



PUC-SP

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE SÃO PAULO

CAROLINA CALAMARI LOPEZ

**PARA ALÉM DA EUFORIA TECNOLÓGICA: O PARADOXO SUSTENTÁVEL DA
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

MESTRADO EM TECNOLOGIAS DA INTELIGÊNCIA E DESIGN DIGITAL

SÃO PAULO

2025

CAROLINA CALAMARI LOPEZ

**PARA ALÉM DA EUFORIA TECNOLÓGICA: O PARADOXO SUSTENTÁVEL DA
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

Dissertação apresentada a Banca Examinadora da Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, como exigência para obtenção do título de MESTRE em **Tecnologias da Inteligência e Design Digital**.

Orientadora: **Profa. Dra. Dora Kaufman**.

SÃO PAULO

2025

**PARA ALÉM DA EUFORIA TECNOLÓGICA: O PARADOXO SUSTENTÁVEL DA
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL**

Banca Examinadora:

São Paulo, _____

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha orientadora, Dora Kaufman, cuja orientação incansável e iluminada foi essencial para o meu desenvolvimento. Sua visão perspicaz e suas palavras foram fundamentais para que eu encontrasse, no programa em Tecnologias da Inteligência e Design Digital (TIDD), a articulação do pensamento crítico. Guiou-me então na legitimação de minhas inquietações com objetividade, rigor e sem devaneios. Creio que isso seja, afinal, ciência.

À minha família, marido e filhos, essenciais ao longo do percurso, tornando este momento possível. Sou eternamente grata por caminharem ao meu lado com amor, paciência, apoio e alegria.

Minha profunda gratidão aos professores do programa de mestrado do TIDD, banca e estimados colegas. A cada um, minha sincera admiração.

Aos professores e colegas da Licenciatura em Filosofia da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) por compartilharem a jornada de aprendizado filosófico.

Minha gratidão ao Laboratório de Política, Comportamento e Mídia da PUC, o Labô, e, especialmente, ao meu Grupo de Estudos de Filosofia Política, coordenado pelo professor Luiz Bueno, que são fonte de inspiração e me motivam a continuar estudando com seriedade.

Agradeço por fim à CAPES por viabilizar essa etapa acadêmica, tornando possível a realização deste trabalho. Este é apenas o começo de um caminho que desejo seguir, com dedicação e sempre em aprendizado, se Deus quiser.

RESUMO

Esta dissertação aborda o paradoxo sustentável da Inteligência Artificial (IA), entendido como a coexistência entre os benefícios da IA no enfrentamento das mudanças climáticas, e os impactos ambientais significativos decorrentes de seu desenvolvimento e uso. O objetivo central é compreender o paradoxo e identificar fatores que evidenciam desafios complexos entre os avanços tecnológicos e seus impactos ambientais. A revisão da literatura acadêmica, abrange aspectos técnicos, sociais e éticos da IA, e da consideração de dados produzido por instituições acadêmicas e institutos especializados, como variações de temperaturas ao longo dos anos e consumo de recursos naturais por empresas que operam IA.

Este estudo busca contribuir no entendimento das tensões na consolidação de uma IA sustentável, destacando que sua superação depende da coordenação de dois pilares essenciais: (1) regulamentação e governança eficazes; e (2) abordagens interdisciplinares e multidisciplinaridades para orientar políticas e práticas responsáveis.

Palavras-chave: mudanças climáticas, IA, paradoxo sustentável da IA, IA sustentável.

ABSTRACT

This dissertation addresses the sustainable paradox of Artificial Intelligence (AI), understood as the coexistence between the benefits of AI in combating climate change and the significant environmental impacts resulting from its development and use. The central objective is to understand the paradox and identify factors that highlight complex challenges between technological advances and their environmental impacts. The literature review covers technical, social, and ethical aspects of AI, incorporating data from academic institutions and specialized institutes, such as temperature variations over the years and natural resource consumption by companies operating AI.

The relevance of this study lies in contributing to the understanding of tensions in consolidating sustainable AI, emphasizing that overcoming these depends on articulating two essential pillars: (1) effective regulation and governance; and (2) interdisciplinary and multidisciplinary approaches to guide responsible policies and practices.

Keywords: climate change, artificial intelligence, sustainable AI paradox, sustainable AI.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Temperatura média global por ano, comparada com a média pré-industrial

Figura 2- País de Tuvalu corre risco de desaparecer

Figura 3- Inteligência Artificial e subcampos

Figura 4- IA Sustentável

Figura 5- Data center do Google em Ohio, Estados Unidos

Figura 6- Projeto de Data Center da Meta

Figura 7- Projeto do Scala AI City, 'cidade' de servidores em Eldorado do Sul (RS)

Figura 8- Data Centers em Quincy, WA, Estados Unidos.

Figura 9- Água usada pelo Google para sua operação

Figura 10- Água utilizado pela Microsoft para sua operação

Figura 11- Consumo de água em Data Center

Figura 12- Evolução do uso de lítio (1995-2023)

Figura 13- Extração de lítio no Deserto do Atacama, Chile

Figura 14- Mina Catumbi em Muzambinho e Cabo Verde, Minas Gerais, Brasil

Figura 15- Usina elétrica Orca na Islândia

Figura 16: VANT DJI Agras T10

Figura 17- Projeto curupira

Figura 18- Demonstração de gêneros de corais anotados com *machine learning*

LISTA DE QUADROS

Quadro 1- Exemplos de Aplicações da IA no Contexto das Mudanças Climáticas

Quadro 2- Diferença entre Data center comum e Data center para IA

SUMÁRIO

1. MUDANÇAS CLIMÁTICAS, INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E A PESQUISA	10
1.1 Mudanças climáticas e a sustentabilidade	10
1.2 Inteligência Artificial.....	18
1.2.1 Avanços e aplicações práticas	20
1.2.2 Desafios éticos, regulatórios e geopolíticos no desenvolvimento da IA	21
1.3 O Paradoxo Sustentável da IA.....	25
1.4 Compreensão da IA como Tecnologia de Propósito Geral.....	28
2. PARADOXO SUSTENTÁVEL DA IA: IMPACTOS AMBIENTAIS DIRETOS E OUTRAS EXTERNALIDADES	31
2.1 Data centers e seus impactos ambientais.....	32
2.2 Pegada hídrica e emissão de carbono	40
2.3 Impactos ambientais na extração de terras raras e lítio e a dependência da IA.....	43
2.4 Infraestrutura energética	48
2.5 Externalidades negativas	49
2.6 Sustentabilidade: Iniciativas reguladoras	50
3. PARADOXO SUSTENTÁVEL DA IA: TECNOLOGIA PROTAGONISTA	51
3.1 Cidades inteligentes e a IA	51
3.2 Agricultura.....	58
3.4 Projetos de preservação ambiental	62
3.5 Eficiência energética	65
3.6 Monitoramento e mitigação de desastres	66
4. PILARES ESTRUTURAIS PARA UMA IA SUSTENTÁVEL	67
4.1 Regulamentação e governança	67
4.2 Interdisciplinaridade e Transdisciplinaridade.....	69
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	71
REFERÊNCIAS	75

1. MUDANÇAS CLIMÁTICAS, INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL E A PESQUISA

Neste capítulo, definem-se os conceitos centrais desta dissertação: Mudanças Climáticas, Sustentabilidade e a forma paradoxal como a IA se insere nesse contexto.

Abordam-se os principais desafios climáticos globais atuais, como o aumento das emissões de gases de efeito estufa, a degradação ambiental e os fatores que interferem diretamente nas dinâmicas sociais que contribuem para a mudanças climáticas. Neste capítulo, a dissertação também busca destacar o papel que a sustentabilidade deve desempenhar no futuro e como a IA é uma tecnologia promissora no alcance de soluções mais sustentáveis.

Na sequência, a seção 1.2 sobre IA dedica-se à exploração do contexto atual desse campo, abordando sua evolução e as diversas formas de aplicação em setores como saúde, transporte, energia e agricultura. Uma parte dessa seção explora a função como a Tecnologia de Propósito Geral (GPT – *General Purpose Technology*) que altera a lógica social e das relações de consumo. A compreensão de como a IA está inserida em um paradoxo sustentável, será aprofundada no capítulo a partir das tensões entre seu potencial para a sustentabilidade e os impactos ambientais associados ao seu uso. Exploram-se, substancialmente, questões éticas com base na obra *AI Ethics* do autor Mark Coeckelbergh, a fim de estabelecer a questão da dissertação e delimitar o percurso metodológico.

1.1 Mudanças climáticas e a sustentabilidade

Em relação aos desafios climáticos atuais, Santaella (2023) enfatizou a urgência da questão:

Temos razões para estarmos assustados diante do crescimento maníaco da industrialização da natureza, da crise climática, pelo crescimento populacional e pela fome que assola boa parte dessa população devido aos ventos fortes de mudança que não cessam de soprar nas mesas mercadológicas da economia (Santaella, 2023, p. 69).

Inicialmente, orientou-se a pesquisa proposta nesta dissertação com base no termo "crise climática", considerado mais enfático e utilizado para expressar a urgência do cenário ambiental atual. No entanto, a maioria das publicações analisadas considera o termo "mudanças climáticas" ("*climate change*") como amplamente aceito. Embora semanticamente semelhantes, esses dois termos apresentam conotações distintas: enquanto "crise climática"

sugere uma catástrofe iminente que exige ação imediata, “mudanças climáticas” remete a um processo mais gradual e passível de abordagens menos alarmistas.

Essa diferença semântica aponta para uma divisão na abordagem: o uso de “crise” costuma estar associado ao ativismo e pode polarizar o debate, afastando interlocutores denominados conservadores. Já “mudanças climáticas” tende a facilitar o diálogo e a construção de consensos mais amplos, ainda que possa suavizar a percepção da gravidade da situação. Diante disso, optou-se pelo uso do termo “mudanças climáticas” nesta dissertação, por sua objetividade e potencial de alcance discursivo mais amplo.

Os últimos anos foram marcados por eventos climáticos extremos em diversos países (WWA, 2024). O ano de 2023 se tornou um marcador histórico como o ano mais quente da história, segundo o instituto *Copernicus Institute of Sustainable Development* da Universidade de Utrecht (2023), componente do observatório da Terra do programa espacial da União Europeia. Este recorde foi batido em 2024. A temperatura média global da superfície foi 1,55 °C (com uma margem de incerteza de mais ou menos 0,13 °C) acima da média de 1850-1900, de acordo com a análise consolidada dos seis conjuntos de dados (WMO, 2025). Em 2025, o mesmo instituto divulgou que janeiro de 2025 foi o mês mais quente já registrado em nível mundial. Esse fenômeno está relacionado às mudanças nos padrões climáticos, conhecidas como mudanças climáticas.

As mudanças climáticas constituem fenômenos caracterizados pela aceleração de alterações nos padrões climáticos globais, como o aumento das temperaturas médias, mudanças nos ciclos de precipitação e a intensificação de eventos climáticos extremos, como secas, inundações e tempestades. Segundo a *The United Nations Environment Programme* (UNEP, 2024), há uma crise climática constituinte de uma tripla crise planetária de alterações climáticas, poluição e perda de biodiversidade. O resultado consiste em uma combinação de fatores, incluindo a emissão exacerbada de gases de efeito estufa, impulsionada, principalmente, pela atividade humana, como a queima de combustíveis fósseis, desmatamento e práticas agrícolas insustentáveis. As mudanças climáticas afetam uma série de fenômenos meteorológicos, prejudicando a segurança alimentar, a saúde pública, a economia e os ecossistemas, causando danos especialmente significativos às comunidades mais vulneráveis, que, paradoxalmente, são aquelas que menos contribuíram para o agravamento da crise climática (IPCC, 2023; ONU, 2024).

Contemporaneamente, essas mudanças são amplamente reconhecidas como o maior risco existencial enfrentado pela humanidade, com eventos climáticos extremos liderando a

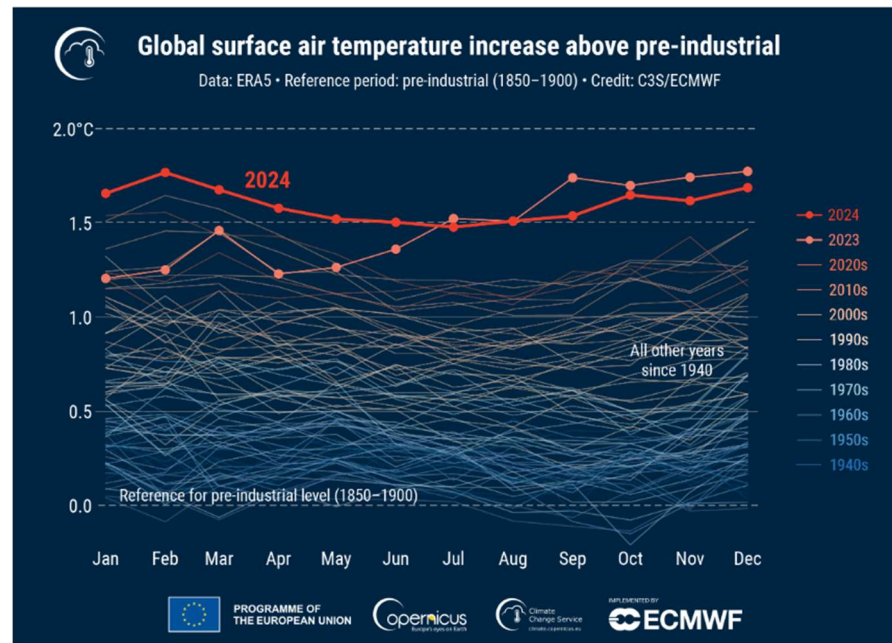
lista de preocupações globais no *Global Risks Report 2024* do Fórum Econômico Mundial, citado por 66% dos líderes entrevistados como o principal risco de curto prazo.

O aquecimento global, uma das manifestações mais evidentes das mudanças climáticas, é impulsionado pelo aumento das concentrações de Gases de Efeito Estufa (GEE), como Dióxido de Carbono (CO₂) e Metano (CH₄) (WMO, 2025). Esse aumento de temperatura altera os padrões climáticos, intensificando eventos extremos como ondas de calor, secas prolongadas e chuvas torrenciais. Tais fenômenos afetam a saúde humana, a agricultura e o abastecimento de água. As atividades humanas são as principais responsáveis pela emissão dos gases de efeito estufa e consequentemente, aquecimento global. As emissões continuaram a crescer, gerando impactos desiguais que resultam do uso insustentável de energia, alterações no uso do solo e padrões de consumo e produção (Archer, 2010).

A *International Energy Agency* (IEA) publicou em 2020 a distribuição das emissões de CO₂ global por setor, revelando a complexidade dos desafios ambientais atuais. O setor industrial é o maior responsável, respondendo por 28% do total das emissões, seguido pelo setor de energia, que contribui com 26%. O transporte representa 23%, refletindo a dependência de combustíveis fósseis para a mobilidade. A agricultura, com 17%, destaca-se como uma fonte significativa, especialmente por suas práticas e processos produtivos. Por fim, a construção civil, embora menor em participação, ainda é responsável por 6% das emissões totais, evidenciando a necessidade de estratégias sustentáveis em todas as áreas para mitigar os impactos ambientais.

O estudo dos efeitos da ação do homem na natureza não é uma novidade das últimas décadas. A ciência das alterações climáticas tem uma longa história, mas o progresso acelerou surpreendentemente nos últimos anos. A teoria do efeito estufa tem quase dois séculos, descoberto pelo matemático Joseph Fourier em 1827. Mais tarde, em 1896, Svante Arrhenius estimou o quão sensível o clima seria às mudanças na concentração do CO₂ na atmosfera. Resposta de Arrhenius de 4 a 6 °C do aquecimento devido à duplicação do CO₂, não estava muito longe da estimativa atual de 2 a 4,5 °C (Archer, 2010). Embora se trate de um dado isolado e, em muitos aspectos, incomparável — como o aumento da população mundial de, aproximadamente, 1,6 bilhão para mais de 8 bilhões de pessoas, com toda a geração de CO₂ que isso implica —, já naquele momento, a ciência se colocava em alerta quanto aos rumos da modernidade e às possíveis consequências, sugerindo certos limites que culminaram no impasse climático atual.

Figura 1 – Temperatura média global por ano, comparada com a média pré-industrial



Fonte: Copernicus (2025).

Ao término do século XX, estudos ambientais evidenciaram as mudanças climáticas e a escassez dos recursos naturais não renováveis, destacando a necessidade de uma ação global para enfrentar a degradação e a superexploração ambiental. Esses movimentos ambientalistas e indagações científicas cresceram, buscando formas de reduzir os danos ao meio ambiente e proteger os recursos naturais para as futuras gerações (Latour, 2001). Com base nos dados históricos, observa-se que a concentração de CO₂ contribui para eventos extremos, impactos ambientais e pode afetar a economia de diversas maneiras como exemplos, pela reconstrução de locais destruídos por eventos climáticos extremos ou uma perda de produção agrícola por frio ou calor extremo (Jones, 2017).

