dois meses após seu lançamento, no final de 2022 (Milmo, 2023).

Desde então, a inteligência artificial tem se integrado de forma profunda ao cotidiano, com quase todos os setores da economia adotando a tecnologia em busca de maior eficiência e melhores resultados (Rashid; Kausik, 2024). Entre os exemplos, estão robôs utilizados em atendimentos telefônicos por empresas, aplicativos de navegação que utilizam IA para fornecer rotas otimizadas e informações de tráfego em tempo real, redes sociais que personalizam feeds com base em preferências detectadas por algoritmos, vídeos e imagens ultrarrealistas que desafiam a distinção entre o real e o artificial, carros autônomos, ferramentas de tradução e correção de textos acadêmicos, entre uma infinidade de outras aplicações.

Acompanhando essa onda de crescimento, as projeções de mercado para a inteligência artificial indicam um avanço expressivo, com estimativas de um salto de aproximadamente US\$ 90 bilhões em 2020 para US\$ 250 bilhões em 2025, e alcançando cerca de US\$ 830 bilhões até 2030 (Statista, 2024a).

Este recente avanço da inteligência artificial e sua ampla disseminação em diversos setores da sociedade foram impulsionados, entre outros fatores, pelo aumento significativo do poder computacional (Hwang, 2018) e pela vasta disponibilidade de dados, que servem como base para o treinamento de modelos (Zha *et al.*, 2023).

Todavia, à medida que a adoção da tecnologia se expande, torna-se essencial analisar a complexa interrelação entre "Data Centers,

Minerais Críticos, Energia e Geopolítica" como bases da Inteligência Artificial, além das múltiplas contrapartidas associadas ao seu funcionamento, muitas das quais ainda são pouco conhecidas pelo público em geral. Como sociedade, será preciso enfrentar, contestar ou buscar soluções para esses desafios, especialmente se optarmos por uma expansão generalizada dessa tecnologia.

Motivado por tal problemática, este artigo apresenta e analisa, primeiramente, a infraestrutura física que sustenta a inteligência artificial, com ênfase no aumento expressivo do número e da capacidade de data centers (centros de processamento de dados). Essas instalações abrigam milhões de componentes essenciais para atender às crescentes demandas de poder computacional e armazenamento de dados, evidenciando sua estreita relação com uma ampla gama de minerais e metais críticos indispensáveis à sua manufatura. Em seguida, são explorados os recentes desdobramentos geopolíticos relacionados à disputa pelo domínio no desenvolvimento da IA e ao controle dos minerais críticos necessários à construção dessa infraestrutura tecnológica, com foco na rivalidade entre Estados Unidos e China. O terceiro ponto aborda a elevada intensidade energética da IA, significativamente superior à de aplicações digitais tradicionais, apresentando estimativas globais e nacionais do consumo de energia demandado por essa tecnologia. Por fim, analisa-se a interconexão entre o consumo energético crescente da IA e a transição energética, destacando a dependência de fontes renováveis, como energia eólica e solar, em minerais críticos, o que amplia ainda mais a relação direta e indireta da IA com esses recursos.

METODOLOGIA

Para examinar e discutir a relação entre "Data Centers, Minerais Críticos, Energia e Geopolítica" como bases da Inteligência Artificial, esta pesquisa baseou-se em uma ampla coleta e análise de dados provenientes de diversas fontes científicas, incluindo artigos acadêmicos, relatórios técnicos, repositórios de dados, documentos governamentais e reportagens investigativas.

Para quantificar o número de data centers no mundo, identificar aqueles classificados como de hiperescala e avaliar o crescimento dessas infraestruturas ao longo do tempo, foram utilizados dados da consultoria alemã Statista (2024b; 2024c; 2024d; 2024e). Exemplos de

infraestrutura de data centers de hiperescala e suas imagens ilustrativas foram extraídos de portais de comunicação das empresas Switch (2024) e Google (2024a).

As questões estratégicas e geopolíticas envolvendo a disputa entre Estados Unidos e China por minerais críticos e pelo domínio da inteligência artificial foram exploradas por meio de artigos e livros de pesquisadores chineses e americanos, além de documentos oficiais do governo dos Estados Unidos (Nakano, 2021; United States, 2022; The White House, 2024) e do Fórum Econômico Mundial (Zhou, 2024; Edmond, 2025). Complementarmente, foram analisados reportagens e relatórios de grandes veículos de comunicação que acompanharam os desdobramentos dessa disputa (Areddy; Follow, 2023; Hoskins, 2023; Bradsher, 2024; Freifeld; Potkin, 2024; Friesen, 2025; Holland, 2025; Milmo *et al.*, 2025).

Para debater o elevado consumo energético da inteligência artificial e dos data centers, utilizando estimativas globais e nacionais, recorreu-se aos relatórios da Electric Power Research Institute (EPRI, 2024), da Agência Internacional de Energia (IEA, 2024), e das Nações Unidas (2024). Estudos especializados complementaram a análise (Vries, 2023; Bourzac, 2024; Luccioni *et al.*, 2024).

Dados sobre o consumo energético dos data centers das principais empresas de tecnologia e suas relações com fontes de energia renováveis foram obtidos em sites e relatórios corporativos de Microsoft (Welsch, 2022), Amazon (2024a; 2024b) e Google (2024b), além de reportagens e estudos especializados (Calma, 2024a; 2024b; SP Energy, 2024).

As informações relativas à conexão entre fontes renováveis - como a solar e a eólica - e a demanda por minerais críticos foram discutidas com base em artigo anterior publicado pelos autores (Stacciarini; Gonçalves, 2025a), fundamentado em dados e relatórios da Agência Internacional de Energia (IEA), da Agência Internacional para as Energias Renováveis (IRENA) e do Banco Mundial (WB).