Watson *et al.* (2016) afirmam que, caso não sejam adotadas medidas mais drásticas para reduzir a emissão de gases de efeito estufa do que as estabelecidas no âmbito do Acordo de Paris¹, o teto considerado seguro para o aquecimento global — dois graus Celsius (°C) acima dos níveis pré-industriais até o final do século — pode ser alcançado já em 2050. No melhor cenário possível, caso as metas estabelecidas pelos 195 países sejam integralmente cumpridas, as emissões deverão permanecer nos níveis atuais: 54 gigatoneladas de CO₂ por ano. Se apenas

¹ O Acordo de Paris é um tratado internacional adotado em 12 de dezembro de 2015, durante a 21ª Conferência das Partes (COP21) da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC), com o objetivo de fortalecer a resposta global à ameaça das mudanças climáticas, limitando o aumento da temperatura média global a bem menos de 2°C acima dos níveis pré-industriais, com esforços para limitar esse aumento a 1,5°C.

os compromissos incondicionais assumidos pelos países forem cumpridos, ou seja, aqueles que não dependem de financiamento externo, transferência de tecnologia ou capacitação, as emissões deverão aumentar 6% até 2030. Sem o Acordo de Paris, o aumento seria ainda maior, chegando a 30%. A questão parece mais crítica quando as tensões geopolíticas se manifestam, como no caso dos Estados Unidos, que anunciaram a saída do Acordo de Paris em 2025. A saída formal do Acordo de Paris, acontecerá em 2026, pois o tratado prevê um prazo de um ano após a notificação oficial para que a retirada entre em vigor. Essa medida possui um impacto global significativo, considerando que os Estados Unidos são o segundo maior emissor mundial de gases de efeito estufa.

A necessidade de reduzir emissões de gases de efeito estufa, e ao mesmo tempo adaptar a sociedade ao clima que já mudou, traz desafios socioeconômicos e científicos, especialmente para países em desenvolvimento (Artaxo, 2012). Esses desafios são complexos, com impactos nas dinâmicas sociais, econômicas e ambientais. As emissões de gases de efeito estufa são externalidades e parecem representar a maior falha nas dinâmicas de mercado que o mundo já viu. Pessoas em diferentes partes do mundo já enfrentam as consequências dessas emissões históricas, enquanto as emissões que ocorrem atualmente podem provocar impactos severos e potencialmente devastadores no futuro. “Assim, essas emissões não são externalidades comuns e localizadas, o risco em escala global está no cerne da questão” (Stern, 2007, p.1).

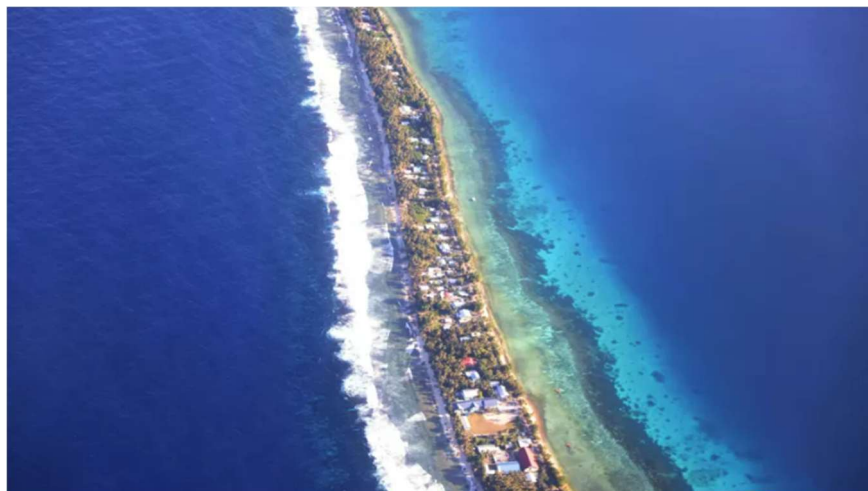
As consequências das mudanças climáticas se manifestam de diversas formas. Uma dessas manifestações refere-se ao derretimento das calotas polares e dos glaciares, que contribui, diretamente, para o aumento do nível do mar. De acordo com Hugonnet *et al.* (2021), de 2000 a 2019, os glaciares do mundo perderam, em média, 267 bilhões de toneladas de gelo por ano. Essa quantidade de gelo derretido representa cerca de 21% do aumento observado no nível do mar nesse período. Esse derretimento acelerou nas últimas décadas e é uma das principais causas do aumento do nível dos oceanos.

O derretimento acelerado das calotas do Ártico e da Antártida tem implicações para as zonas costeiras e os ecossistemas marinhos. As inundações costeiras e a erosão das praias têm sido observadas em várias regiões do planeta, colocando em risco comunidades litorâneas e aumentando a vulnerabilidade dessas áreas a desastres naturais. O aumento do nível do mar, além de ameaçar a infraestrutura costeira, também resulta na perda de habitats naturais, afetando espécies endêmicas e reduzindo a biodiversidade. Mesmo com certa escassez de observações restritas de perda de massa, os dados coletados por satélites revelam padrões acelerados, embora contrastantes, de perda de massa glacial durante o início século XXI (HUGONNET *et al.*, 2021). Uma das áreas mais geladas do planeta, é o Ártico que abrange,

aproximadamente, 21 milhões de quilômetros quadrados, dos quais 65% são cobertos pelo Oceano Glacial Ártico (Cronin, 2012). Contudo, devido às mudanças climáticas, a região está passando por transformações notáveis — o que antes parecia distante, atualmente, pode acontecer mais cedo do que se imaginava: o Ártico pode experimentar seu primeiro verão sem gelo. Segundo uma pesquisa publicada na revista britânica *Nature*, esse evento pode ocorrer até a década de 2030 (Cronin, 2012).

Um exemplo que ilustra a vulnerabilidade extrema de um país diante dos impactos climáticos é Tuvalu (Figura 2), um arquipélago do oceano Pacífico, que é afetado pelas mudanças climáticas, especialmente pelo aumento do nível do mar, que pode inundar metade da sua capital até 2050. Além disso, a intrusão da água salgada compromete a agricultura e os aquíferos de água potável, enquanto ciclones e tempestades mais frequentes causam destruição e crises sociais. Com risco de desaparecimento físico, Tuvalu busca manter sua soberania frente ao refúgio criando uma "nação digital", preservando sua cultura e identidade além das fronteiras físicas (Paulo, 2023).

Figura 2: País de Tuvalu corre risco de desaparecer



Fonte: Kirsty Needham/Reuters (2025)

Outra questão a ser considerada, é o acréscimo de CO₂ na atmosfera resulta em maior dissolução do gás nos oceanos, levando à acidificação da água do mar. Esse processo prejudica organismos calcificantes, como corais e moluscos, ao dificultar a formação de estruturas calcárias, o que pode comprometer cadeias alimentares marinhas, afetar a pesca e contribuir para a perda de biodiversidade nos ecossistemas marinhos (Ragagnin, 2017).

A degradação do solo e a desertificação são outros fenômenos amplamente associados às mudanças climáticas. Segundo a Convenção das Nações Unidas de Combate à Desertificação

(ONU, 2014), a desertificação é entendida como a degradação da terra nas zonas áridas, semiáridas e subúmidas secas, tendo como causas não somente questões climáticas, mas também processos oriundos de ações antrópicas sobre a base física territorial, como o uso inadequado dos recursos naturais em áreas com ecossistemas frágeis, que afeta a qualidade de vida das comunidades residentes nas áreas suscetíveis à desertificação, bem como a segurança alimentar, a fome e a pobreza da população, na medida em que contribui para reduzir a fertilidade dos solos e ocasionar perdas de reservas hídricas e de biodiversidade (Sales, 2015).

As manifestações das mudanças climáticas também se refletem na saúde humana, sendo um fenômeno cada vez mais reconhecido por especialistas. A Organização Mundial da Saúde (OMS) afirma que crise climática também é uma crise de saúde (ONU, 2023).

Ondas de frio, por exemplo, podem prejudicar a saúde de pessoas propensas a doenças do coração. O desconforto térmico aumenta a probabilidade de piora do quadro, pois no frio a tendência natural do corpo é encolher. Então, ocorre a vasoconstrição. Como os pacientes cardiovasculares geralmente apresentam os vasos sanguíneos já preenchidos por gordura, nessa condição, o coração precisa forçar muito mais o bombeamento de sangue e por isso bate mais rapidamente (Costa, 2020). Além disso, a maior frequência de incêndios florestais, exacerbada por altas temperaturas e secas prolongadas, contribui para o aumento de doenças respiratórias, devido à poluição do ar. O aumento da incidência de doenças transmitidas por vetores, como a malária e a dengue, é outro impacto relevante, já que as mudanças de temperatura e precipitação ampliam a área geográfica de circulação desses vetores (Romm, 2022).

Outro efeito notório das mudanças climáticas é o deslocamento forçado de populações, um fenômeno cada vez mais associado às mudanças climáticas. A elevação do nível do mar, a escassez de recursos hídricos e os desastres naturais, como secas e tempestades, têm levado o deslocamento de pessoas para buscar áreas mais seguras. Esses deslocamentos, frequentemente denominados refugiados climáticos, criam uma nova categoria de migração, com implicações para os direitos humanos, segurança e políticas internacionais. Segundo o relatório da ONU (2025) *Colliding Crises: How the climate crisis fuels gender-based violence*, as mudanças climáticas afetam diretamente mulheres e meninas ao intensificar as pressões sociais e econômicas que alimentam o aumento da violência de gênero. A cada aumento de 1°C na temperatura global, há uma elevação de 4,7% nos casos de violência por parceiro íntimo, e em cenários de aquecimento de 2°C, estima-se que 40 milhões de mulheres e meninas adicionais sofram violência desse tipo anualmente até 2090.

Na esfera econômica, as manifestações das mudanças climáticas resultam em custos significativos, tanto no que diz respeito à adaptação quanto à mitigação. As perdas econômicas

associadas aos desastres naturais, como furacões, incêndios florestais e inundações, têm aumentado exponencialmente (Haddad, 2014). Baseado em modelos econômicos formais, se ações não forem implementadas, os custos totais e riscos da mudança climática vão ser equivalentes a perda de no mínimo 5% do PIB global em cada ano até 2050 (Stern, 2007). Além disso, os impactos na agricultura, devido a secas, mudanças nos padrões de precipitação e eventos climáticos extremos, têm comprometido a segurança alimentar em diversas regiões do mundo (Margulis; Dubeaux, 2010). A transição para uma economia de baixo carbono também impõe desafios econômicos, principalmente para setores altamente dependentes de combustíveis fósseis, que precisam se adaptar a novas políticas e tecnologias mais sustentáveis. Assim, parece ser evidente que a sustentabilidade seja um princípio norteador e estruturante para enfrentar as mudanças climáticas.

A sustentabilidade refere-se à capacidade de atender às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das futuras gerações de suprirem suas próprias necessidades. Para autores como John Elkington (1998), a sustentabilidade é um modelo que integra esses três pilares, conhecidos como "tripé da sustentabilidade", em que o desenvolvimento econômico deve ser aliado à justiça social e à preservação ambiental. Compreende-se, portanto, a sustentabilidade, como uma abordagem que visa garantir um equilíbrio entre o crescimento econômico e a conservação ambiental, criando uma base sólida para um futuro viável.

Atualmente, o conceito de sustentabilidade transcende a mera preservação ambiental, incorporando dimensões sociais, econômicas e culturais. A sustentabilidade busca o equilíbrio entre o meio ambiente, a economia e a sociedade, promovendo um desenvolvimento que atenda às necessidades presentes sem comprometer a capacidade das futuras gerações de suprirem as suas próprias necessidades (Rocha, 2023).

De forma objetiva, a sustentabilidade busca o uso racional dos recursos naturais, com o objetivo de preservar o meio ambiente e evitar a exploração sem limites. Isso implica na redução do consumo excessivo e na utilização de energias renováveis, na preservação de biodiversidade e no tratamento adequado dos resíduos gerados pela sociedade.

A justiça social e igualdade de oportunidades está intrinsecamente ligada ao conceito, visto que o desenvolvimento sustentável deve ser inclusivo e beneficiar a todos. Isso significa garantir o acesso a condições dignas de vida, à educação, à saúde e ao trabalho, com ênfase na redução das desigualdades. A integração das comunidades locais, o respeito à diversidade cultural e a promoção de direitos humanos constituem pilares para a construção de um mundo mais justo e sustentável (Cavalcante, 2023).

Por fim, a sustentabilidade deve se basear na viabilidade econômica. Isso não significa, apenas, gerar lucro, mas fazê-lo de maneira ética e responsável. As empresas e governos devem considerar modelos de negócios relativos ao impacto ambiental e social de suas ações, promovendo a economia circular e o desenvolvimento de tecnologias limpas. Em longo prazo, um modelo econômico sustentável gera crescimento e prosperidade sem causar danos permanentes ao planeta (Cavalcante, 2023).

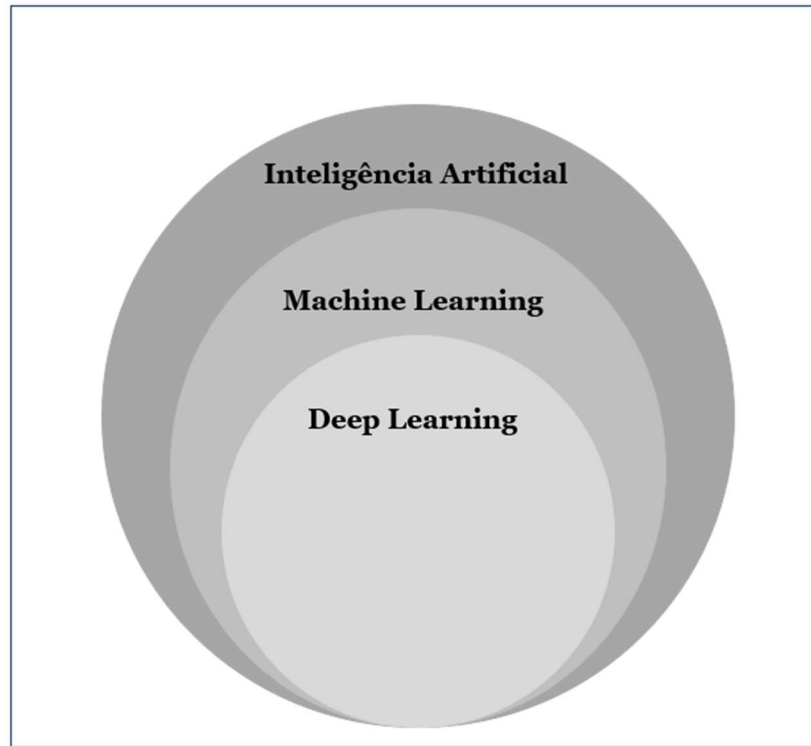
O enfrentamento das mudanças climáticas exige, inevitavelmente, a adoção de práticas e políticas sustentáveis que integrem, de maneira equilibrada e articulada, as dimensões econômica, social e ambiental. A legislação ambiental surgiu como resposta a esses desafios, utilizando mecanismos do Direito para tratar dos interesses nacionais e internacionais sobre questões ambientais. A primeira discussão formal sobre a problemática ambiental ocorreu na Conferência Mundial sobre o Homem e o Meio Ambiente, realizada pela ONU em Estocolmo, em 1972, em que foi criado o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Esse evento marcou o reconhecimento da importância de investimentos em Desenvolvimento Sustentável como uma medida fundamental para a preservação ambiental (Silva, 2024).

1.2 Inteligência Artificial

A IA é uma das inovações tecnológicas mais impactantes do século XXI com potencial de contribuir para o enfrentamento das mudanças climáticas. No entanto, antes de analisar as implicações da IA no contexto do paradoxo sustentável, esta dissertação estabelece uma base de compreensão sobre essa tecnologia, definindo o que se entende por IA e seu contexto atual. Cada um dos elementos descritos a seguir é, portanto, essencial para a construção do paradoxo que será abordado em sequência.

O campo da IA começou em um seminário de verão em 1956, partindo da hipótese de que todos os processos de aprendizado e outras características da inteligência poderiam ser descritos com tal precisão que uma máquina seria capaz de reproduzi-los. Contudo, quase sete décadas depois, a IA ainda depende principalmente de modelos empíricos, não possui uma teoria consolidada, e a atribuição dos conceitos de inteligência e aprendizado às máquinas permanece controversa (Kaufman, 2022, p. 33).

Figura 3: Inteligência Artificial e subcampos



Fonte: Elaboração própria

Atualmente, a principal técnica que impulsiona os avanços recentes da IA é o *deep learning* (aprendizado profundo), uma técnica de *machine learning* que utiliza redes neurais artificiais. Essas redes são compostas por múltiplas camadas de neurônios artificiais que processam grandes volumes de dados para identificar padrões complexos e realizar previsões. O *deep learning* funciona por meio de modelos estatísticos que aprendem diretamente dos dados, sem a necessidade de programação explícita para cada tarefa. Essa técnica permite que sistemas de IA façam desde o reconhecimento de imagens e voz até a previsão de cenários complexos, como diagnósticos médicos, manutenção preditiva e análise de comportamento do consumidor. O funcionamento dessas redes neurais profundas permite extrair e transformar informações de grandes bases de dados em resultados úteis para a tomada de decisão (KAUFMAN, 2023).

O desenvolvimento das redes neurais artificiais, tem possibilitado que sistemas de IA realizem tarefas consideradas, até pouco tempo, exclusivas do ser humano, como a interpretação de imagens, o processamento de linguagem natural e, inclusive, a tomada de decisões complexas. Aplicações como o processamento de linguagem natural (NLP) permitem

que máquinas interajam usando a linguagem humana, como assistentes virtuais Alexa e Siri (COECKELBERGH, 2020). A aceleração é, em grande parte, impulsionada pelo aumento exponencial da capacidade de processamento computacional, juntamente à disponibilidade de vastos volumes de dados (“*big data*”) (KAUFMAN, 2022). *Big data* é um fator intrínseco ao funcionamento da IA e exige capacidade avançada de armazenamento e processamento, que impulsiona o aumento do consumo energético e de água potável necessários para sustentar sua operação. Ou seja, os modelos atuais de IA, particularmente de IA generativa, são intensivos em dados, logo intensivos em consumo de energia no processamento computacional, e de água potável no resfriamento dos equipamentos, ambos com impacto ambiental negativo.

1.2.1 Avanços e aplicações práticas

Em 2020, Coeckelbergh já destacava a presença e protagonismo da IA em diversas áreas e aplicações:

A IA já está acontecendo hoje e é generalizada, até mesmo visivelmente embutida em nossas ferramentas cotidianas. Dados os avanços exponenciais do poder de computação, a disponibilidade de (grandes) dados devido às mídias sociais e ao uso massivo de bilhões de smartphones, e as redes móveis rápidas, a IA, especialmente a aprendizagem de máquina, tem feito progressos significativos. Isso possibilitou que algoritmos assumissem muitas de nossas atividades, incluindo planejamento, fala, reconhecimento facial e tomada de decisão. A IA tem aplicações em muitos domínios, incluindo transporte, marketing, saúde, finanças e seguros, segurança e militar, ciência, educação, trabalho de escritório e assistência pessoal (por exemplo, Google Duplex), entretenimento, artes (por exemplo, recuperação e composição de música), agricultura e, claro, manufatura (COECKELBERGH, 2020).

Os impactos da IA percorrem todos os setores. Coeckelbergh (2020) afirma que sua aplicação em automação pode trazer benefícios econômicos, mas que esses benefícios podem ser distribuídos de forma desigual, criando um cenário de crescimento econômico para alguns, mas com perdas substanciais para outros, especialmente aqueles cujas funções são substituídas por algoritmos. Esse desafio econômico exige que os governos e as empresas adotem políticas de requalificação e adaptação da força de trabalho para lidar com a transição para uma economia cada vez mais automatizada (COECKELBERGH, 2020).

A área da saúde é um dos campos mais impactados pela IA. Segundo Bartholomeu (2024), sistemas de IA têm aumentado significativamente a precisão no diagnóstico de doenças complexas, como o câncer, ao auxiliar na triagem e análise de imagens médicas com maior

rapidez e exatidão, o que contribui para a otimização do tempo dos profissionais e a melhoria da eficiência nos processos clínicos. Além disso, essa tecnologia tem sido fundamental no monitoramento contínuo de pacientes por meio de dispositivos vestíveis e na gestão de grandes volumes de dados médicos, facilitando um cuidado mais acessível, personalizado e focado na prevenção, sobretudo para pacientes com condições crônicas e populações vulneráveis. Contudo, essa revolução também levanta questões éticas importantes, como a responsabilidade pelo uso dos dados dos pacientes e a dependência de algoritmos na tomada de decisões críticas (COECKELBERGH, 2020).

O impacto da utilização da IA, juntamente à biotecnologia, é potencialmente sensível. A biotecnologia pode transformar a saúde, a agricultura e criar um mundo mais sustentável. Por outro lado, a utilização de biotecnologia associado a IA têm um impacto ainda desconhecido em áreas como a edição genética, sequenciamento de DNA e manipulação de vírus e bactérias, com risco de que indivíduos ou grupos possam criar patógenos sintéticos com potencial de desencadear pandemias (SULEYMAN, 2023).

A IA tem se expandido em áreas como reconhecimento facial, levantando preocupações sobre privacidade e o uso indevido dessa tecnologia. O reconhecimento facial, especialmente quando aplicado em segurança pública e monitoramento, gera debates sobre direitos civis e liberdade individual (COECKELBERGH, 2020).

Outro ponto crítico é a questão dos vieses nos algoritmos de IA. Muitas vezes, esses sistemas podem reproduzir ou, inclusive, amplificar preconceitos presentes nos dados com os quais foram treinados, gerando potencial discriminação em decisões relacionadas a emprego, crédito e justiça. Adicionalmente, a cadeia de desenvolvimento da IA é permeada por decisões humanas, logo enviesadas. O debate sobre vieses raciais, por exemplo, de perpetuação de desigualdades e preconceitos pelos algoritmos, surge através do conceito de “racismo algorítmico” (Oliveira, 2025).

1.2.2 Desafios éticos, regulatórios e geopolíticos no desenvolvimento da IA

Coeckelbergh (2020) enfatiza a necessidade de uma reflexão ética sobre os impactos sociais e individuais das tecnologias de IA, uma preocupação que se intensificou com o aumento de seu uso em áreas como saúde, educação e segurança pública. Ele aponta para a responsabilidade dos pesquisadores e desenvolvedores em evitar que a IA seja projetada, apenas, com base em interesse econômico ou técnico, sem considerar as implicações para a sociedade em termos de justiça e equidade.

A aplicação da IA levanta diversos dilemas éticos e riscos, cujos impactos somente se tornam plenamente conhecidos à medida que suas soluções são implementadas. Princípios como “*Sustainable by Design*” e “*Ethical by Design*” se mostram fundamentais para lidar com questões frequentemente complexas. *Sustainable by Design* é projetar tecnologias com foco na sustentabilidade ambiental, e *Ethical by Design* é incorporar princípios éticos desde a criação para garantir o uso responsável. O questionamento “o que pode dar errado?” deve ser considerada desde o projeto até sua aplicação. A abordagem multidisciplinar é essencial para capturar os diferentes fatores de riscos que permeiam diversos campos de conhecimento (Coeckelbergh, 2020; Hacker, 2023).

Com o avanço da técnica de aprendizado de máquina, surgem inúmeras possibilidades de aplicação da IA no campo da sustentabilidade. A integração de sistemas tecnológicos com práticas sustentáveis tem se tornado um tema central de discussões científicas e públicas. Observam-se estudos e pesquisas que revelam o enorme potencial da IA para transformar práticas de gestão ambiental, eficiência energética e conservação de recursos naturais. No entanto, a aplicação da IA a esse campo não é isenta de desafios, especialmente quando se consideram as questões filosóficas, sociais e econômicas que envolvem a sustentabilidade (Melguizo *et al.*, 2025).

Coeckelbergh (2020) questiona como a IA pode influenciar questões de autonomia, responsabilidade e a natureza das relações humanas. O autor defende uma reflexão crítica sobre as implicações éticas do uso crescente dessas tecnologias, abordando questões como a moralidade das decisões algorítmicas e o impacto da IA no cotidiano. Contudo, ele não desconsidera o potencial da IA em ajudar a enfrentar esses problemas, desde que seja aplicada de forma ética, acessível e apropriada ao contexto local. Em países em desenvolvimento, por exemplo, tecnologias simples e de baixos custos podem ser mais eficazes, já que são mais acessíveis e atendem às necessidades imediatas da população. Isso implica que a aplicação da IA na sustentabilidade deve ser equilibrada, considerando as necessidades reais das pessoas e do planeta, e não apenas as capacidades tecnológicas (Coeckelbergh, 2020; pg. 98)

Em relação a regulamentação da IA ainda há muitas lacunas. Desde 2017, a Comissão Europeia e os países-membros da União Europeia vêm desenvolvendo um arcabouço regulatório para a IA iniciando com um relatório do Parlamento Europeu sobre responsabilidade civil, ética, impacto no trabalho e privacidade. Em 2020, a Comissão lançou a Estratégia de IA para acelerar o desenvolvimento seguro e ético da tecnologia, incluindo a criação do observatório *AI Watch* e o incentivo à pesquisa e inovação. Em abril de 2021, foi proposta a primeira legislação abrangente do mundo sobre IA, o AI Act, que estabelece regras claras

baseadas em níveis de risco para o desenvolvimento, comercialização e uso de sistemas de IA visando garantir segurança, justiça e respeito aos direitos fundamentais. O AI Act proíbe usos de IA considerados de risco inaceitável, como manipulação de grupos vulneráveis e pontuação social, e foi aprovado pelo Parlamento Europeu em junho de 2023, seguindo para negociações finais para implementação em toda a União Europeia, consolidando a posição pioneira da Europa na regulação ética e segura da IA (Serec, 2023). A vigência do EU AI Act² teve início em agosto de 2024, marcando a entrada em vigor das primeiras regras aplicáveis uniformemente em todo o território europeu, exigindo que empresas e desenvolvedores de IA se adequassem progressivamente às normas, com prazos específicos para diferentes categorias de risco, além de fortalecer mecanismos de fiscalização e sanções para garantir o cumprimento da legislação.

A legislação da União Europeia apresenta lacunas importantes quanto à regulamentação do impacto ambiental da IA. O AI Act foca principalmente em regras voluntárias e de transparência, sem impor limitações efetivas ao consumo de energia e água nem às emissões de gases de efeito estufa das infraestruturas de IA. Além disso, a legislação ambiental vigente não trata diretamente desses impactos específicos, limitando-se a setores tradicionais. O Regulamento Geral sobre a Proteção de Dados (GDPR) menciona interesses coletivos que poderiam ser explorados para integrar sustentabilidade, mas isso ainda é incipiente. Para alinhar a IA aos objetivos ambientais, a regulamentação deveria ir além, incluindo obrigações mandatórias para reduzir a pegada ambiental da IA, como limites de consumo, incorporação de sustentabilidade no design e incentivos para usos ambientalmente benéficos da tecnologia (Hacker, 2023).

Além disso, é essencial destacar que os desafios de sustentabilidade não se limitam às discussões globais e às legislações da UE. A situação nos países em desenvolvimento exige uma abordagem distinta. Em muitas dessas regiões, os problemas de infraestrutura básica, como o acesso à água potável e a energia, são prioritários, e as soluções tecnológicas devem ser adaptadas a essas realidades. A IA tem uma função importante, mas é necessário avaliar com cuidado as tecnologias mais adequadas a cada contexto, garantindo que elas sejam acessíveis e benéficas para as populações locais. O Brasil, por exemplo, distinguindo-se dos demais países em desenvolvimento, possui uma matriz energética predominantemente renovável, que frequentemente gera excedentes em relação à demanda (Kaufman, 2025).

² <https://www.europarl.europa.eu/topics/en/article/20230601STO93804/eu-ai-act-first-regulation-on-artificial-intelligence>

O processo de transição para práticas sustentáveis e o papel da IA nesse processo, que será abordado ao longo desta dissertação, envolve uma multiplicidade de atores — o Estado, a sociedade e a iniciativa privada — cada um com suas perspectivas, interesses e valores distintos, o que dificulta alinhar esses interesses em prol de um bem comum: a preservação do meio ambiente. A dificuldade de encontrar um ponto de convergência entre esses atores pode tornar o avanço para soluções sustentáveis mais lento e, muitas vezes, provocar conflitos entre as partes envolvidas (Vinuesa, 2020).

Kaufman (2023) afirma que:

O futuro da IA está nas mãos de poucas empresas de tecnologia – no caso do Ocidente, de poucas empresas de tecnologia americanas. A China e os Estados Unidos lideram a pesquisa, desenvolvimento e implementação no setor, gerando uma desigualdade preocupante, presente e futura. No Brasil, temos um cenário particular: por um lado, estamos relativamente atrasados no desenvolvimento da tecnologia em si, em função da ausência de política pública eficiente, de recursos para pesquisa, entre outros fatores; por outro, a comunicação e a sociabilidade do brasileiro estão mediadas pelos algoritmos de IA (Kaufman, 2023, p.8).

Países como China e Estados Unidos, por meio de investimentos, buscam garantir posições dominantes no campo da IA, no entanto, essa competição se estende ao uso dessas tecnologias em conflitos geopolíticos, incluindo guerras cibernéticas e o desenvolvimento de armas autônomas. A corrida por tecnologias estratégicas reflete a busca por hegemonia, com esses países travando uma "guerra fria tecnológica" que redefine alianças e riscos globais (Roubini, 2019). A IA, por exemplo, já está sendo integrada a sistemas de defesa, em que sua capacidade de processar grandes volumes de dados em tempo real pode influenciar decisões militares e até mesmo automatizar ataques. Nesse cenário, o uso de IA em guerras e em atividades de espionagem torna-se um ponto crucial de disputa, levantando questões sobre a ética no uso de tecnologia para fins militares e as possíveis consequências globais dessa corrida armamentista digital (Silva, 2024).

A busca pelo domínio da IA pode enfraquecer a agenda sustentável, reforçando o paradoxo entre o desenvolvimento tecnológico acelerado e a falta de alinhamento com valores e práticas responsáveis para o bem comum.

1.3 O Paradoxo Sustentável da IA

A IA tem sido amplamente reconhecida como potencial aliada estratégica no enfrentamento dos desafios climáticos e ambientais contemporâneos. Aplicações voltadas à otimização de sistemas energéticos, à modelagem de cenários climáticos e ao monitoramento de ecossistemas reforçam sua imagem como tecnologia de ponta a serviço da sustentabilidade (STEIN, 2020).

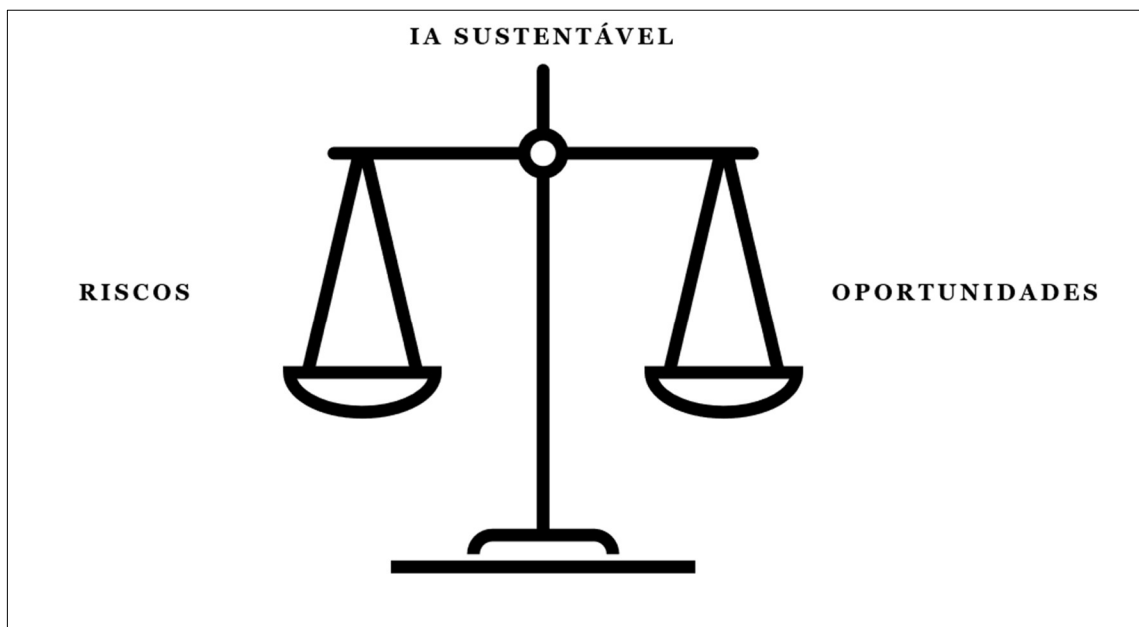
No entanto, essa abordagem positiva apresenta uma tensão estrutural: o desenvolvimento e a operação desses mesmos sistemas exigem uma quantidade crescente de energia, infraestrutura computacional e recursos naturais finitos. Esses elementos coexistem e, enquanto a tecnologia é proposta como solução ambiental também reforça dinâmicas de impacto ecológico, caracterizando o que se tem chamado de paradoxo sustentável da IA.

O paradoxo sustentável da IA consiste na coexistência de benefícios e impactos ambientais negativos decorrentes do uso dessa tecnologia. Por um lado, a IA tem contribuído decisivamente para o avanço do conhecimento sobre as mudanças climáticas e seu monitoramento em tempo real, graças à sua capacidade de processar grandes volumes de dados com elevada precisão. Além disso, ao otimizar processos, a IA pode gerar ganhos de eficiência que reduzem o tempo e os recursos utilizados nas atividades humanas. Por outro lado, esses mesmos sistemas altamente intensivos em dados, exigem grande capacidade de processamento para treinamento, manutenção e operação, o que acarreta elevado consumo de energia, emissões significativas de CO₂ e uso expressivo de água potável. Assim, ao mesmo tempo que promove soluções para a sustentabilidade, a IA também impõe novos desafios ambientais, exigindo análises críticas e políticas de mitigação dos seus efeitos (Arbix et al., 2025).

A cadeia produtiva da IA envolve também o aumento expressivo na mineração de metais raros para produzir *data centers* que operam em regime contínuo, frequentemente alimentados por fontes não renováveis (Crawford, 2021). No caso de um *chatbot* como o ChatGPT, o custo ambiental direto, muitas vezes, permanece oculto para o usuário, que ainda não está familiarizado com a materialidade intrínseca da IA. Diferentemente de um produto tangível, como uma embalagem de hambúrgueres industrializados, cujos impactos são mais facilmente percebidos — desde a idealização, fabricação, emissões geradas, uso de plástico, processos químicos e logística — a infraestrutura física que sustenta a IA pode não ser totalmente conhecida pelo consumidor final, mascarando sua significativa pegada ambiental.