ESTRUTURA “FÍSICA” DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: DATA CENTERS E MINERAIS

A frequente menção à "Inteligência Artificial" no noticiário, acompanhada de termos abstratos como "Nuvem", "Big Data", "Algoritmos", "Machine Learning" (Aprendizado de Máquina) e "Virtualização", pode transmitir a ideia equivocada de que essas tecnologias operam de forma imaterial, sem qualquer vínculo com infraestrutura física.

Por trás dessas nomenclaturas, entretanto, encontra-se uma vasta e complexa infraestrutura, geralmente localizada em data centers. Essas instalações são projetadas para abrigar e operar milhares de servidores organizados em racks, acompanhados por sistemas de armazenamento, dispositivos de rede, unidades de processamento, fontes de alimentação, sistemas de backup de energia, sistemas de refrigeração, sensores para monitoramento ambiental, cabos de conexão e diversos outros dispositivos essenciais (Chatterjee; Venugopal, 2023).

Os data centers representam a espinha dorsal de um mundo impulsionado pela inteligência artificial, fornecendo a infraestrutura essencial para atender às crescentes demandas de poder computacional e armazenamento de dados. A construção dessas instalações depende de uma ampla variedade de minerais e metais - como gálio, germânio, silício metálico, tântalo, metais do grupo da platina, cobre, terras raras, prata e ouro - que vão desde materiais comuns até matérias-primas críticas (Pehlken *et al.*, 2019; Robbins; Van-Wynsberghe, 2022).

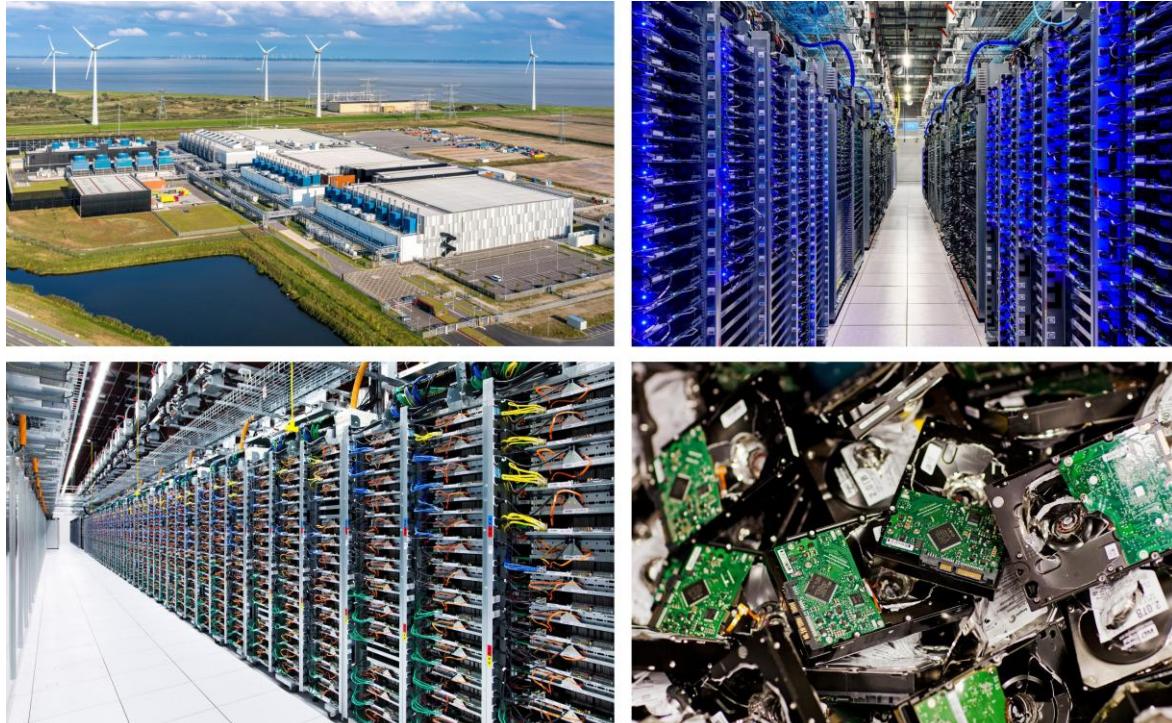
Esses recursos são extraídos e refinados para alcançar elevados níveis de pureza, atendendo aos requisitos eletrônicos, magnéticos, mecânicos e ópticos indispensáveis ao funcionamento desses sistemas (United Nations, 2024). Estima-se que a produção de dispositivos eletrônicos complexos consuma entre 50 e 350 vezes o peso final do produto em matérias-primas (Ademe, 2021). Por exemplo, a fabricação de um laptop requer a mobilização de aproximadamente 600 kg de materiais, enquanto um roteador de internet demanda cerca de 500 kg (Ademe, 2021).

Atualmente existem aproximadamente 12 mil data centers em todo o mundo (Statista, 2024b). Desses, 992 são de hiperescala (Statista, 2024c). Embora não haja uma definição precisa, a IBM - empresa multinacional estadunidense de tecnologia - indica que, para ser considerado de hiperescala, um data center precisa conter

pelo menos 5 mil servidores e ocupar mais de 10 mil pés quadrados (cerca de 929 m²) (Powell; Smalley, 2024). Os maiores data centers, no entanto, podem atingir dimensões superiores. Um exemplo é o “The Citadel Campus”, localizado em Reno, Nevada, nos Estados Unidos. Operado pela empresa americana Switch, especializada no design, construção e

operação de data centers em grande escala, o projeto foi desenvolvido para um complexo de data centers de 7,2 milhões de pés quadrados (aproximadamente 669 mil m² ou 66,9 hectares) (Switch, 2024). Números que ilustram a vasta quantidade de minerais necessária para sustentar esse processo.

Figura 1 - Data centers - a infraestrutura física que sustenta a inteligência artificial - requerem uma ampla diversidade de minerais críticos



Fonte: Google (2024a). Elaboração dos autores (2025).