Esse paradoxo adquire maior complexidade com a perspectiva política e econômica. O avanço da IA ocorre em um ambiente global marcado pela corrida tecnológica entre grandes potências, pela concentração de dados e infraestruturas em poucas corporações. Três *big techs* americanas, por exemplo, dominam em 2025 cerca 63% do processamento de dados (“computação em nuvem”) global (Kaufman, 2025). Em vez de promover uma reorganização sistêmica em direção a modelos mais equilibrados, este cenário pode reforçar estruturas de poder centralizadas.

Figura 4: IA Sustentável



Fonte: Elaboração própria

O que está em jogo são tensões entre modelos baseados na exploração intensiva de recursos naturais e alternativas que exigem uma reavaliação dos conceitos de desenvolvimento, sustentabilidade e inteligência. (Crawford, 2023; Coeckelbergh, 2020). Essas tensões podem sugerir forças dinâmicas, como geopolítica, avanços tecnológicos, mudanças socioculturais, regulação e políticas públicas, que oscilam continuamente entre extremos, funcionando como uma balança que equilibra riscos e oportunidades opostos (Figura 4).

A percepção dos ganhos de eficiência é obscurecida pela rápida adoção em larga escala, que gera demandas antes inexistentes, como o uso de ferramentas como ChatGPT no processo criativo, eletrodomésticos inteligentes com IA integrada, aplicativos que recomendam conteúdos personalizados e sistemas de segurança com reconhecimento facial para controle de

acesso. Esse fenômeno é comparado por diversos autores (Crawford, 2021; Melguizo *et al.*, 2025; Mhlanga, 2025) ao Paradoxo de Jevons, o qual afirma que, quando um recurso se torna mais eficiente e seu custo de utilização diminui, a demanda por esse recurso tende a aumentar, em vez de diminuir (Rosalsky, 2025).

No século XIX, William Stanley Jevons observou que, à medida que a eficiência no uso de um recurso aumentava, o consumo total desse recurso também poderia crescer. Isso ocorreu com a introdução de máquinas a vapor mais eficientes na Inglaterra, que tornou o uso do carvão mais barato e, conseqüentemente, elevou a demanda e o consumo de carvão, em vez de reduzi-los (Rosalsky, 2025).

Nas últimas décadas, o Paradoxo de Jevons tem sido citado para explicar por que carros, eletrodomésticos e lâmpadas mais eficientes energeticamente podem não reduzir o consumo de combustíveis fósseis. Da mesma forma, justifica-se por que a construção de mais rodovias não resolve o congestionamento do tráfego. No contexto da IA, embora a eficiência tecnológica reduza custos, isso não implica necessariamente uma redução no consumo total, pois a maior eficiência pode estimular demanda significativamente maior por energia e infraestrutura (Rosalsky, 2025). O paradoxo funciona como um alerta diante da interação entre IA e mudanças climáticas, pois a eficiência, paradoxalmente, pode resultar em aumento do consumo (Melguizo *et al.*, 2025; Luccioni *et al.*, 2025).

De acordo com Mhlanga (2025), o paradoxo de Jevons pode ser superado por meio de uma abordagem integrada que articula avanços tecnológicos, regulação e transformação comportamental. É fundamental que as inovações em IA sejam direcionadas não apenas à melhoria da eficiência operacional, mas também à otimização do uso dos recursos em nível sistêmico, prevenindo a expansão descontrolada do consumo decorrente da redução dos custos operacionais. Além disso, a implementação de políticas públicas rigorosas, como a definição de padrões mínimos de eficiência, a imposição de limites de consumo e a promoção de fontes renováveis de energia, desempenha papel central na contenção do efeito rebote. Por fim, a conscientização e educação dos usuários sobre os impactos ambientais associados ao consumo ampliado são essenciais para fomentar práticas responsáveis.

Dessa forma, a superação do paradoxo exigiria um equilíbrio entre inovação tecnológica, governança regulatória e mudança cultural, assegurando que os ganhos em eficiência proporcionados pela IA se traduzam em reduções concretas no impacto ambiental e no consumo total, em consonância com os objetivos de desenvolvimento sustentável (Mhlanga, 2025).

1.4 Compreensão da IA como Tecnologia de Propósito Geral

Reconhecer a magnitude desta tecnologia como Tecnologia de Propósito Geral (TPG), que reúne características essenciais atribuídas a tecnologias-chave, parece determinante para estabelecer parte do paradoxo sustentável da IA. Segundo Zavaglia (2025), uma TPG é capaz de provocar impactos amplos e transformadores, atravessando múltiplos setores econômicos e gerando ondas sucessivas de inovação, além de funcionar como um motor do crescimento ao transformar processos produtivos, fomentar novas indústrias e revolucionar mercados globais.

As três últimas tecnologias consideradas como de propósito geral foram o carvão, que iniciou a revolução industrial no século XVIII, em seguida a eletricidade, que iniciou a segunda fase da Revolução Industrial, a computação e, no século XXI, a IA (Kaufman, 2023). Zavaglia (2025, p. 20) afirma que se trata de “uma tecnologia única, considerada dinâmica no sentido de que evolui em eficiência e alcance, a partir do seu próprio uso. Esses usos permitem invenções e inovações”. O autor ainda destaca que, no âmbito econômico, esse processo está associado à “Teoria da Destruição Criadora” de Schumpeter, que mostra como essas transformações geram uma implosão interna que “cria e destrói”, promovendo uma concorrência que introduz “novas mercadorias, novas técnicas, novas fontes de suprimento, novo tipo de organização” (Zavaglia, p. 21).

A relação entre a natureza da IA como TPG e o paradoxo sustentável consiste na sua capacidade de impactar vários setores de forma generalizada, crescente e sem precedentes gerando demandas e novos mercados até então desconhecidos.

Com uma vasta gama de aplicações, há, naturalmente, uma imensa quantidade de potenciais benefícios decorrentes da sua aplicação, a começar pela busca por eficiência em processos produtivos. Rolnick *et al.* (2022) são autores do manifesto *Tackling Climate Change with Machine Learning* (2022), publicado por especialistas em IA incluindo Yoshua Bengio³, e acompanhado de uma bibliografia com 827 referências, identifica as mudanças climáticas como um dos principais desafios que a humanidade enfrenta (Kaufman, 2025). O documento destaca uma série de aplicações focadas em aspectos de sustentabilidade e enfrentamento das mudanças climáticas.

³ Yoshua Bengio (Paris, 1964) é um cientista da computação canadense, conhecido por seu trabalho sobre redes neurais artificiais e aprendizagem profunda. Recebeu o Prêmio Turing de 2018, juntamente com Geoffrey Hinton e Yann LeCun, por seu trabalho sobre aprendizagem profunda. Disponível em: https://pt.wikipedia.org/wiki/Yoshua_Bengio

Quadro 1- Exemplos de Aplicações da IA no Contexto das Mudanças Climáticas

Área de aplicação	Tipo de Aplicação	Como a IA pode ser aplicada
Transporte	Redução da atividade de transporte	Análise de dados de mobilidade, previsão da demanda, otimização de rotas de frete, compartilhamento de veículos
	Melhoria da eficiência dos veículos	Projetos com modelagem de eficiência aerodinâmica, veículos elétricos, veículos autônomos, controle adaptativo
	Combustíveis alternativos e eletrificação	Otimização de sistemas de recarga de veículos elétricos, gerenciamento do ciclo de vida das baterias
	Mudança modal	Análise de preferência dos usuários, integração de diferentes modais, otimização do uso de bicicletas compartilhadas
Edifícios e cidades	Otimização energética em edifícios	Modelagem e previsão do consumo energético, controle inteligente de sistemas HVAC, detecção de falhas, resposta à demanda
	Planejamento urbano	Modelagem energética em larga escala, uso de sensoriamento remoto para caracterização de infraestrutura
Agricultura e florestas	Agricultura de precisão	Deteção de doenças, manejo de irrigação, previsão de produção agrícola, monitoramento por satélite e UAVs
	Monitoramento de áreas de turfa e florestas	Sensoriamento remoto para estimar estoque de carbono, monitoramento de desmatamento, previsão e controle de incêndios florestais

Fonte: Elaboração própria, com base em Rolnick et al., 2022.

Quadro 1 *continuação*: Exemplos de Aplicações da IA no Contexto das Mudanças Climáticas

Área de aplicação	Tipo de Aplicação	Como a IA pode ser aplicada
Remoção de CO ₂	Captura direta de ar e sequestro de CO ₂	Descoberta acelerada de materiais sorventes, monitoramento e otimização de locais de armazenamento geológico
Previsão climática Impactos sociais	Modelagem e previsão climática	Combinação de dados, modelos físicos e ML para acelerar simulações, previsão de eventos extremos, downscaling para previsões locais
	Monitoramento socioeconômico e ambiental	Monitoramento de ecossistemas, sistemas sociais e infraestrutura para adaptação a impactos climáticos
Geoengenharia solar	Design e controle de aerossóis	Previsão e otimização dos impactos e efeitos colaterais da geoengenharia baseada em aerossóis
Ação individual	Redução da pegada de carbono pessoal	Estimativa da pegada por análise de dados pessoais, recomendações para mudança comportamental
Decisões coletivas	Modelagem comportamental e formulação de políticas	Modelagem de interação social, avaliação e desenho de políticas públicas e mercados de carbono
Educação	Ferramentas educacionais	Sistemas de tutoria inteligente, personalização do ensino, educação ambiental com IA
Finanças	Investimento e análise de risco climático	Análise de riscos financeiros associados ao clima, previsão de preços de carbono, portfólios climáticos
Remoção de CO ₂	Captura direta de ar e sequestro de CO ₂	Descoberta acelerada de materiais sorventes, monitoramento e otimização de locais de armazenamento geológico
Previsão climática	Modelagem e previsão climática	Combinação de dados, modelos físicos e ML para acelerar simulações, previsão de eventos extremos, downscaling para previsões locais

Fonte: Elaboração própria, com base em Rolnick et al., 2022.

2. PARADOXO SUSTENTÁVEL DA IA: IMPACTOS AMBIENTAIS DIRETOS E OUTRAS EXTERNALIDADES

Neste capítulo explorou-se o paradoxo sustentável da IA que consiste nos impactos ambientais diretos e outras externalidades. A dissertação se concentrou em quatro principais impactos: emissão dos GEEs, água potável, consumo energético e metais raros. Abordou-se-se também externalidades, que dizem respeito a efeitos colaterais da IA não diretamente envolvidos na sua produção ou consumo.

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 raros. Atualmente, estima-se cerca de 12 mil *data centers* em operação globalmente, incluindo 992 de hiperescala, que ocupam áreas de milhares de metros quadrados (Stacciarini, 2025).

Com diversos aspectos que influenciam a magnitude dos impactos ambientais da IA, estimar os efeitos de toda cadeia de consumo gerada pela IA não é trivial, uma vez que pode variar consideravelmente entre diferentes regiões do mundo, pela cadeia energética utilizada e técnicas de processamento adotadas, que influenciam diretamente na eficiência energética e as emissões associadas. Além disso, vale ponderar a dificuldade de acesso aos processos, em geral, protegidos por segredo industrial e comercial, ou seja, com baixa transparência (Ferrari, 2023). A transparência é um princípio progressivo que exige que sistemas de IA sejam concebidos para permitir a supervisão contínua do seu ciclo de vida, reconhecendo que sua plena realização ocorre gradualmente com o avanço das técnicas e o amadurecimento tecnológico (Zavaglia, 2025, pg. 208).

O funcionamento da IA, que acontece nos *data centers*, envolve o consumo elevado de energia e água potável durante o treinamento, e a operação dos modelos de IA, demandam grande capacidade computacional, e a produção e descarte do hardware necessário, que envolvem extração de recursos naturais e geração de resíduos eletrônicos. Esses elementos combinados moldam parte da pegada ambiental da IA e são explorados neste capítulo para compreender os desafios e as oportunidades para a aplicação mais sustentável dessa tecnologia (Crawford, 2021).

2.1 Data centers e seus impactos ambientais

Data centers são grandes instalações industriais que abrigam servidores e equipamentos de computação responsáveis por processar, armazenar e transmitir dados digitais. Eles são essenciais para sustentar serviços online, IA, redes sociais, *streaming*, comércio eletrônico e operações financeiras (Barringer, 2025). Esses locais são planejados para acomodar e gerenciar servidores distribuídos em racks, juntamente com sistemas de armazenamento, equipamentos de rede, unidades de processamento, fontes de energia, sistemas de alimentação de reserva, mecanismos de resfriamento, sensores para monitorar o ambiente, cabeamento de conexão e diversos outros componentes essenciais (Stacciarini, 2025).

Figura 5 – Data center do Google em Ohio, Estados Unidos



Fonte: Google (2025)

Figura 6: Projeto de Data Center da Meta



Fonte: Meta (2025)

Segundo a IBM (2025), os *data centers* de IA têm muitas semelhanças com os *data centers* tradicionais. Cada um deles contém hardware como servidores, sistemas de armazenamento e equipamentos de rede. Os operadores de ambos precisam considerar aspectos como segurança, confiabilidade, disponibilidade e eficiência energética. As diferenças entre esses dois tipos de *data centers* decorrem das demandas extraordinárias de processamento de dados no caso da IA.

O consumo energético dos *data centers* é distribuído entre diferentes sistemas, sendo cerca de 50% destinado à infraestrutura de TI, que inclui servidores, armazenamento e redes, enquanto os sistemas de ar-condicionado e refrigeração representam 37% do total. No contexto global, ao longo da última década, os *data centers* foram responsáveis por 2,4% do consumo total de eletricidade no mundo. A curto prazo, segundo a consultoria Oliver Wyman, a demanda global deve crescer 16% até 2026 (Fernandes *et al.*, 2024, p. 2). Isto demonstra o aumento pela demanda que se relaciona diretamente com o paradoxo sustentável da IA, pois o crescimento acelerado do consumo energético está diretamente ligado à expansão das aplicações de IA, que exigem infraestruturas cada vez mais poderosas e densas. Além disso, *data centers* de IA usam predominantemente GPUs⁴ de alto desempenho, que consomem significativamente mais energia e geram mais calor do que servidores convencionais, o que intensifica a demanda por sistemas avançados de refrigeração e energia, ampliando o impacto ambiental associado.

Atualmente, a demanda global por capacidade de *data centers* é de cerca de 60 gigawatts (GW). Um gigawatt equivale a um bilhão de watts (W). Um gigawatt de potência elétrica é o suficiente para fornecer energia a cerca de 700.000 residências. Projeta-se que esse número aumente para entre 171 e 219 GW até 2030, crescendo a uma taxa anual média de 19 a 22%. Em um cenário mais agressivo, a demanda pode chegar a 298 GW, o que representaria quase cinco vezes a capacidade atual. Nos Estados Unidos, o maior detentor de *data centers* que processam IA, a demanda por *data centers* deve alcançar 35 GW até 2030, praticamente o dobro dos 17 GW registrados em 2022, representando cerca de 40% do mercado global (Bangalore, 2023). *Data centers* de grande porte podem consumir tanta energia quanto 80 mil residências e, por isso, há uma pressão crescente para que adotem fontes de energia renovável e tecnologias de resfriamento mais eficientes. Esse crescimento é impulsionado principalmente

⁴ GPU (Unidade de Processamento Gráfico) foi inicialmente criada para acelerar a exibição de imagens e gráficos em computadores, tendo sido projetada exclusivamente para essa função. Apenas no final dos anos 1990 as GPUs começaram a ser usadas para processamento paralelo além da renderização gráfica, como em inteligência artificial, após a popularização de GPUs programáveis e o desenvolvimento de softwares que permitem esse uso. Fonte: <https://aws.amazon.com/pt/what-is/gpu/>

pela necessidade de *data centers* com alta densidade computacional e energia para suportar modelos avançados de IA, como os de geração de linguagem natural (Gen AI), que por si só responderão por cerca de 40% da demanda total até 2030 (Bangalore, 2023). Enquanto *data centers* que tradicionalmente operam com serviços em nuvem utilizam entre 20 e 30 MW, aqueles voltados à IA exigem entre 150 e 200 MW, com alguns chegando à escala de gigawatts (Fernandes et al., 2024, p. 5).

Modelos de IA demandam um consumo de energia significativamente maior devido à complexidade das redes neurais envolvidas e à intensa movimentação de grandes volumes de dados através de componentes físicos em sua infraestrutura. Essas operações exigem grande poder computacional e sistemas especializados para processamento e resfriamento, o que eleva substancialmente o uso energético comparado a atividades como acesso a e-mails, recuperação de dados, comunicação ou streaming de conteúdo (Stacciarini, 2025).

Quadro 2: Diferença entre Data center comum e Data center para IA

Característica	Data Center Comum	Data Center para IA
Processamento principal	Usa CPUs para tarefas variadas	Usa GPUs potentes para tarefas de IA e big data
Espaço físico	Menor, para equipamentos padrão	Maior, para acomodar muitas GPUs
Armazenamento	SSDs e HDs tradicionais	SSDs NVMe super rápidos e memória especial
Rede	Fibra óptica externa e cabos de cobre internos	Rede muito rápida, baixa latência, com tecnologia avançada
Consumo de energia	Menor consumo em geral	Consome muita energia; precisa de resfriamento especial
Resfriamento	Resfriamento por ar	Resfriamento líquido e sistemas avançados
Consumo de água	Baixo, uso limitado para resfriamento	Alto, uso intensivo em resfriamento líquido e sistemas de refrigeração avançada
Uso típico	Computação comum, sites, armazenagem	Grandes projetos de inteligência artificial
Escalabilidade	Média	Muito alta (hiperescala)

Fonte: Elaboração própria, com base em IBM, 2025.