Essa demanda por matérias-primas minerais necessárias para atender às exigências da Inteligência Artificial tende a crescer continuamente, acompanhando o aumento expressivo no número de data centers. Os de hiperescala, por exemplo, quadruplicaram nos últimos oito anos, passando de 259 em 2015 para 992 em 2023 (Statista, 2024c). Projeções indicam que esse crescimento será sustentado nos próximos anos (Statista, 2024b; 2024d), impulsionando um mercado avaliado em centenas de bilhões de dólares (Statista, 2024a; 2024d; 2024e).

Outro fator que intensifica a problemática é o alto índice de descarte das infraestruturas de hardware que sustentam a inteligência artificial, resultado do rápido avanço tecnológico (United Nations, 2024; Wang et al., 2024). Muitos componentes dos data centers possuem uma vida útil limitada, sendo frequentemente substituídos em intervalos curtos, geralmente entre dois e cinco anos (Statista, 2024f). Esse descarte, além de representar um potencial risco

à saúde humana e ao meio ambiente, devido à presença de materiais perigosos ou tóxicos, retira esses metais da cadeia de suprimentos (Wang et al., 2024), exigindo sua reposição por meio da extração de novas matérias-primas.

MINERAIS, INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E GEOPOLÍTICA

Nos últimos anos, constatou-se que a oferta de minerais críticos necessários para atender às demandas da infraestrutura de inteligência artificial não é determinada apenas por lógicas de mercado, mas também está profundamente influenciada por dinâmicas geopolíticas. A disponibilidade desses minerais, assim como das tecnologias a eles associadas, tornou-se um elemento central na disputa pela supremacia global entre Estados Unidos e China (Nakano, 2021; Xinyue, 2024; Zhou, 2024), desencadeando intensos confrontos.

Atualmente, a China lidera o mercado de minerais críticos indispensáveis à produção de matérias-primas essenciais para a infraestrutura da inteligência artificial, como antimônio, gálio, germânio e terras raras (Areddy; Follow, 2023; Xinyue, 2024). Em contrapartida, os Estados Unidos se sobressaem na etapa de manufatura desses produtos, um processo altamente dependente de conhecimento avançado, abrangendo propriedade intelectual, design, automação e tecnologia de fabricação, entre outros aspectos fundamentais (Xinyue, 2024).

Em meio a uma acirrada disputa tecnológica, econômica e política, que teve início, ao menos, em 2018 durante o governo Trump e se intensificou sob a administração de Joe Biden, o governo americano anunciou, em outubro de 2022, medidas destinadas a restringir a exportação de tecnologias avançadas para a China (Reuters, 2023). Entre essas ações, destacaram-se a proibição da venda de chips avançados e a imposição de restrições à exportação de equipamentos utilizados na fabricação de semicondutores (United States, 2022).

Em julho de 2023, em resposta às restrições impostas pelos Estados Unidos e outros países à exportação de chips, a China implementou limites à exportação de dois minerais essenciais para a produção de tecnologias relacionadas à inteligência artificial: gálio e germânio, dos quais é responsável por cerca de 90% e 60% da produção global, respectivamente (Areddy; Follow, 2023).

Em outubro de 2023, os Estados Unidos intensificaram as restrições à exportação de chips de inteligência artificial, determinando que a empresa norte-americana Nvidia suspendesse o fornecimento à China de modelos que já atendiam a regulamentações anteriores e haviam sido desenvolvidos com limitações de desempenho específicas para o mercado chinês (Hoskins, 2023). Posteriormente, em novembro de 2024, o governo americano ampliou essas medidas, exigindo que a multinacional taiwanesa Taiwan Semiconductor Manufacturing Company (TSMC) também interrompesse o envio de chips avançados destinados a aplicações de inteligência artificial na China (Freifeld; Potkin, 2024). Nvidia e TSMC lideram o mercado global de chips de alta eficiência voltados para inteligência artificial (Statista, 2024g).

Em resposta a essas medidas, o governo chinês intensificou, em outubro de 2024, as restrições à exportação de metais de terras raras e outros minerais estratégicos cruciais para

tecnologias avançadas, com foco especial nas fabricantes de semicondutores (Bradsher, 2024).

Em meio às disputas, a União Europeia e os Estados Unidos buscam novas estratégias para viabilizar o acesso a minerais críticos essenciais ao desenvolvimento dessas tecnologias (Zhou, 2024). No caso dos norte-americanos, a Casa Branca tem promovido um conjunto de esforços, já estimados em mais de US\$ 120 bilhões, voltados ao fortalecimento das cadeias de suprimentos nacionais de minerais críticos, com o objetivo de reduzir a dependência da China (The White House, 2024).

Enquanto finalizávamos este artigo, Donald Trump tomou posse em 20 de janeiro de 2025 para seu segundo mandato (não consecutivo) como presidente dos Estados Unidos. Em seu segundo dia de mandato, o presidente norte-americano reuniu-se na Casa Branca com executivos de grandes empresas do setor de Inteligência Artificial para anunciar um conjunto de reestruturações legislativas e investimentos privados na ordem de US\$ 500 bilhões, destinados a financiar infraestrutura para IA (Friesen, 2025; Holland, 2025). Na ocasião, Larry Ellison, executivo da Oracle Corporation - companhia norte-americana de tecnologia e informática - anunciou a construção de vinte novos data centers, cada um com meio milhão de pés quadrados (aproximadamente 46,5 mil m²) (Holland, 2025).