Atualmente, as regiões da Ásia-Pacífico e da América do Norte se destacam como centros importantes para esses *data centers*, que suportam infraestrutura tecnológica avançada (IBM, 2025).

Na América Latina, o Brasil se destaca pela maior capacidade instalada, com centros em São Paulo, Rio de Janeiro, Distrito Federal — regiões com grande demanda por tecnologia — e no Ceará, que funciona como um ponto estratégico devido à presença de cabos submarinos, servindo como hub para as áreas Norte e Nordeste (Kaufman, 2025). Ainda conforme Kaufman (2025), está em construção no Rio Grande do Sul um *data center* (Figura 7), com investimento de R\$ 3 bilhões e capacidade de 54 megawatts, voltado principalmente para a exportação de serviços em nuvem.

Figura 7- Projeto do Scala AI City, 'cidade' de servidores em Eldorado do Sul (RS)



Foto: Divulgação/Scala Data Centers

A matriz energética do Brasil é majoritariamente renovável, com cerca de 89% de sua geração baseada em fontes limpas como hidrelétricas, eólicas e solares. Essa característica da matriz faz do Brasil um hub estratégico para *data centers*, especialmente os prontos para IA, pois permite a expansão dessas infraestruturas sem aumento significativo nas emissões de gases de efeito estufa. Além disso, a localização do país, associada a uma base industrial robusta e uma grande base de usuários de internet, torna-o competitivo para receber investimentos globais na área. Porém, os custos de processamento no Brasil ainda são altos devido à carga tributária e distribuição de energia. Isso demanda políticas específicas para acelerar a consolidação do país como polo de *data centers* sustentáveis na América Latina (Kaufman, 2025).

No Brasil, existem dois projetos importantes relacionados à regulamentação e estímulo ao setor de *data centers* que refletem a atenção governamental e legislativa ao tema da infraestrutura digital.

O primeiro trata-se da “Política Nacional de Data Centers” (Redata) que visa alinhar os custos brasileiros aos níveis internacionais e posicionar o país como um polo global de *data centers* (Kaufman, 2025). O Redata, instituído em 2025 por Medida Provisória assinada pelo governo brasileiro, tem como objetivo principal transformar o Brasil em um polo estratégico para *data centers*, especialmente aqueles voltados para inteligência artificial e tecnologias digitais avançadas. Através do Redata, o país oferece um regime especial de tributação que concede isenção de tributos federais como PIS, Cofins e IPI na aquisição de equipamentos, incentivando a implantação e expansão desses centros no território nacional. O programa integra a Política Nacional de Data Centers (PNDC), vinculada à Nova Indústria Brasil, focando no crescimento da computação em nuvem, IA, *smart factories* e Internet das Coisas (IoT), ampliando a capacidade brasileira de armazenamento, processamento e gestão de dados (Ministério da Fazenda, 2025).

Além dos incentivos fiscais, o Redata exige contrapartidas financeiras das empresas, que devem investir pelo menos 2% do valor dos produtos adquiridos em pesquisa, desenvolvimento e inovação para fortalecer as cadeias produtivas digitais brasileiras. Também estipula que, no mínimo, 10% da capacidade desses serviços seja direcionada ao mercado interno, com redução dessas obrigações para investimentos nas regiões Norte, Nordeste e Centro-Oeste. O programa promove ainda rigorosos critérios de sustentabilidade, incluindo o uso de energia renovável ou limpa e eficiência hídrica, buscando o desenvolvimento econômico alinhado à sustentabilidade. Essas medidas estruturantes visam reduzir a alta dependência brasileira de serviços digitais estrangeiros, que atualmente correspondem a cerca de 60% das cargas digitais do país, e atraem investimentos privados estimados em R\$ 2 trilhões nos próximos dez anos, consolidando o Brasil como um hub de tecnologia e inovação em *data centers* de IA. O programa já tem reserva orçamentária de R\$ 5,2 bilhões para 2026 e, a partir de 2027, contará com os benefícios da reforma tributária (Ministério da Fazenda, 2025).

O segundo projeto é o Projeto de Lei nº 3018/2024, em tramitação no Congresso Nacional, que dispõe sobre a regulamentação dos *data centers* de inteligência artificial no Brasil. Esse projeto visa criar um marco legal que contemple as especificidades ambientais, tecnológicas e de segurança desses *data centers*, buscando equilibrar o avanço tecnológico com a sustentabilidade. A regulamentação proposta procura mitigar os impactos ambientais e assegurar normas rigorosas para a instalação e operação das unidades, o que é crucial para um

país que enfrenta desafios como a escassez hídrica, a crise energética e desigualdades sociais (Congresso Nacional, 2024).

Esses dois projetos mostram a necessidade de diretrizes ambientais e políticas regulatórias para que o crescimento do setor de *data centers* no Brasil ocorra sem comprometer os recursos naturais e a qualidade de vida da população. A combinação de incentivos sustentáveis e regulamentação específica pode promover inovação com responsabilidade ambiental e social.

Já em relação ao seu funcionamento, um *data center* preparado para IA precisa de recursos de computação de alto desempenho (HPC), capazes de processar grandes volumes de dados de forma rápida e eficiente, como os encontrados nos aceleradores de IA. Aceleradores de IA são chips usados para acelerar modelos de *machine learning* e *deep learning*, processamento de linguagem natural e outras operações de IA. São amplamente considerados como o hardware que torna possível a IA e suas muitas aplicações (IBM, 2025).

Um exemplo avançado de chip para IA são os produzidos pela Nvidia, como o H200 Tensor Core, um chip projetado especificamente para cargas intensas de IA e HPC. Sua arquitetura aumenta significativamente a velocidade e eficiência no processamento de grandes modelos, como os de linguagem. Além disso, as melhorias em memória e largura de banda permitem o manuseio de grandes volumes de dados com menos latência, acelerando tanto o treinamento quanto a inferência dos modelos (Nvidia, 2025). A inferência é o processo pelo qual um modelo de IA treinado é usado para fazer previsões ou decisões com base em novos dados, funcionando como a execução prática da IA após seu treinamento (IBM, 2025). Assim, impulsionada pela forte demanda por chips usados em IA, a Nvidia foi considerada a empresa mais valiosa⁵ em 2025, ultrapassando a Microsoft e a Apple.

A arquitetura de rede dos *data centers* dedicados à IA utiliza conexões com alta largura de banda e baixa latência para interligar chips, evitando gargalos que comprometeriam o desempenho dos modelos. A latência é o tempo de atraso entre o envio dos dados para o processamento e a geração da resposta pelo sistema. Quanto menor a latência, mais rápido o sistema de IA responde aos dados que recebe. Em sistemas de IA, especialmente na fase de inferência, manter a latência baixa é fundamental para que as respostas sejam rápidas e em tempo quase real. Isso é crítico para aplicações que dependem de decisões imediatas, como veículos autônomos e monitoramento médico, onde atrasos podem comprometer a eficiência e

⁵ Em valor de mercado. Fonte: <https://exame.com/invest/mercados/as-10-empresas-mais-valiosas-do-mundo-em-2025/>

a segurança. A arquitetura dos *data centers* de IA é feita para minimizar esse tempo de atraso, usando conexões rápidas e diretas entre os chips, evitando qualquer gargalo que aumentaria a latência e prejudicaria o desempenho (Chen, 2024).

O processamento característico dos modelos de IA geram calor e para controlar o calor, esses *data centers* utilizam sistemas avançados de refrigeração com consumo de água potável que podem incluir resfriamento líquido direto ao chip, sistemas de fluxo de ar altamente controlados e circuitos fechados de refrigeração, que são mais eficientes e consomem menos água em comparação aos métodos tradicionais baseados em resfriamento a ar. Essa gestão térmica é necessária para manter a operação estável, evitar falhas no hardware e reduzir o consumo energético total do sistema. Os métodos mais comuns envolvem torres de resfriamento, nas quais a água é evaporada para dissipar o calor. Em média, cada quilowatt-hora (kWh) de energia utilizada pode consumir de 1 a 9 litros de água, dependendo das condições climáticas e da tecnologia empregada. Em regiões de clima mais quente, como o Arizona nos Estados Unidos, esse valor pode atingir o limite superior da faixa (Li *et al.*, 2025).

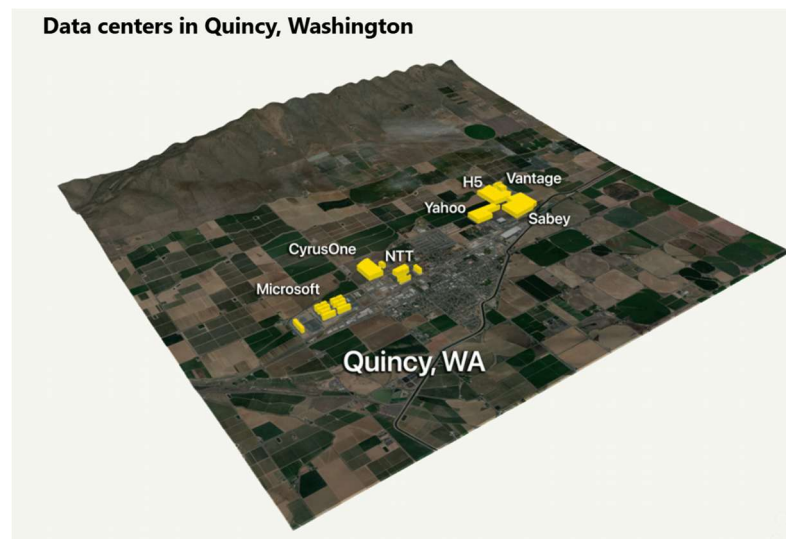
O uso de água potável para refrigeração em *data centers* porque possui alta capacidade de absorção e dissipação de calor, o que é essencial para o desempenho e longevidade dos equipamentos. Além disso, o uso de água potável, tratada e controlada, assegura a eficiência e confiabilidade dos sistemas de resfriamento, evitando a contaminação e danos ao hardware. A escolha pelo uso de água potável em ambos os escopos está vinculada à necessidade de manter a integridade dos sistemas de resfriamento e evitar a utilização de água de baixa qualidade que pode acarretar entupimentos, corrosão e proliferação de microrganismos. O custo hídrico dos *data centers* de IA envolve tanto o consumo local direto para resfriamento quanto o consumo indireto relacionado à produção da eletricidade utilizada, compondo um cenário complexo que demanda estratégias integradas para a gestão eficiente da água potável neste setor (Ren, 2025).

Estudos de sistemas avançados de reuso da água visam diminuir o impacto ambiental e reduzir custos. Em um desses estudos, apresentou-se uma solução inovadora de resfriamento para *data centers*, baseada no uso de resfriamento evaporativo com sistemas integrados de recuperação da água utilizada. A tecnologia aproveita o calor residual de baixa temperatura para reutilizar a água evaporada durante o processo de resfriamento, o que aumenta a eficiência energética e promove a sustentabilidade da operação. Esse método reduz significativamente o consumo total de água, mantém a temperatura adequada dos equipamentos e contribui para a diminuição do impacto ambiental dos *data centers* em ambientes com restrições hídricas (Goodson, 2025).

Além do aumento energético em comparação ao que se conhecia em *data centers* tradicionais, a operação destes centros contribui para o aumento da emissão de gases de efeito estufa, especialmente se a energia consumida provém de fontes não renováveis.

A escolha do local ideal para um *data center* envolve levar em consideração o nível de estabilidade natural da região, considerando parâmetros como a disponibilidade de fontes confiáveis de energia e água, a proximidade de hubs de rede⁶ e o cumprimento integral das regulamentações locais. Por exemplo, *data centers* localizados em áreas com condições climáticas favoráveis podem adotar técnicas de resfriamento natural que reduzem o consumo de energia. Técnicas de resfriamento natural em *data centers* utilizam o clima local para reduzir a temperatura sem depender intensamente de sistemas artificiais, diminuindo o consumo de energia. Exemplos incluem o *free cooling*, que aproveita o ar externo frio; o resfriamento evaporativo, que usa a evaporação da água para resfriar o ar; o resfriamento geotérmico, que aproveita o frio do solo ou fontes naturais; e o resfriamento passivo, baseado em ventilação natural e materiais que absorvem e dissipam calor. Essas técnicas são eficazes em locais com condições climáticas favoráveis (FAGUNDES, 2025).

Figura 8: Data Centers em Quincy, WA, Estados Unidos



Fonte: & the West (2025)

⁶ Hubs de rede são locais usados como pontos de entrada ou saída para o tráfego de dados entre diferentes redes de computadores, permitindo que essas redes se comuniquem e compartilhem informações de forma eficiente e segura. Esses pontos podem ser físicos, envolvendo cabos e equipamentos como roteadores e switches, ou virtuais, configurados através de protocolos e endereçamento IP. A interconexão viabiliza a troca direta de dados entre provedores, melhorando o desempenho da rede e reduzindo custos operacionais, além de ser fundamental para um ecossistema de conectividade robusto e confiável, como em *data centers* e pontos de troca de tráfego (PTTs)

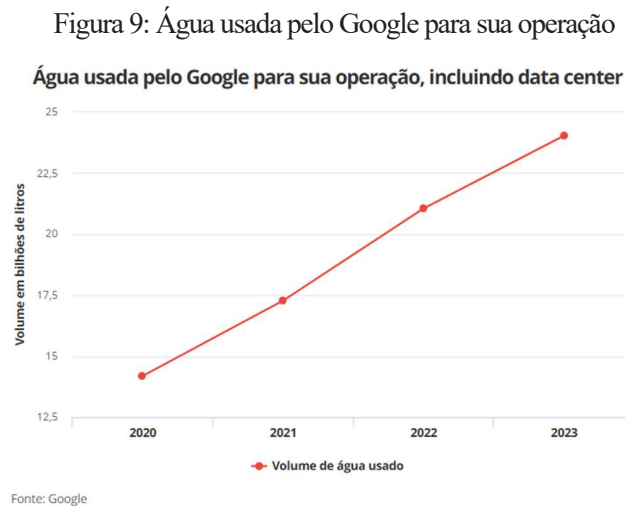
2.2 Pegada hídrica e emissão de carbono

A pegada hídrica da IA, torna-se um fator sensível ao paradoxo entendendo que segundo estimativas da ONU (2022), 25% da população mundial — aproximadamente 2,2 bilhões de pessoas — não têm acesso à água potável. Essa falta de acesso envolve tanto a indisponibilidade de água limpa para consumo quanto a ausência de saneamento básico adequado. Isso gera um dilema, pois justamente em um contexto global onde bilhões de pessoas não têm acesso à água potável, o crescimento da IA pode aumentar a pressão sobre recursos hídricos escassos ou mal distribuídos.

As Nações Unidas estabeleceram o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 6 (ODS 6) para garantir o acesso universal à água potável e saneamento até 2030. No entanto, o progresso tem sido lento, e muitos países ainda enfrentam desafios significativos para alcançar essa meta. Em 2020, aproximadamente 75% da população mundial tinha acesso a serviços de abastecimento de água potável geridos de forma segura. No entanto, essa cobertura apresentou variações significativas entre as regiões, alcançando cerca de 96% na Europa e América do Norte e caindo para apenas 30% na África Subsaariana. Além disso, existem outras desigualdades que impactam o acesso à água, como demonstrado por um estudo de 2015 que analisou dados de seis países da América Latina e do Caribe, evidenciando uma diferença de 19% no acesso à água encanada entre comunidades indígenas e não indígenas (ONU, 2022).

Embora haja busca por inovação e alternativas, como o reuso de água mencionado anteriormente, a pegada hídrica da IA representa um dos aspectos mais críticos no debate sobre sustentabilidade tecnológica por que o funcionamento de modelos avançados de IA, especialmente aqueles de grande porte como o GPT-3 e o GPT-4, depende de uma infraestrutura computacional robusta, instalada em *data centers* que consomem volumes expressivos de água tanto para resfriamento quanto para a geração de energia elétrica, apesar de parte desse consumo ser reaproveitável. O consumo hídrico nesses ambientes ocorre de maneira direta, por meio do uso de água para resfriar servidores, e indireta, pelo consumo de eletricidade cuja produção, em muitos casos, também demanda grandes quantidades de água (Li *et al.*, 2025).

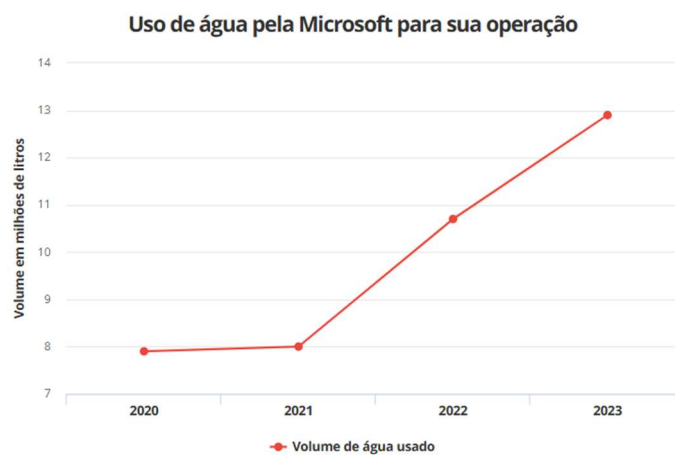
Segundo o Google (2025), que tem o Gemini como ferramenta de IA, foram necessários 6,4 bilhões de galões de água para manter sua estrutura em 2023 — o equivalente a 24 bilhões de litros. É o maior volume desde 2019, antes do lançamento da ferramenta.