Uma semana após o anúncio, a até então pouco conhecida empresa chinesa DeepSeek lançou o DeepSeek-R1, um *chatbot* de inteligência artificial desenvolvido para competir com o ChatGPT da OpenAI. Construído a um custo significativamente inferior ao de seus concorrentes e com desempenho competitivo, o modelo foi disponibilizado gratuitamente e em código aberto, permitindo que qualquer desenvolvedor de IA o utilizasse (Edmond, 2025). O lançamento ocorreu apesar das restrições e proibições impostas pelo governo de Joe Biden ao acesso a chips avançados de IA (United States, 2022; Hoskins, 2023; Freifeld; Potkin, 2024). Como consequência, empresas americanas de tecnologia perderam aproximadamente US\$ 1 trilhão em valor de mercado em um único dia. A Nvidia, líder na fabricação de chips de alta eficiência para IA e, até então, a companhia mais valiosa do mundo, registrou uma queda histórica de cerca de US\$ 600 bilhões em seu valor de mercado – a maior desvalorização diária já registrada no mercado de ações dos Estados Unidos (Milmo et al., 2025).

Este conjunto de episódios reforça o papel estratégico da inteligência artificial e dos minerais críticos na geopolítica global

contemporânea, evidenciando que inúmeros desdobramentos ainda ocorrerão nos próximos anos.

CONSUMO ENERGÉTICO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E DOS DATA CENTERS

Devido a características intrínsecas - como o uso de redes neurais complexas e a movimentação de vastos conjuntos de dados entre milhares de componentes físicos de sua infraestrutura (Bourzac, 2024) -, modelos de inteligência artificial geralmente consomem significativamente mais energia do que aplicações tradicionais, como acesso a e-mails, recuperação de dados, comunicação ou streaming de conteúdo (EPRI, 2024; Luccioni *et al.*, 2024).

Uma solicitação no ChatGPT, por exemplo, consome aproximadamente dez vezes mais eletricidade do que uma consulta em mecanismos tradicionais de busca, como o Google (EPRI, 2024). Tecnologias emergentes, como a geração de áudio, imagens e vídeos, apresentam um consumo ainda maior (Luccioni *et al.*, 2024).

Ademais, desde o lançamento bem-sucedido do ChatGPT, no final de 2022, as Big Techs têm ampliado a integração de inteligência artificial em um número crescente de interações online e ferramentas tecnológicas (Vries, 2023). Com 5,52 bilhões de usuários de internet ativos no mundo (Statista, 2024h) intensificando seu contato com tecnologias baseadas em IA, o consumo de energia associado a essas interações continua a aumentar.

Embora alguns autores apontem que a evolução dos hardwares tem historicamente sido acompanhada por avanços na eficiência energética, desempenhando um papel importante na contenção do crescimento acelerado do consumo de energia (Bourzac, 2024), os avanços nos processadores voltados à inteligência artificial parecem desafiar essa lógica. Assim, embora os novos processadores apresentem desempenho por watt superior ao de seus antecessores, sua capacidade e o volume de produção têm aumentado de forma tão expressiva que o resultado final é um crescimento constante na demanda total de energia (United Nations, 2024).

O relatório da Agência Internacional de Energia (IEA, 2024), uma referência no tema, estima que data centers, criptomoedas e inteligência artificial consumiram aproximadamente 460 TWh de eletricidade em

2022, o que representa cerca de 2% da demanda global de eletricidade. O mesmo relatório projeta que esse consumo pode dobrar até 2026, alcançando entre 620 e 1.050 TWh. Esse aumento equivale a adicionar, na estimativa mais baixa, o consumo anual de energia da Suécia, ou, na mais alta, o da Alemanha (IEA, 2024).

Em países com maior concentração dessas infraestruturas, o consumo de energia por elas já é significativo. Nos Estados Unidos, que possuem o maior número de data centers do mundo (Statista, 2024b), o consumo de eletricidade por essas instalações corresponde a aproximadamente 4% da demanda nacional (IEA, 2024; EPRI, 2024). Impulsionado, entre outros fatores, pelo avanço da inteligência artificial, estima-se que essa proporção aumente para 6% em 2026 (IEA, 2024) e até 9,1% em 2030 (EPRI, 2024). Na China, estima-se que a demanda de eletricidade por data centers alcance cerca de 300 TWh em 2026 e 400 TWh em 2030 (IEA, 2024).

Uma reportagem investigativa publicada pela Bloomberg, conduzida por Saul *et al.* (2024), revelou que a crescente demanda de energia elétrica pelos data centers tem superado a oferta disponível em diversas regiões do mundo. Esse desequilíbrio tem causado sobrecargas nos sistemas elétricos locais, gerando preocupações entre os moradores quanto a interrupções no fornecimento e ao aumento dos preços da eletricidade.

TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E MINERAIS NO CONTEXTO DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Grandes empresas de tecnologia têm intensificado os investimentos em fontes de energia renovável, tanto como parte de suas estratégias de sustentabilidade quanto para fortalecer sua imagem corporativa perante o público e os investidores. Exemplos incluem Google (2024b) e Amazon (2024a), que afirmam compensar 100% de seu consumo energético - inclusive o proveniente de data centers - por meio de mecanismos de compra corporativa de energia renovável. A Microsoft, por sua vez, comprometeu-se a atingir essa meta até 2030 (Welsch, 2022).

Para alcançar esse objetivo, a Amazon afirma manter, sob sua propriedade ou em parcerias, cerca de 500 projetos de energia solar e eólica distribuídos globalmente (Amazon, 2024a). Já o Google, informou que, entre 2010 e 2023, firmou mais de 115 contratos de compra de energia

limpa, correspondendo a uma capacidade de geração equivalente a aproximadamente 36 milhões de painéis solares (Google, 2024b). Em 2024, a empresa também anunciou que seus futuros data centers serão estrategicamente localizados próximos a parques solares e eólicos, garantindo seu abastecimento direto por essas fontes renováveis (Calma, 2024a). No mesmo ano, a Microsoft revelou a assinatura de um dos maiores contratos corporativos de aquisição futura de energia renovável, avaliado em aproximadamente US\$ 17 bilhões (Calma, 2024b).