Fonte: Google (2025)

O mesmo aconteceu com a Microsoft (2024). A empresa declarou ter usado em 2023 12,9 bilhões de litros de água — o maior número já registrado nos últimos anos e que evidencia a diferença no consumo antes e depois da chegada da IA.

Figura 10: Água utilizada pela Microsoft para sua operação



Se não for abordada adequadamente, a pegada hídrica da IA pode se tornar um grande obstáculo para a sustentabilidade e criar conflitos sociais, já que os recursos de água doce adequados para consumo humano são extremamente limitados e distribuídos de forma desigual. (Li *et al.*, 2025, p. 1).

Estima-se que para cada 10 a 50 respostas de comprimento médio geradas pelo GPT-3, seja necessário o equivalente a uma garrafa de 500 ml de água, dependendo do local e do momento da operação (Li *et al.*, 2025, p. 2).

Em escala global, a projeção para 2027 indica que a demanda por IA poderá representar entre 4,2 e 6,6 bilhões de metros cúbicos de retirada de água, valor superior ao consumo anual de água de quatro a seis Dinamarcas ou metade do Reino Unido (Li *et al.*, 2025, p. 2). No mesmo período, estima-se que entre 0,38 e 0,60 bilhão de metros cúbicos de água serão efetivamente consumidos (evaporados) devido à demanda global por IA.

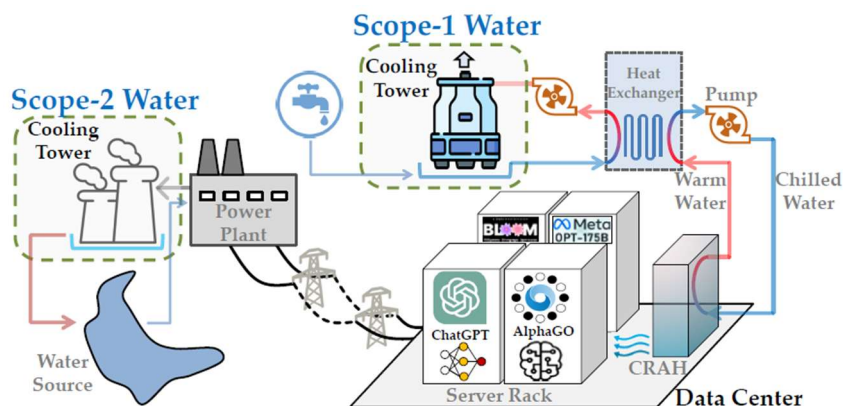
Apesar da limitação das informações públicas detalhadas sobre o consumo de água, os autores conseguiram estimar a pegada hídrica dos modelos de IA utilizando dados disponibilizados por grandes operadores de *data centers*, como Google e Microsoft, cujos relatórios de sustentabilidade têm começado a revelar métricas de consumo de água. Além disso, foram aplicadas metodologias fundamentadas, baseadas em métricas como Water Usage Effectiveness (WUE) e Electricity Water Intensity Factors (EWIF), combinadas com dados conhecidos sobre consumo energético e eficiência das instalações, para construir estimativas consistentes e conservadoras.

O consumo de água potável em *data centers* voltados ao processamento de aplicações de IA envolve duas principais dimensões, conforme detalhado por Li *et al.* (2025). Primeiramente, o consumo direto está associado ao uso da água no local para o resfriamento dos servidores. Estes equipamentos geram grande quantidade de calor durante o processamento de dados, o que exige sistemas eficientes para garantir a estabilidade operacional. O método mais comum consiste no uso de torres de resfriamento, nas quais a água é evaporada para dissipar o calor gerado. A água evaporada é considerada consumida, uma vez que não retorna ao sistema hídrico local. De acordo com Li *et al.* (2025), aproximadamente 80% da água retirada em processos de resfriamento é efetivamente evaporada e, portanto, consumida. Além disso, a água que circula retorna ao sistema, mas em circuitos abertos que exigem reposição constante para prevenir o acúmulo de minerais, o que pode prejudicar a eficiência dos sistemas.

O segundo aspecto está relacionado ao consumo indireto de água, que ocorre fora do *data center*, sobretudo nas usinas termelétricas responsáveis pela geração da eletricidade consumida pelo centro de dados. Essas usinas utilizam grandes volumes de água potável para resfriamento das turbinas e outros equipamentos, constituindo uma parte significativa da pegada hídrica dos *data centers*. Li *et al.* (2025) destacam que, em muitos países, a geração termoelétrica é um dos setores com maior demanda hídrica, amplificando o impacto do

consumo indireto dos *data centers*. Nos Estados Unidos, por exemplo, a média nacional de consumo de água para a geração de energia elétrica é de aproximadamente 3,1 litros por kWh.

Figura 11: Consumo de água em Data Center



Fonte: <https://oecd.ai/en/work/how-much-water-does-ai-consume>

Estima-se que os *data centers* respondam por cerca de 2% das emissões globais de GEEs, com projeções apontando para 2,5 bilhões de toneladas de CO₂ emitidas até 2030, (Olexa, 2024).

2.3 Impactos ambientais na extração de terras raras e lítio e a dependência da IA

As terras raras são um conjunto de 17 elementos químicos⁷, compostos principalmente pela família dos lantanídeos, além do escândio e do ítrio, que apresentam propriedades químicas e físicas similares. Apesar do nome, esses elementos não são raros na crosta terrestre, mas são assim chamados devido à dificuldade de extração, pois geralmente não ocorrem em minerais puros, estando dispersos em concentrações baixas e misturados a outros minerais. Eles são classificados em terras raras leves, médias e pesadas, e são amplamente utilizados em tecnologias de alta performance devido à sua ductilidade, maleabilidade, capacidade de conduzir calor e eletricidade, além de propriedades magnetizáveis. Segundo Crawford (2021), esses elementos são fundamentais para a produção de inúmeros componentes eletrônicos, catalisadores e equipamentos médicos, evidenciando sua relevância tanto tecnológica quanto econômica.

⁷ Conforme a União Internacional de Química Pura e Aplicada (*International Union of Pure and Applied Chemistry*, IUPAC). Disponível em: <https://iupac.org/what-we-do/periodic-table-of-elements/>

As terras raras e o lítio têm um papel crucial no desenvolvimento da IA devido às suas propriedades químicas e físicas exclusivas, que são indispensáveis para a fabricação de componentes eletrônicos sofisticados e para sistemas de armazenamento energético. Entre esses minerais essenciais estão elementos como o disprosio e o neodímio, utilizados em alto-falantes de iPhones e motores de veículos elétricos; o germânio, empregado em dispositivos infravermelhos militares para soldados e drones; e o cobalto, que contribui para a melhoria do desempenho de baterias. Esses elementos são processados e incorporados em dispositivos como laptops e smartphones, auxiliando na redução do tamanho e peso desses aparelhos. Eles podem ser encontrados em diversos componentes, tais como telas coloridas, alto-falantes, lentes de câmera, baterias recarregáveis e discos rígidos. Além disso, esses elementos são fundamentais em sistemas de comunicação, desde cabos de fibra óptica e amplificação de sinal em torres de comunicação móvel até satélites e tecnologia GPS (Crawford, 2021).

Já o lítio, é um componente fundamental para o avanço da IA especialmente por seu papel nas baterias de íons de lítio que alimentam dispositivos móveis, robôs inteligentes e centros de dados que necessitam de energia constante e confiável para operações em larga escala. Sua alta densidade energética, leveza e capacidade de recarga rápida são essenciais para o funcionamento contínuo e eficiente de sistemas de IA, que exigem processamento em tempo real e armazenamento robusto. A demanda global por lítio tem impulsionado investimentos e controle sobre as regiões onde seus depósitos são mais abundantes, como na América do Sul e na Austrália, induzindo uma complexa rede de interdependências e estratégias entre países e corporações para garantir o acesso a esse recurso. Esse cenário relativamente novo movimenta as dinâmicas de cooperação e competição que influenciam decisões econômicas e políticas internacionais, refletindo a importância do lítio para o posicionamento estratégico global de nações e empresas (Stacciarini; Gonçalves, 2025).

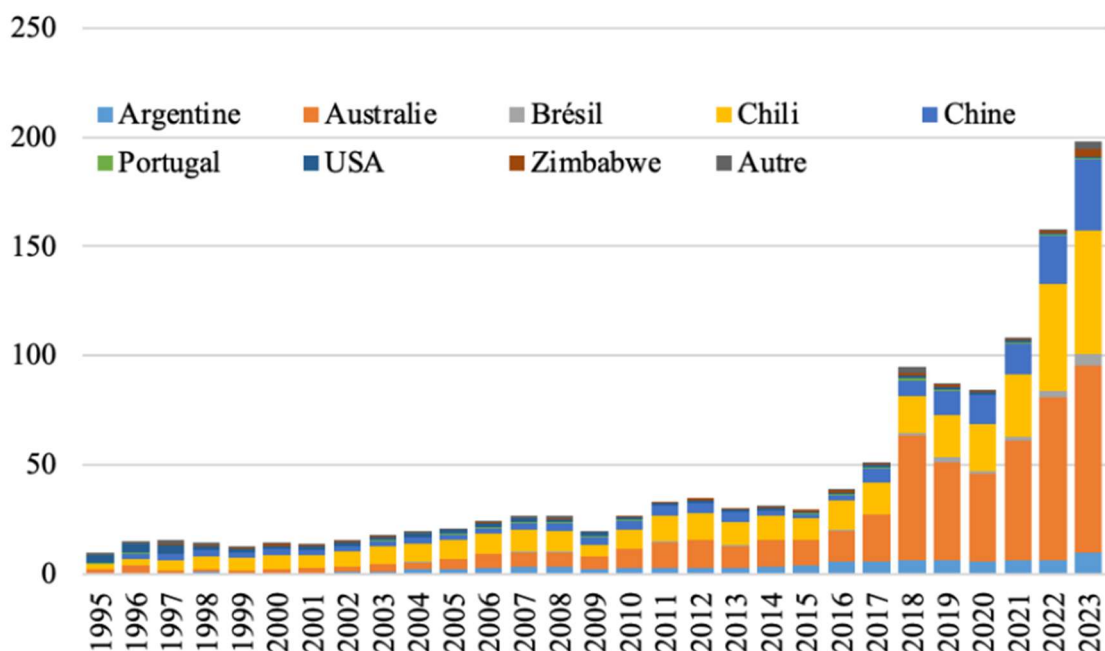
O lítio foi descoberto em 1817 pelo químico sueco Johan August Arfwedson durante a análise do mineral petalita, encontrado na ilha sueca de Utö. O mineral petalita, que contém lítio, havia sido descoberto no final do século XVIII pelo cientista brasileiro José Bonifácio de Andrada e Silva enquanto visitava a Suécia. O lítio é um metal alcalino, de símbolo Li e número atômico 3, conhecido por ser o metal mais leve e altamente reativo, encontrado na natureza apenas em minerais e salmouras (Webelements, 2025). Por causa de sua baixa massa atômica, ele tem uma alta carga e uma potência específica. Ele não é encontrado em seu estado nativo; ou seja, não existe livre na natureza, sendo localizado na maioria das vezes na condição de composto químico iônico. Além disso, devido ao seu elevado calor específico é usado em

aplicações de transferência de calor e, por causa do seu elevado potencial eletroquímico e alta densidade energética, é usado como um ânodo adequado para as baterias elétricas. Por exemplo, uma bateria de íons de lítio típica pode gerar aproximadamente 3 volts por célula, comparado com 2,1 volts para a bateria de ácido de chumbo ou 1,5 volts de células de zinco-carbono (Rodrigues, 2022).

As principais reservas encontram-se em regiões de salares, terras que há dezenas de milhares de anos eram cobertas por oceanos e, com a formação geológica dos continentes, acabaram secando e formando grandes desertos de sal. O lítio se encontra dissolvido abaixo da grossa crosta, em uma camada de solução impregnada de sal. O fato de ser um mineral que se concentra em região de salares faz com que países como Bolívia, com o *Salar de Uyuni*, Chile, com o *Salar de Atacama*, e Argentina, com o *Salar del Hombre Muerto*, estejam situados entre os maiores detentores mundiais de reservas deste recurso, Geopolítica do Lítio no Século XXI (Rodrigues, 2022).

Quanto às suas aplicações, é utilizado na obtenção de ligas metálicas condutoras de calor (alumínio), no feitiço de cerâmicas e lentes (telescópios), em graxas lubrificantes, em aplicações militares (aditivos energéticos nos propelentes dos foguetes e em bombas de hidrogênio), na medicina (medicamentos para depressão e transtorno bipolar), na indústria elétrica e eletrônica (produção de pilhas e baterias elétricas, como celulares, notebooks e carros híbridos/elétricos), dentre outros (Rodrigues, 2022).

Figura 12: Evolução do uso de lítio (1995-2023)



Fonte: Energy Institute (2024)

A extração do lítio também exige um consumo intensivo de água, especialmente preocupante em regiões áridas, comprometendo a disponibilidade hídrica local e a manutenção dos ecossistemas aquáticos. Além disso, a mineração a céu aberto promove a degradação do solo e a perda da biodiversidade, decorrentes do desmatamento e da contaminação causada por produtos químicos tóxicos utilizados no processo. Ademais, o impacto socioambiental sobre as comunidades locais inclui poluição do ar, sonora e hídrica, afetando a saúde humana e as atividades agrícolas e pecuárias.

Figura 13: Extração de lítio no Deserto do Atacama, Chile



Fonte: Tom Hegen/Instagram (2024)

A extração de lítio no Deserto do Atacama, Chile (Figura 13), por exemplo, provoca impactos ambientais significativos devido ao uso intensivo de água, estimado em 1,9 milhão de litros para cada tonelada extraída, com até 95% dessa água perdida por evaporação, resultando no esgotamento dos aquíferos e danos aos ecossistemas locais (Souza, 2023). Entre os anos de 2000 e 2015, a extração de lítio no Deserto do Atacama, Chile, utilizou uma quantidade de água 21% maior do que o fluxo natural disponível na região, uma das mais áridas do mundo. Esse consumo excessivo prejudica as comunidades indígenas, suas atividades agropecuárias e o abastecimento hídrico, além de causar o rebaixamento gradual da superfície do salar a taxas entre 1 e 2 cm ao ano e contaminação do solo, além de prejudicar a fauna. Há tecnologias emergentes, como a Extração Direta de Lítio (DLE), que buscam mitigar esses efeitos, mas ainda estão em fase experimental (Souza, 2023).

A crescente demanda por lítio (Figura 12) pode se tornar um gargalo no enfrentamento às mudanças climáticas quando guiada pela competitividade de mercado e interesses geopolíticos. Nesse sentido, o paradoxo sustentável da IA se manifesta na dependência de materiais críticos cuja extração compromete ecossistemas frágeis, coexistindo com ganhos tecnológicos e os custos ambientais associados, que são desiguais.

Assim, a demanda mundial por recursos naturais afeta diretamente esse paradoxo, demonstrando a necessidade de que o avanço tecnológico seja guiado por políticas que equilibrem inovação e sustentabilidade ambiental. Há estudos que indicam que a fabricação de um smartphone típico resulta na emissão de aproximadamente 55 a 95 kg de CO₂ por unidade, sendo que parte dessas emissões ocorrem na fase de extração e processamento de matérias-primas, sobretudo devido à mineração e ao refino de metais como ouro, cobre e cobalto, apesar de estes representarem apenas uma fração mínima da massa total do dispositivo (Ercan *et al.*, 2016; Proske *et al.*, 2016).

Figura 14- Mina Catumbi em Muzambinho e Cabo Verde, Minas Gerais, Brasil



Fonte: Cabo Verde Mineração (2024)

Essas informações contribuem para a concretização da ideia do paradoxo sustentável, que se evidencia na dimensão física da tecnologia, especialmente por sua natureza TPG, ou seja, por sua capacidade de gerar novas demandas.

2.4 Infraestrutura energética

Outro desafio está relacionado a infraestrutura elétrica e hídrica local. O consumo de energia dos *data centers* extremamente elevado, exige a construção de novas linhas de transmissão, subestações e ampliações constantes da capacidade de fornecimento (Stein, 2020). Assim, o crescimento da demanda por energia pode não acompanhar o tempo necessário para a expansão da infraestrutura de forma sustentável, criando gargalos e descompassos entre a demanda dos *data centers* e a capacidade da estrutura energética.

*Big Techs*⁸ têm investido de forma expressiva em fontes próprias de energia para suprir o elevado consumo de seus data centers. Companhias como Microsoft, Google, Oracle e Meta buscam fontes limpas, incluindo energia nuclear, para garantir o fornecimento necessário. Esse cenário ocorre em meio a desafios da infraestrutura elétrica local, que enfrenta desafios para acompanhar a rápida expansão dos *data centers*, exigindo frequentes ampliações e construções de novas linhas de transmissão e subestações, ocasionando gargalos e descompassos entre demanda e capacidade das concessionárias.