Todavia, assim como os chips e outros componentes da infraestrutura física dos data centers, as fontes de energia solar e eólica também dependem significativamente de minerais críticos. Essa dependência decorre de características intrínsecas dessas tecnologias, como a menor densidade energética, vida útil mais curta em comparação às fontes tradicionais de energia e dificuldades de reciclagem - aspectos que abordamos em detalhe no artigo intitulado "*Global Geography of the Energy Transition and Mineral Extraction*" (Geografia Global da Transição Energética e Extração Mineral) (Stacciarini; Gonçalves, 2025a).

Uma usina eólica terrestre, por exemplo, pode consumir até nove vezes mais recursos minerais do que uma usina a gás natural com capacidade similar (IEA, 2021). Em projetos eólicos marítimos (offshore) - nos quais a Amazon se declara a maior compradora corporativa global de energia (Amazon, 2024b) - o consumo de minerais críticos pode ser até quinze vezes maior (IEA, 2021) devido à necessidade de grandes estacas para fixação das turbinas, fundações subaquáticas e uma extensa rede de cabos e dutos submarinos (Stacciarini; Gonçalves, 2025a).

A questão também se aplica aos painéis solares. Parques solares modernos frequentemente incluem milhões de unidades. Como essa tecnologia depende de um conjunto significativo de minerais críticos em sua composição (Stacciarini; Gonçalves, 2025a), a pressão sobre a extração de recursos minerais continua a aumentar (Alonso, 2024; Milanez; Dorn, 2024; Stacciarini; Gonçalves, 2025b). Um exemplo é o complexo solar Orion Solar Belt, no Texas, projetado para fornecer energia aos data centers do Google. Com mais de 1,3 milhão de painéis solares, o complexo tem capacidade para gerar 900 MW (SP Energy, 2024).

Uma análise proporcional sugere que, para atender à projeção de consumo de 35 GW dos data centers nos Estados Unidos até 2030 (Newmark, 2024), seriam necessários aproximadamente 50 milhões de painéis solares,

caso toda a energia fosse proveniente dessa fonte, exemplificando a crescente dependência de minerais críticos.

CONCLUSÕES

Este estudo analisou a complexa e, muitas vezes, negligenciada interconexão entre "Data Centers, Minerais Críticos, Energia e Geopolítica" como bases da Inteligência Artificial. Inicialmente, destacou-se como a inteligência artificial, uma tecnologia que atualmente movimenta aproximadamente US\$ 250 bilhões por ano - com projeções de atingir US\$ 830 bilhões até 2030 -, tornou-se um elemento central nos debates globais, integrando-se de forma abrangente a diversos aspectos da vida cotidiana.

Embora frequentemente percebida como imaterial, este estudo demonstrou que a inteligência artificial depende de uma infraestrutura física vasta e complexa, concentrada em data centers. Essa infraestrutura inclui elementos essenciais, como servidores, sistemas de armazenamento, unidades de processamento e sistemas de refrigeração, projetados para atender às crescentes demandas por poder computacional e armazenamento de dados. A produção desses equipamentos exige uma ampla variedade de minerais e metais, muitos deles classificados como críticos. Um exemplo é a fabricação de um único roteador de internet, que pode requerer a mobilização de até 500 kg de matérias-primas.

Outro ponto crítico identificado é o curto ciclo de vida dos equipamentos utilizados em data centers, que, em média, varia entre dois e cinco anos. O descarte inadequado desses dispositivos, sem a devida reciclagem, resulta na remoção de metais valiosos da cadeia de suprimentos, o que demanda novas extrações a partir de fontes primárias por meio da atividade mineradora.

Os dados levantados indicam a existência de aproximadamente 12 mil data centers em operação globalmente, com os de grande porte (hiperescala) quadruplicando nos últimos oito anos, totalizando 992 unidades. Projeta-se que esse crescimento continue nos próximos anos.

Embora ainda faltem estudos precisos sobre o volume de minerais utilizados na construção e manutenção dessa infraestrutura, já se observam dificuldades na oferta de certos recursos, agravadas por fatores geopolíticos e estratégicos. A disputa entre os Estados Unidos e a China pelo controle de minerais críticos e pela liderança em tecnologias relacionadas à IA exemplifica essas tensões. Desde 2022, o

governo americano implementou um conjunto de restrições à exportação de tecnologias avançadas, como chips e semicondutores, para a China, que, em resposta, impôs limitações à exportação de minerais essenciais para a manufatura de tecnologias ligadas à IA.

Destacou-se o elevado consumo energético das aplicações de inteligência artificial. Com o aumento do número de usuários interagindo com essas tecnologias, a demanda por energia continua a crescer. Atualmente, estima-se que aproximadamente 2% da eletricidade global seja destinada a data centers, criptomoedas e IA, proporção que pode dobrar nos próximos anos. Nos Estados Unidos, os data centers já consomem cerca de 4% da eletricidade nacional, com projeções de alcançar 9,1% até 2030. Em algumas regiões, já são observadas sobrecargas nos sistemas elétricos locais.

Embora grandes empresas de tecnologia estejam investindo em fontes de energia renovável, como solar e eólica, para atender às demandas de seus data centers e aplicações de inteligência artificial, essas fontes também requerem volumes significativos de minerais críticos devido a características intrínsecas, como menor densidade energética, vida útil reduzida e dificuldades de reciclagem. Projetos de grande escala, como o Orion Solar Belt, que está instalando mais de 1,3 milhão de painéis solares no Texas (EUA) para abastecer data centers do Google, exemplificam essa crescente dependência de minerais críticos. Ademais, análises proporcionais indicam que, para atender à projeção de consumo energético futuro dos data centers, serão necessários dezenas de milhões de novos painéis solares.