A matriz energética local desempenha um papel crucial no paradoxo sustentável da inteligência artificial, pois a origem da energia consumida pelos *data centers* impacta diretamente a pegada ambiental dessas infraestruturas. Em regiões onde predomina uma matriz energética baseada em fontes fósseis, como carvão ou gás natural, o elevado consumo energético dos *data centers* potencializa emissões de gases de efeito estufa, agravando os problemas ambientais que a própria IA tenta mitigar. Por outro lado, áreas com matrizes dominadas por energias renováveis, como hidrelétricas, eólicas, geotérmicas ou solares, oferecem um cenário mais favorável para reduzir o impacto ambiental da operação dos *data centers*, ainda que a variabilidade e a intermitência dessas fontes possam exigir investimentos complementares em armazenamento e estabilidade da rede, além do uso de recursos naturais que compõe a estrutura.

Países ou regiões com matriz energética diversificada e sustentável tendem a atrair mais investimentos das Big Techs, justamente pela possibilidade de alinhar crescimento tecnológico e responsabilidade ambiental. Por outro lado, a dependência de fontes não renováveis pode gerar tensões políticas e sociais em função do aumento da demanda energética, sobretudo se isso comprometer o fornecimento às populações locais ou aumentar custos

⁸ Big techs são grandes empresas de tecnologia que atuam globalmente, fornecendo produtos e serviços tecnológicos em larga escala. Exemplos incluem Google, Microsoft, Meta, Amazon e Apple.

tarifários. Assim, a matriz energética é um componente essencial para equilibrar o paradoxo sustentável da IA, ao condicionar não apenas o impacto ambiental, mas também a capacidade de expansão e a aceitação social dos avanços em computação em larga escala.

Em regiões com infraestrutura limitada ou dependente de fontes fósseis, essa alta demanda pode causar instabilidade no fornecimento, aumento dos custos e competição por eletricidade com outros setores essenciais da economia. A predominância de fontes não renováveis impacta negativamente a sustentabilidade ambiental, elevando as emissões de carbono. Portanto, um avanço da IA que seja sustentável depende da modernização e diversificação da matriz energética, com maior participação de energias renováveis e adoção de tecnologias que promovam eficiência energética e planejamento estratégico do consumo.

Data centers em países como a Finlândia utilizam energia renovável e apresentam uma emissão de gases de efeito estufa de cerca de 3%, além de alcançarem uma eficiência energética superior a 95% (Arbix, 2025). Em contraste, em países com infraestrutura mais precária ou dependente de fontes não renováveis, a eficiência desses centros pode cair para 10% ou até 5%, evidenciando um impacto ambiental muito mais severo no processamento de grandes volumes de dados. Essa disparidade ressalta como o impacto ambiental da IA varia significativamente conforme a localização e a infraestrutura disponível (Arbix, 2025).

Na Irlanda, que é pequena, mas tem uma política forte de atração de *data centers* — com isenção de impostos, doação de terras, incentivos fiscais de todo tipo —, o consumo energético é significativo e atinge cerca de 20% de toda a energia consumida no país. Uma situação nem sempre fácil de absorver, já que uma parte importante da energia consumida pelo país está fluindo para um grupo muito reduzido de empresas (Arbix, 2025). A legislação de alguns países exige que as empresas usuárias devolvam a água nas mesmas condições em que foi feita a coleta, ou seja, na mesma temperatura original para não matar os animais, plantas, bactérias etc. Mas nos centros de dados, essa correção nem sempre é possível, uma vez que parte da água evapora (Arbix, 2025).

2.5 Externalidades negativas

Na área ambiental é comum falar em externalidades, nos efeitos colaterais de atividades econômicas para terceiros que não estavam envolvidos diretamente na sua produção ou consumo. E uma tecnologia como a IA tem externalidades ambientais que precisam ser computadas no custo do projeto em si. Trata-se da aplicação prática do princípio do poluidor pagador, que determina que os responsáveis diretos e indiretos pela atividade poluidora devem

arcar com os custos de sua mitigação. Isso precisa entrar no custo da atividade de uma forma geral. É necessário avaliar o consumo de energia na produção, o tipo de energia utilizada e a gestão do descarte das baterias (Arbix, 2025).

A instalação de um *data center*, em comparação a outras indústrias produtivas, possui baixa geração de empregos diretos nas cidades com essas instalações, o que contrasta com os altos incentivos fiscais frequentemente concedidos para atrair esses empreendimentos, o que pode gerar questionamentos sobre o real benefício econômico para a comunidade. Soma-se a isso a ocupação de grandes áreas urbanas e rurais, que pode gerar conflitos com o planejamento urbano e o uso do solo, além de provocar insatisfação social e política, especialmente quando os benefícios percebidos pela população não são proporcionais aos custos e impactos gerados (Barringer, 2025).

Outra questão a ser lembrada é a produção e descarte do hardware usado na IA geram grandes volumes de resíduos eletrônicos tóxicos que contaminam solo e água, agravados pela rápida obsolescência dos equipamentos (Crawford, 2021).

Por fim, cabe citar a cultura como fator para externalidades entendendo que há crescimento na dependência cultural em relação à tecnologia digital, que promove transformações nos modos de vida, nas relações sociais e nas formas de produção cultural (Santaella, 2021). A cultura pode influenciar o paradoxo sustentável da IA ao criar uma dependência crescente da tecnologia digital que, ao promover novas demandas e modos de vida, como o uso de assistentes virtuais Alexa e *streaming* personalizado, intensifica o consumo, agravando os impactos ambientais. Todavia, a consciência quanto aos impactos ambientais associados a essas demandas muitas vezes pode parecer baixa.

2.6 Sustentabilidade: Iniciativas reguladoras

Em novembro de 2021, a IFRS Foundation⁹ criou o *International Sustainability Standards Board (ISSB)*, destinado a elaborar normas globais de divulgação em sustentabilidade. A iniciativa atendeu a demandas de organismos internacionais, como o Conselho de Estabilidade Financeira, G20¹⁰, G7¹¹ e IOSCO¹², que apontaram a necessidade de

⁹ <https://www.ifrs.org/>

¹⁰ O G20 ou Grupo dos 20 é um grupo formado pelos ministros de finanças e chefes dos bancos centrais das 19 maiores economias do mundo mais a União Africana e a União Europeia.

¹¹ O Grupo dos Sete (G7) é o grupo dos países mais industrializados do mundo, composto por: Alemanha, Canadá, Estados Unidos, França, Itália, Japão e Reino Unido, embora a União Europeia também esteja representada.

¹² International Organization of Securities Commissions

relatórios consistentes, abrangentes e comparáveis sobre fatores climáticos e de sustentabilidade. Antes do ISSB, divulgações eram feitas por meio de diferentes frameworks, o que dificultava a comparabilidade das informações (Oliari; Soares, 2024).

Para atingir seu objetivo, o ISSB publicou suas duas primeiras normas em 26 de junho de 2023: a IFRS S1 – direcionada ao tema de requisitos gerais para divulgação de informações financeiras relacionadas à sustentabilidade, e a IFRS S2 – com divulgações relacionadas ao clima. As IFRS S1 e S2, entre outros aspectos, apresentam requerimentos gerais para a divulgação de riscos e oportunidades relacionados à sustentabilidade, considerados materiais para o negócio. Essas normas tem como base quatro pilares, sendo a governança, estratégia, gestão de riscos e metas e métricas (Oliari; Soares, 2024).

No Brasil, essas normas possuem caráter voluntário a partir de janeiro de 2024 e serão obrigatórias para todas as empresas de capital aberto a partir de janeiro de 2026, conforme regulamentação da Comissão de Valores Mobiliários (CVM) e Conselho Federal de Contabilidade (CFC) (Oliari; Soares, 2024).

Nos Estados Unidos normas semelhantes de divulgação são obrigatórias e exigidas para empresas listadas na bolsa de valores, através de regulamentações do órgão regulador equivalente a Securities and Exchange Commission – SEC, equivalente a CVM no Brasil.

3. PARADOXO SUSTENTÁVEL DA IA: TECNOLOGIA PROTAGONISTA

Cada uma das aplicações da IA pode ser elemento para explorar a forma paradoxal em que a IA se estabelece no contexto sustentável. Por isso, este capítulo se concentrou em quatro tópicos que busca cobrir parte do potencial sustentável da IA, a citar: 3.1 Cidades Inteligentes, 3.2 Agricultura, 3.3 Projetos de Preservação Ambiental, 3.4. Eficiência Energética e, 3.5 Monitoramento e Mitigação de Desastres Naturais. Através da bibliografia selecionada, a pesquisa explorará aplicações que explicam os motivos pelos quais a IA é reconhecida por especialistas como uma tecnologia central e estratégica no enfrentamento das mudanças climáticas, além de seu protagonismo na busca por sustentabilidade já que ao ser incorporada a processos produtivos e mesmo dinâmicas sociais, a IA pode tornar estes sistemas mais sustentáveis.

3.1 Cidades inteligentes e a IA

Existe diferentes correntes de pensadores sobre o que são “Cidades Inteligentes” (“*Smart Cities*”). Elas podem ser entendidas como espaços urbanos que inicialmente focavam no uso das Tecnologias da Informação e Comunicação (TICs) — como softwares, IA, internet das coisas, big data, sensores, entre outros — para melhorar processos cotidianos das cidades. Esse enfoque tecnológico tem se transformado por fatores como mudanças climáticas e atualmente pode ser descrito com uma visão mais humanista. Assim, as cidades inteligentes são aquelas que investem simultaneamente nas pessoas, tecnologia e infraestrutura para promover o desenvolvimento sustentável, melhorar a qualidade de vida e fazer uso responsável dos recursos naturais, tudo isso por meio de uma governança participativa. A tecnologia é um meio, não um fim, e o capital humano — incluindo educação, criatividade, diversidade social e participação política — é fundamental para que as cidades sejam verdadeiramente inteligentes e sustentáveis. A convergência entre tecnologia e sustentabilidade é quase indissociável, e que as cidades inteligentes têm potencial para apoiar governos locais na gestão inovadora de setores como transporte, energia, meio ambiente, saúde e governança, contribuindo para metas de desenvolvimento sustentável (Dias, 2024; Vieira; Oliveira, 2023). Esta discussão sobre cidades inteligentes insere-se de maneira central no debate sobre sustentabilidade urbana e o papel das tecnologias digitais, especialmente a IA, na promoção de soluções sustentáveis desde a concepção dos projetos urbanos.

Observa-se cidades que já incorporam, em seus Planos de Ação Climática, princípios de governança participativa, uso de tecnologias da informação e comunicação (TICs) e propostas de adaptação em múltiplas frentes, como gestão hídrica, saúde pública, infraestrutura urbana, segurança alimentar, mobilidade e proteção ambiental, como por exemplo cidades latino-americanas como Santiago, Buenos Aires, Medellín e Belo Horizonte. Essas medidas estruturam-se tanto em ações técnicas, utilizando tecnologias como IA, como em políticas inclusivas, promovendo maior resiliência e capacidade de resposta local às mudanças climáticas (Dias, 2024).

A partir da integração do conceito de Cidades Inteligentes e IA, Siegfried Zhiqiang Wu (2025) chega ao conceito de Cidade de IA (“*AI City*”) que representa, um estágio avançado no desenvolvimento urbano, caracterizado por sistemas inteligentes autoorganizados, aprendíveis e interativos, possibilitados por tecnologias da próxima geração de IA (IA 2.0¹³). Tal conceito

¹³ IA 2.0 é uma evolução da IA tradicional que utiliza técnicas avançadas como aprendizado profundo e redes neurais para permitir que sistemas aprendam e se adaptem continuamente a partir de dados em tempo real, operando de forma mais autônoma, eficiente e integrada ao ambiente para oferecer respostas proativas e adaptativas em diversos contextos.

pressupõe a integração da IA no planejamento urbano, na construção, na gestão e na vida cotidiana, com o objetivo de solucionar problemas urbanos, atender a diferentes demandas humanas e promover o desenvolvimento sustentável. Diferentemente dos modelos tradicionais de cidades inteligentes, a Cidade de IA ultrapassa esses paradigmas ao permitir que a cidade realize aprendizado contínuo por meio de processamento de dados em larga escala e soluções de IA apoiando-se em sistemas multiagentes que coordenam processos autônomos para prever, autoorganizar e ajustar a infraestrutura e serviços urbanos em tempo real. Assim, a Cidade de IA opera como um sistema adaptativo complexo, com capacidades cibernéticas de autoajuste e otimização, proporcionando uma governança urbana proativa e eficiente (Wu, 2025).

A arquitetura da Cidade de IA compreende múltiplas camadas e componentes integrados. Destaca-se o sistema multi-cérebro, que inclui um cérebro principal responsável por decisões estratégicas, cérebros auxiliares para decisões de subsistemas, subcérebros orientados para a auto-organização local e cérebros terminais que atuam em pontos de percepção com decisões reflexivas; toda essa estrutura é suportada por tecnologias de comunicação 5G e 6G. Complementarmente, o sistema opera em três níveis funcionais: o cérebro, destinado a decisões estratégicas; o cerebelo, que comanda as operações; e o sistema nervoso autônomo, responsável por respostas locais rápidas e eficientes, dispensando o controle centralizado. Os fundamentos tecnológicos que alicerçam a Cidade de IA incluem inteligência baseada em big data, inteligência de enxame, inteligência multimídia, inteligência aumentada híbrida (que promove colaboração entre humanos e máquinas) e sistemas autônomos não tripulados. A gestão de dados ocorre por meio de plataformas como a Aliança de Mapeamento Inteligente de Cidades (CiMA), que integra dados espaciais e não espaciais multidimensionais para análise e suporte à decisão. Essa configuração tecnológica possibilita uma função urbana precisa em larga escala, a simulação dos padrões evolutivos urbanos e a governança inteligente (Wu, 2025).

Os determinantes do desenvolvimento das Cidades de IA incluem cinco fatores essenciais: a capacidade contínua de aprendizado a partir de vastos dados urbanos; a descoberta de leis subjacentes ao desenvolvimento, operação e gestão urbana por meio da mineração desses dados; a análise preditiva para antecipar problemas e tendências futuras; a auto-organização inteligente por meio de decisões descentralizadas e hierárquicas; e o desenvolvimento tecnológico orientado pelas necessidades urbanas, garantindo relevância e impacto positivo. Essa abordagem busca aprimorar a eficácia urbana, a sustentabilidade e a qualidade de vida, alinhando a inovação tecnológica às demandas centradas no ser humano (Wu, 2025).

Os objetivos da Cidade de IA abrangem a satisfação de necessidades humanas diversas, que variam desde as básicas, como segurança, interação social e ambientes de vida

convenientes, até aquelas voltadas à resolução de problemas urbanos relacionados a trânsito, envelhecimento populacional e meio ambiente. Além disso, também são consideradas necessidades aspiracionais, como culturais, educacionais, profissionais e visões futuristas, incluindo o desenvolvimento de cidades aéreas ou subaquáticas. Ao colocar as pessoas no centro do planejamento, as Cidades de IA promovem a melhoria da qualidade de vida, o estímulo à interação social e à inovação, bem como a oferta de serviços urbanos personalizados e inteligentes (Wu, 2025).

No âmbito tecnológico, as Cidades de IA são impulsionadas pelas tecnologias IA 2.0, que englobam inteligência de big data para análise profunda de dados heterogêneos, inteligência de enxame para a gestão colaborativa de grandes grupos de agentes de IA distribuídos, inteligência multimídia para integração e raciocínio sobre vários tipos de dados (visuais, auditivos e textuais), inteligência aumentada híbrida para equilibrar automação e supervisão humana, especialmente em decisões complexas, e inteligência autônoma que envolve sistemas não tripulados, como drones e veículos autônomos, contribuindo para a produtividade, segurança e gestão urbana (Wu, 2025).

Exemplos práticos oriundos da China ilustram a aplicação desses conceitos. Projetos como o Qingdao Sino-German Future-Park destacam o uso da plataforma CIM, integrando BIM, GIS e IoT para planejamento, construção e governança inteligente em tempo real. A Shanghai Jinding Smart City enfatiza a percepção inteligente das necessidades dos residentes, alocação de espaços e funções por IA e nove cenários de aplicação, incluindo vida inteligente, comércio, saúde, transporte, energia e segurança. O Taizhou Innovation Park exemplifica a transformação do espaço industrial por meio da manufatura inteligente 4.0, aliada à restauração ecológica. Por fim, a Shanghai Maqiao AI Innovation Pilot Zone configura-se como a primeira cidade de IA do mundo que integra todo o ciclo de vida da IA utilizando a integração de múltiplos elementos de IA para governança, produção, vida inteligente e sustentabilidade ecológica, estabelecendo referências globais (Wu, 2025).

Em termos de governança, as Cidades de IA adotam paradigmáticas colaborações inteligentes, abandonando modelos centralizados top-down em favor de redes colaborativas. Elas apresentam capacidades de governança urbana em múltiplos níveis, que vão desde segurança e operação eficiente até inovação e colaboração comunitária. A integração contínua da análise das necessidades humanas com previsões feitas por IA orienta o planejamento estratégico e a gestão de riscos. Aspectos éticos, segurança na aplicação tecnológica e o foco na experiência urbana centrada no ser humano são enfatizados, assim como a formação de talentos especializados por meio de reformas educacionais e serviços baseados em IA

sustentando o desenvolvimento das Cidades de IA. O contexto chinês, caracterizado por urbanização avançada e rápido crescimento do mercado de IA, traz desafios e oportunidades para a integração tecnológica, compartilhamento de dados, sistemas decisórios hierárquicos e a preservação dos valores humanos no processo evolutivo das Cidades de IA (Wu, 2025).