Esse conjunto de dados e reflexões evidencia que a expansão da IA e de sua infraestrutura associada impõe desafios que vão além do campo tecnológico, abrangendo dimensões ambientais, sociais, econômicas e geopolíticas. Compreender essas interconexões é essencial para que a comunidade científica, a sociedade, os formuladores de políticas, as empresas e as nações avaliem com maior clareza as contrapartidas envolvidas e busquem alternativas e soluções para esses desafios, caso a aposta em uma expansão generalizada da IA seja mantida.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), fundação vinculada ao Ministério da Educação (MEC), pelo financiamento desta

pesquisa por meio de uma bolsa de pós-doutorado (Processo nº 88887.924498/2023-00) concedida ao pesquisador João Henrique Santana Stacciarini. Agradecemos também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão de bolsa de Produtividade em Pesquisa ao pesquisador Ricardo Júnior de Assis Fernandes Gonçalves. Por fim, agradecemos à Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PrP) da Universidade Estadual de Goiás (UEG), pelos recursos concedidos ao PPGEO-UEG por meio do Pró-Programas.

FINANCIAMENTO

Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES).

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

REFERÊNCIAS

ADEME - L'agence de L'environnement Et de La Maîtrise de L'énergie. **La face cachée du numérique:** réduire les impacts du numérique sur l'environnement. Paris: Republique Française, 2021. 24 p. (979-10-297-1691-1). Disponível em: https://cnm.fr/wp-content/uploads/2021/08/ademe_guide-pratique-face-cachee-numerique.pdf. Acesso em: 10. dez. 2024.

ALONSO, A. **El multicolor de la energía:** desafíos y oportunidades para la transición energética. Cidade do México: Universidad Autónoma Metropolitana, 2024. 220 p. Disponível em: <https://rosalux.org.mx/libro-multicolor-de-la-energia/>. Acesso em: 24 nov. 2024.

AMAZON. **Amazon meets 100% renewable energy goal 7 years early.** 2024a. Written by Amazon Staff. Disponível em: <https://www.aboutamazon.com/news/sustainability/amazon-renewable-energy-goal>. Acesso em: 16 dez. 2024.

AMAZON. **Amazon's leadership helping to harness the carbon-free might of ocean winds.** 2024b. Written by Amazon Staff. Disponível em: <https://www.aboutamazon.eu/news/sustainability/amazons-leadership-helping-to-harness-the-carbon-free-might-of-ocean-winds>. Acesso em: 21 dez. 2024.

AREDDY, J.; FOLLOW, S. China restricts exports of two minerals used in high-

- performance chips. **The Wall Street Journal**. [S.L.], p. 1. jul. 2023. Disponível em: <https://www.wsj.com/articles/china-restricts-exports-of-two-metals-used-in-high-performance-chips-a649402b>. Acesso em: 25 nov. 2024.
- BOURZAC, K. Fixing AI's energy crisis. **Nature**, [S.L.], p. 1, 17 out. 2024. <http://dx.doi.org/10.1038/d41586-024-03408-z>.
- BRADSHER, K. China Tightens Its Hold on Minerals Needed to Make Computer Chips. **The New York Times**. [S.L.], p. 1. 26 out. 2024. Disponível em: <https://www.nytimes.com/2024/10/26/business/china-critical-minerals-semiconductors.html>. Acesso em: 25 nov. 2024.
- CALMA, J. Google's future data centers will be built next to solar and wind farms. **The Verge**. [S.L.], p. 1. 10 dez. 2024a. Disponível em: <https://www.theverge.com/2024/12/10/24317888>. Acesso em: 16 dez. 2024.
- CALMA, J. Microsoft made the biggest renewable energy agreement ever to fuel its AI ambitions. **The Verge**. [S.L.], p. 1. maio 2024b. Disponível em: <https://www.theverge.com/2024/5/2/24147153>. Acesso em: 20 dez. 2024.
- CHATTERJEE, A.; VENUGOPAL, V. **Designing Data Centers for AI Clusters**. [S.L]: JDCN, 2023. 34 p. Disponível em: <https://www.juniper.net/documentation/us/en/software/nce/ai-clusters-data-center-design/ai-clusters-data-center-design.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2024.
- EDMOND, C. What is open-source AI and how could DeepSeek change the industry? **World Economic Forum (WEF)**. [S.L.], p. 1. fev. 2025. Disponível em: <https://www.weforum.org/stories/2025/02/open-source-ai-innovation-deepseek/>. Acesso em: 20 fev. 2025.
- EPRI - Electric Power Research Institute. Powering Intelligence: analyzing artificial intelligence and data center energy consumption. Palo Alto, CA (U.S): **Electric Power Research Institute**, 2024. 35 p. Disponível em: <https://www.epri.com/research/products/000000003002028905>. Acesso em: 04 dez. 2024.
- FREIFELD, K; POTKIN, F. US ordered TSMC to halt shipments to China of chips used in AI applications. **Reuters**. [S.L.], p. 11. nov. 2024. Disponível em: <https://www.reuters.com/technology/us-ordered-tsmc-halt-shipments-china-chips-used-ai-applications-source-says-2024-11-10/>. Acesso em: 26 nov. 2024.
- FRIESEN, G. Trump's AI Push: Understanding The \$500 Billion Stargate Initiative. **Forbes** [S.L.], 24. jan. 2025. Disponível em: <https://www.forbes.com/sites/garthfriesen/2025/01/23/trumps-ai-push-understanding-the-500-billion-stargate-initiative/>. Acesso em: 18 fev. 2025.
- GOOGLE. **Data Centers**: Photo Gallery. Google. 2024a. Disponível em: <https://www.google.com/about/datacenters/gallery/>. Acesso em 12 dez. 2024.
- GOOGLE. **Google's 2024 Environmental Report**. [S.L]: Google, 2024b. 86 p. Disponível em: <https://sustainability.google/reports/google-2024-environmental-report/e-2024-environmental-report.pdf>. Acesso em: 18 dez. 2024.
- HOLLAND, S. Trump announces private-sector \$500 billion investment in AI infrastructure. **Reuters**. [S.L.], 22. jan. 2025. Disponível em: <https://www.reuters.com/technology/artificial-intelligence/trump-announce-private-sector-ai-infrastructure-investment-cbs-reports-2025-01-21/>. Acesso em: 18 fev. 2025.
- HOSKINS, P. US orders immediate halt to some AI chip exports to China, Nvidia says. **British Broadcasting Corporation (BBC)**. [S.L.], p. 1. out. 2023. Disponível em: <https://www.bbc.com/news/business-67213134>. Acesso em: 27 nov. 2024.
- HWANG, T. Computational power and the social impact of artificial intelligence. **ArXiv preprint**, [S.L.], 2018. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1803.08971>
- IEA - International Energy Agency. **Electricity 2024: analysis and forecast to 2026**. Paris (France): International Energy Agency, 2024. 170 p. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-2024>. Acesso em: 04 dez. 2024.
- IEA - International Energy Agency. **The Role of Critical Minerals in Clean Energy Transitions**. Paris, France: IEA, 2021. 287 p. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/the-role-of-critical-minerals-in-clean-energy-transitions>. Acesso em: 01 dez. 2024.
- JIANG, Y.; LI, X.; LUO, H.; YIN, S.; KAYNAK, O. Quo vadis artificial intelligence? **Discover Artificial Intelligence**, [S.L.], v. 2, n. 1, p. 1, 7 mar. 2022. <http://dx.doi.org/10.1007/s44163-022-00022-8>.
- LUCCIONI, S.; JERNITE, Y.; STRUBELL, E. Power Hungry Processing: watts driving the cost of ai deployment? **ACM**, [S.L.], p. 85-99, 3 jun. 2024. <http://dx.doi.org/10.1145/3630106.3658542>.
- MILANEZ, B.; DORN, F. Lithium policies in Latin America: old wine in new bottles? **Kobra, Extractivism Policy Briefs** [S.L.], v. 2024, n.

- 8, p. 1-17, 2024. <https://doi.org/10.17170/kobra-2024082710725>.
- MILMO, D. ChatGPT reaches 100 million users two months after launch. **The Guardian**. [S.L.], p. 1. 2 fev. 2023. Disponível em: <https://www.theguardian.com/technology/2023/feb/02/chatgpt-100-million-users-open-ai-fastest-growing-app>. Acesso em: 14 jan. 2025.
- MILMO, D.; HAWKINS, A.; BOOTH, K.; KOLLEWE, J. 'Sputnik moment': \$1tn wiped off US stocks after Chinese firm unveils AI chatbot. **The Guardian**. [S.L.], 28 jan. 2025. Disponível em: <https://www.theguardian.com/business/2025/jan/27/tech-shares-asia-europe-fall-china-ai-deepseek>. Acesso em: 20 fev. 2025.
- NAKANO, J. **The Geopolitics of Critical Minerals Supply Chains**. Washington, D.C., U.S: Center for Strategic and International Studies (CSIS), 2021. 38 p. Disponível em: <https://www.csis.org/analysis/geopolitics-critical-minerals-supply-chains>. Acesso em: 21 nov. 2024.
- NEWMARK. **2023 U.S. Data Center Market: overview & market clusters**. New York, NY, U.S: Newmark, 2024. 22 p. Disponível em: <https://www.nmrk.com/insights/market-report/2023-u-s-data-center-market-overview-market-clusters>. Acesso em: 20 dez. 2024.
- PEHLKEN, A.; HINTEMANN, R.; PENAHERRERA, F.; GIZLI, V.; HURRELMANN, K.; HINTERHOLZER, S. **Total Energy Management for Professional Data Centers**. [S.L]: Carl Von Ossietzky University of Oldenburg, 2019. 153 p. Disponível em: <https://tempo-energy.de/>. Acesso em: 19 nov. 2024.
- POWELL, P.; SMALLEY, I. **What is a hyperscale data center?** 2024. IBM. Disponível em: <https://www.ibm.com/bp/topics/hyperscale-data-center>. Acesso em: 18 nov. 2024.
- RASHID, A. B.; KAUSIK, A. AI revolutionizing industries worldwide. **Hybrid Advances**, [S.L.], v. 7, p. 100277, dez. 2024. <http://dx.doi.org/10.1016/j.hybadv.2024.100277>.
- REUTERS. US targets China over semiconductors. **Reuters**. [S.L], p. 1. 30 jun. 2023. Disponível em: <https://www.reuters.com/technology/us-targets-china-over-semiconductors-2023-06-30/>. Acesso em: 26 nov. 2024.
- ROBBINS, S.; VAN-WYNBERGHE, A. Our New Artificial Intelligence Infrastructure: becoming locked into an unsustainable future. **Sustainability**, [S.L.], v. 14, n. 8, p. 4829, 18 abr. 2022. <http://dx.doi.org/10.3390/su14084829>.
- SAUL, J.; NICOLETTI, L.; RAI, S.; BASS, D.; KING, I.; DUGGAN, J. **AI Is Already Wreaking Havoc on Global Power Systems**. **Bloomberg**. [S.L], jun. 2024. Technology: p. 1. Disponível em: <https://www.bloomberg.com/graphics/2024-ai-data-centers-power-grids/>. Acesso em: 06 dez. 2024.
- SP ENERGY - SB Energy Announces Commercial Operation of American-made Solar Projects to Help Power Google Data Centers**. 2024. Disponível em: <https://sbenergy.com/american-made-solar-projects-power-google-data/>. Acesso em: 20 dez. 2024.
- STACCIARINI, J. H. S.; GONÇALVES, R. J. A. F. **Energy Transition and Mining in the Global South**. **Socarxiv**, [S.L], p. 1-23, fev. 2025b. Center for Open Science. https://doi.org/10.31235/osf.io/n8m57_v1.
- STACCIARINI, J. H. S.; GONÇALVES, R. J. A. F. **Global Geography of the Energy Transition and Mineral Extraction**. **Socarxiv**, [S.L], p. 1-18, fev. 2025a. Center for Open Science. http://dx.doi.org/10.31235/osf.io/jdfyw_v1.
- STATISTA - Artificial intelligence (AI) market size worldwide from 2020 to 2030**. 2024a. Disponível em: <https://www.statista.com/forecasts/1474143/global-ai-market-size>. Acesso em: 15 jan. 2025.
- STATISTA - Data Center - Worldwide**. 2024d. Disponível em: <https://www.statista.com/outlook/tmo/data-center/worldwide>. Acesso em: 21 nov. 2024.
- STATISTA - Frequency of data center server replacement worldwide 2018-2020**. 2024f. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/1109492/frequency-of-data-center-system-refresh-replacement-worldwide/>. Acesso em: 18 jan. 2025.
- STATISTA - Leading semiconductor companies worldwide as of November 15, 2024, by market capitalization**. 2024g. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/283359/top-20-semiconductor-companies/>. Acesso em: 26 nov. 2024.
- STATISTA - Number of hyperscale data centers worldwide from 2015 to 2023**. 2024c. Disponível em: <https://www.statista.com/statistics/633826/worldwide-hyperscale-data-center-numbers/>. Acesso em: 19 nov. 2024.
- STATISTA - Number of internet and social media users worldwide as of October 2024**. 2024h. Disponível em:

- <https://www.statista.com/statistics/617136/digital-population-worldwide/>. Acesso em: 05 dez. 2024.
- STATISTA - Revenue in the Data Center market for different segments Worldwide from 2018 to 2029.** 2024e. Disponível em: <https://www.statista.com/forecasts/1441973/revenue-data-center-market-for-different-segments-worldwide>. Acesso em: 21 nov. 2024.
- STATISTA - Which Countries Have The Most Data Centers?** 2024b. Disponível em: <https://www.statista.com/chart/24149/data-centers-per-country/>. Acesso em: 19 nov. 2024.
- SWITCH - design, construction and operation of data centers. Switch Data Center Locations.** 2024. Nevada, U.S. Disponível em: <https://www.switch.com/locations/>. Acesso em: 20 nov. 2024.
- THE WHITE HOUSE. Fact Sheet: Biden-Harris administration takes further action to strengthen and secure critical mineral supply chains.** 2024. **Briefing Room, Statements and Releases.** Disponível em: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2024/09/20/fact-sheet-biden-harris-administration-takes-further-action-to-strengthen-and-secure-critical-mineral-supply-chains/>. Acesso em: 25 nov. 2024.
- UNITED NATIONS. Digital Economy Report 2024:** shaping an environmentally sustainable and inclusive digital future. New York, NY, U.S: United Nations Publications, 2024. 274 p. <https://doi.org/10.18356/9789213589779c003>.
- UNITED STATES. Implementation of additional export controls: certain advanced computing and semiconductor manufacturing items; supercomputer and semiconductor end use; entity list modification.** **Federal Register**, n. 2022-21658, 13 out. 2022. Disponível em: <https://www.federalregister.gov/documents/2022/10/13/2022-21658/implementation-of-additional-export-controls-certain-advanced-computing-and-semiconductor>. Acesso em: 26 nov. 2024.
- VRIES, A. de.** The growing energy footprint of artificial intelligence. **Joule**, [S.L.], v. 7, n. 10, p. 2191-2194, out. 2023. <http://dx.doi.org/10.1016/j.joule.2023.09.004>.
- WANG, P.; ZHANG, L.; TZACHOR, A.; CHEN, W. E-waste challenges of generative artificial intelligence. **Nature Computational Science**, [S.L.], v. 4, n. 11, p. 818-823, 28 out. 2024. <http://dx.doi.org/10.1038/s43588-024-00712-6>.
- WELSCH, C. As the world goes digital, datacenters that make the cloud work look to renewable energy sources. **Microsoft**. [S.L.], p. 1. nov. 2022. Disponível em: <https://news.microsoft.com/source/emea/features/as-the-world-goes-digital-datacenters-that-make-the-cloud-work-look-to-renewable-energy-sources/>. Acesso em: 21 dez. 2024.
- XINYUE, H. Emerging Battleground: China's critical minerals leverage in the chip war. S. Rajaratnam School of International Studies (RSIS). **Nanyang Technological University**, Singapore, p. 1. nov. 2024. Disponível em: <https://www.rsis.edu.sg/rsis-publication/idss/ip24093-emerging-battleground-chinas-critical-minerals-leverage-in-the-chip-war/>. Acesso em: 22 nov. 2024.
- ZHA, D.; BHAT, Z. P.; LAI, K.; YANG, F.; JIANG, Z.; ZHONG, S.; HU, X. Data-centric Artificial Intelligence: A Survey. **ArXiv preprint**, [S.L.], 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2303.10158>.
- ZHOU, W. Why China's critical mineral strategy goes beyond geopolitics. **World Economic Forum (WEF)**. [S.L.], p. 1. nov. 2024. Disponível em: <https://www.weforum.org/stories/2024/11/china-a-critical-mineral-strategy-beyond-geopolitics/>. Acesso em: 25 nov. 2024.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

João Henrique Santana Stacciarini: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.

Ricardo Junior de Assis Fernandes Gonçalves: Conceitualização, Curadoria de dados, Análise de dados, Pesquisa, Metodologia, Design da apresentação de dados, Redação do manuscrito original, Redação - revisão e edição.



Este é um artigo de acesso aberto distribuído nos termos da Licença de Atribuição Creative Commons, que permite o uso irrestrito, distribuição e reprodução em qualquer meio, desde que o trabalho original seja devidamente citado.