No aspecto ambiental, o paradoxo das cidades inteligentes está na tensão entre o uso intensivo de tecnologias para promover a eficiência e sustentabilidade — como monitoramento ambiental em tempo real, gestão integrada de energia, transporte sustentável, redução de emissões e melhor gestão de resíduos — e o impacto ambiental gerado pela própria infraestrutura tecnológica dessas cidades. Enquanto as cidades inteligentes têm potencial para reduzir significativamente os impactos ambientais das atividades urbanas, o funcionamento de redes digitais, *data centers*, sensores e dispositivos tecnológicos demanda grande consumo de energia, *oftentimes* ainda proveniente em grande parte por fontes não-renováveis.

Além disso, a grande concentração tecnológica pode gerar efeitos indesejados como aumentos locais nas emissões de carbono e no consumo de recursos naturais, demandando planejamento cuidadoso para mitigar esse custo. Portanto, o paradoxo ambiental está em como equilibrar os benefícios ambientais proporcionados pela tecnologia das cidades inteligentes com os custos ambientais inerentes a essa mesma tecnologia, para evitar que soluções que visam à sustentabilidade urbana acabem, simultaneamente, gerando impactos negativos ambientais substanciais.

Quando se fala em planejamento e construção de cidades inteligentes, o conceito de *sustainable by design* exemplifica a essência de uma cidade inteligente. Na perspectiva de um produto, o conceito de *sustainable by design* significa projetar e desenvolver o produto desde a sua concepção com foco na sustentabilidade ambiental, social e econômica. Isso inclui considerar o ciclo de vida completo do produto — desde a seleção de matérias-primas, processos produtivos, distribuição, uso até o descarte ou reaproveitamento — de forma a minimizar impactos negativos e maximizar benefícios positivos para o meio ambiente e a sociedade (Coffay; Bocken, 2023).

Figura 15: Usina elétrica Orca na Islândia



Fonte: Arni Saeberg (2024)

Em Hellisheiði, que é uma região nos arredores de Reykjavik, capital da Islândia está localizada a usina Orca. Esta usina é uma instalação que captura CO_2 da atmosfera e o armazena no subsolo. É considerada a primeira usina de captura de carbono em larga escala do mundo e utiliza tecnologia suíça de captura direta de ar e é alimentada por energia geotérmica renovável. Embora não utilize diretamente IA em seu processo principal de captura e armazenamento, a usina conta com sistemas de monitoramento e controle que podem se beneficiar de tecnologias de IA para otimização (Zhang, 2023).

Reykjavik pode ser considerada um bom exemplo de uma cidade inteligente devido ao seu compromisso com a sustentabilidade, inovação tecnológica e qualidade de vida dos seus habitantes. A cidade utiliza fontes de energia limpa e renovável, como geotérmica e hidrelétrica, que abastecem quase a totalidade da sua eletricidade, visando a emissão zero de carbono até 2040. Possui uma infraestrutura tecnológica avançada, destacando-se uma das redes de fibra óptica mais rápidas do mundo, o que possibilita alta conectividade e suporte a serviços digitais. A mobilidade sustentável é incentivada por meio do uso crescente de carros elétricos e políticas que promovem o transporte público, além de medidas para controlar o uso de combustíveis fósseis, como aumento de impostos sobre gasolina e redução da velocidade nas vias. O planejamento urbano é centrado no cidadão, com espaços públicos que valorizam a acessibilidade, segurança e a integração com a paisagem local. Além disso, Reykjavik adota políticas que promovem a eficiência energética em edificações e a participação social,

tornando-se um exemplo global de cidade inteligente que articula tecnologia, sustentabilidade ambiental e urbanismo orientado para o bem-estar da população (Sigurjonsson; Wendt 2025).

Segundo Sigurjonsson e Wendt (2025), a integração da IA ao longo da cadeia de valor — desde a produção até o processamento e a distribuição — tem permitido a otimização do uso de recursos, a redução de desperdícios e a melhoria das condições de trabalho. Dados do artigo indicam que quase um terço das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) é proveniente do setor alimentício, o que torna imprescindível a adoção de tecnologias inovadoras para mitigar impactos ambientais (Climate and environment, 2021). No contexto islandês, sistemas baseados em IA monitoram o consumo de energia e identificam ineficiências, resultando em redução do uso de água e eletricidade nas instalações de processamento. Além disso, sensores inteligentes e ferramentas analíticas automatizadas têm sido fundamentais para detectar defeitos em matérias-primas e monitorar processos produtivos, contribuindo para a minimização de perdas e alinhamento com metas globais de sustentabilidade, como os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. Apesar dos benefícios, o artigo ressalta desafios como o alto custo de implementação e a necessidade de capacitação técnica, evidenciando que a consolidação da IA como vetor de sustentabilidade na cadeia produtiva requer uma abordagem estratégica e colaborativa entre empresas, governos e sociedade civil (Sigurjonsson; Wendt 2025). Com o desenvolvimento de políticas e *frameworks* mais robustos, a IA poderá contribuir ainda mais para a transparência, rastreabilidade e resiliência do setor alimentício frente aos desafios ambientais globais (Sigurjonsson; Wendt, 2025).

A Islândia tem utilizado a IA para promover práticas sustentáveis em toda a cadeia de produção alimentícia. Empresas islandesas do setor alimentício veem a IA como parte fundamental de sua transformação digital. Embora a motivação inicial para adoção da IA seja o aumento da eficiência e competitividade, os benefícios para a sustentabilidade tornam-se evidentes ao longo do processo. A IA é incorporada nas estratégias corporativas principalmente para otimizar operações, mas acaba contribuindo de forma significativa para metas ambientais e sociais. Um dos maiores impactos da IA é a otimização do uso de recursos naturais, como água e energia elétrica. Sistemas baseados em IA monitoram o consumo energético em instalações de processamento de alimentos, identificando desperdícios e sugerindo ações corretivas em tempo real. Isso reduz custos operacionais e, mais importante, diminui o impacto ambiental da produção. (Sigurjonsson; Wendt, 2025). Esse exemplo relaciona-se diretamente com o conceito de cidades inteligentes ao destacar o uso da IA para promover práticas sustentáveis no setor alimentício. Reforça-se que cada localidade possui seus próprios desafios geográficos, sociais, econômicos, geológicos e legais; esses elementos criam desafios próprios

que revela a complexidade do alcance sustentável na implementação dessas tecnologias. A Islândia ilustra bem esse alcance de equilíbrio, combinando eficiência, inovação tecnológica e responsabilidade ambiental em um contexto adaptado à sua realidade específica.

Esse contexto de uso crescente da IA nas cidades evidencia o paradoxo sustentável: embora a IA proporcione mais eficiência urbana e apoie a gestão ambiental, ela também cria demandas inéditas por processamento de dados, conectividade e infraestrutura digital, aumentando o consumo de energia e a pressão sobre recursos naturais. A lógica da otimização tende a expandir o próprio sistema que busca tornar mais eficiente, fazendo com que ganhos ambientais coexistam com novos custos materiais e energéticos.

3.2 Agricultura

No contexto da Agricultura 4.0, o uso intensivo de dados digitais e sensores permite uma gestão mais precisa e eficiente das atividades agrícolas. A aplicação da IA na agricultura envolve principalmente o processamento de grandes volumes de dados coletados por dispositivos como drones, sensores remotos, câmeras multiespectrais e veículos aéreos não tripulados (VANTs), que capturam informações detalhadas sobre o solo, clima, saúde das plantas e presença de pragas e doenças. Arquiteturas avançadas de *deep learning*, como redes neurais convolucionais (CNNs), possibilitam a análise dessas imagens e dados em tempo real, permitindo a detecção precoce de problemas e a otimização dos processos produtivos, o que contribui para a redução de custos e minimização dos impactos ambientais (Ferreira, 2023). A tecnologia permite, por exemplo, a previsão precisa do rendimento das safras ao monitorar a germinação e a saúde das sementes, ajustando os insumos necessários para alcançar os objetivos produtivos desejados. Isso reduz o desperdício de recursos como água, fertilizantes e defensivos agrícolas, promovendo uma agricultura mais sustentável e eficiente. Além disso, a IA facilita o manejo integrado de pragas e doenças ao identificar rapidamente focos de infestação e recomendar intervenções específicas, diminuindo o uso indiscriminado de agroquímicos e seus efeitos negativos no meio ambiente (Ferreira, 2023).

Outro avanço significativo proporcionado pela IA é a automação de tarefas agrícolas por meio de máquinas e robôs autônomos que realizam plantio, pulverização e colheita com alta precisão, ajustando suas ações conforme as condições do campo e dados coletados em tempo real. Essa automação não só aumenta a eficiência operacional, mas também reduz a dependência da mão de obra, que enfrenta desafios demográficos e de qualificação no meio rural. A integração de sistemas de gerenciamento agrícola baseados em IA, que combinam redes

neurais, aprendizado supervisionado e métodos dinâmicos, permite aos agricultores tomarem decisões mais informadas e precisas, otimizando a produtividade e a lucratividade das propriedades, além de promover a sustentabilidade ao minimizar o impacto ambiental (Ferreira, 2023).

Comparativamente, a agricultura tradicional depende em grande parte da experiência empírica e da observação manual, processos que são lentos, sujeitos a erros e limitados em escala. Em contraste, a agricultura digital apoiada por IA oferece monitoramento contínuo e detalhado de grandes áreas, com capacidade para analisar variáveis complexas como temperatura, umidade do solo, condições climáticas e estado fitossanitário das plantas em tempo real. Isso possibilita uma agricultura de precisão que ajusta insumos e práticas agrícolas conforme as necessidades específicas de cada área, aumentando a eficiência do uso dos recursos naturais e melhorando a segurança alimentar global (Ferreira, 2023).

Além das aplicações operacionais, a IA também contribui para a criação de bancos de dados públicos e compartilhados, que facilitam a disseminação de melhores práticas e a inovação contínua no setor agrícola. Essa troca de informações pode beneficiar especialmente pequenos e médios produtores, que muitas vezes enfrentam barreiras para acessar tecnologias avançadas, promovendo uma democratização do conhecimento e tecnologias agrícolas. Atualmente, o campo produtivo já é considerado o maior provedor de dados para a tomada de decisões nas empresas rurais, sendo que a agricultura 4.0 opera sob o paradigma da *big data* (Ferreira, 2023).

Com base no artigo *Mapping Paddy Fields Using Satellite Images and Machine Learning to Identify High Temperature-Induced Sterility in Nankoku, Japan* (2025), a técnica baseada em IA utiliza imagens de satélite em conjunto com algoritmos de aprendizado de máquina para mapear e prever a ocorrência de esterilidade em arrozais causada por altas temperaturas. O processo começa com a coleta de dados de campo, onde a taxa de esterilidade das plantas é medida em diferentes áreas e períodos. Paralelamente, imagens de satélite dessas mesmas áreas são adquiridas, permitindo a análise de características espectrais das plantações, como variações na refletância das folhas em diferentes comprimentos de onda (por exemplo, vermelho e infravermelho próximo), que estão diretamente relacionadas ao estado de saúde e desenvolvimento das plantas (Hashimoto *et al.*, 2025). O passo seguinte envolve a construção de um modelo preditivo utilizando técnicas de aprendizado de máquina, especificamente o algoritmo Random Forest. Esse algoritmo é capaz de lidar com grandes volumes de dados e identificar padrões complexos ao combinar múltiplas “árvores de decisão” para melhorar a precisão da previsão. No contexto do estudo, variáveis explicativas como o índice de vegetação

por diferença normalizada (NDVI) e a taxa de mudança na refletância durante fases críticas do desenvolvimento do arroz foram usadas como entradas para o modelo. O modelo foi treinado com os dados coletados em campo e, uma vez validado, aplicado a imagens de satélite de toda a região para estimar a taxa de esterilidade em cada campo de arroz (Hashimoto *et al.*, 2025). Para um leigo, isso significa que, em vez de depender apenas de visitas presenciais e medições manuais, os pesquisadores podem agora enxergar grandes áreas agrícolas do espaço e, com o auxílio da IA interpretar automaticamente quais regiões estão mais suscetíveis a perdas devido ao calor excessivo. O uso de imagens de satélite permite monitorar centenas de quilômetros quadrados de forma rápida e não invasiva, enquanto a IA transforma os dados brutos em informações práticas sobre riscos e produtividade. O resultado é um mapa detalhado que mostra, em tempo quase real, quais áreas precisam de atenção ou possíveis intervenções (Hashimoto *et al.*, 2025).

Comparando com técnicas tradicionais sem IA, os benefícios são claros: métodos convencionais dependem de amostragens pontuais e inspeções manuais, que são trabalhosas, demoradas e limitadas em escala. Já a abordagem com IA e sensoriamento remoto oferece maior precisão, eficiência e abrangência, além de permitir análises históricas e previsões futuras. Isso facilita a tomada de decisão por parte de agricultores e gestores públicos, otimizando recursos, reduzindo perdas e contribuindo para a segurança alimentar em um cenário de mudanças climáticas (Hashimoto *et al.*, 2025).

A técnica de pulverização agrícola com drones, conforme detalhado no artigo, utiliza veículos aéreos não tripulados (VANTs) equipados com sistemas automatizados de aplicação de defensivos e sensores para monitoramento preciso dos parâmetros operacionais. O drone DJI Agras T10¹⁴, por exemplo, possui tanques de pulverização, bombas de pressão controlada e radares que possibilitam voos estáveis mesmo em terrenos acidentados. A operação é programada para seguir rotas e alturas específicas, enquanto sensores e sistemas de controle ajustam automaticamente o fluxo de aplicação de acordo com o volume desejado, sem necessidade de intervenção manual durante o voo. Isso garante maior precisão na distribuição do produto sobre a lavoura, minimizando falhas e sobreposições (Alves *et al.*, 2025).

¹⁴ <https://www.dji.com/br/t10>

Figura 16: VANT DJI Agras T10



Fonte: DJI (2025)

O uso de drones permite ajustar automaticamente e com precisão como, onde e quanto produto é aplicado, graças ao controle digital dos parâmetros de voo e pulverização. Diferentemente dos métodos tradicionais, que dependem de tratores ou aviões tripulados e ajustes manuais, o sistema automatizado dos drones reduz erros humanos, diminui o desperdício de insumos e permite operar em áreas de difícil acesso, como terrenos alagados ou de topografia irregular. Além disso, os drones minimizam o contato direto do operador com produtos químicos, aumentando a segurança no campo (Alves *et al.*, 2025). Comparando com técnicas convencionais sem IA ou automação, os benefícios do uso de drones são notáveis: maior uniformidade na aplicação, redução do consumo de água e defensivos, menor impacto ambiental e operacional, e possibilidade de atuação em áreas onde máquinas terrestres não conseguem operar¹. A automação e o monitoramento em tempo real proporcionam tomadas de decisão mais rápidas e precisas, otimizando recursos e contribuindo para uma agricultura mais sustentável e eficiente (Alves *et al.*, 2025).

Embora a IA tem transformado o setor da agricultura ao proporcionar maior eficiência no uso dos recursos, aumentando a produtividade e reduzindo o desperdício o paradoxo também se revela neste setor. O processamento e análise desses dados demandam uma infraestrutura digital intensiva em consumo energético, envolvendo *data centers*, redes de comunicação e dispositivos eletrônicos, que frequentemente dependem de energia proveniente de fontes fósseis. O aumento crescente na adoção de IA na agricultura está aumentando essa demanda. Além disso, o ciclo de produção dos equipamentos tecnológicos, sua manutenção e descarte

também geram impactos ambientais significativos. Assim, embora a IA potencialize uma agricultura mais eficiente, em termos práticos, ela implica uma maior pressão sobre recursos naturais energéticos, evidenciando o desafio de conciliar inovação tecnológica com sustentabilidade ambiental plena.

3.4 Projetos de preservação ambiental

A IA também pode contribuir na área da preservação ambiental. Sua capacidade de processar grandes volumes de dados e identificar padrões complexos permite o desenvolvimento de soluções inovadoras para monitoramento, conservação e gestão sustentável dos recursos naturais. A seguir, foram apresentados exemplos publicados em artigos científicos que ilustram a diversidade e o potencial transformador da IA na defesa do meio ambiente.

O Projeto Curupira utiliza a detecção de sons como um dos principais mecanismos para identificar ameaças à floresta amazônica, especialmente atividades ilegais de desmatamento. O sistema é equipado com sensores acústicos inteligentes, capazes de captar sons característicos de maquinários utilizados na derrubada de árvores, como motosserras e tratores. Esses sons são considerados anômalos no ambiente natural da floresta, o que facilita sua identificação pelo sistema. A tecnologia empregada no Curupira utiliza IA treinada especificamente para reconhecer padrões sonoros associados ao desmatamento. O dispositivo ignora os sons naturais do ambiente e foca apenas nos ruídos previamente selecionados pela equipe de desenvolvimento, como o barulho de uma serra-elétrica. Assim que esse som é detectado, o sistema emite um alerta em tempo real, informando imediatamente as autoridades ou operadores do monitoramento sobre a possível ocorrência de crime ambiental (Matos, 2025).

Os sensores são instalados em rede, com cada unidade podendo se comunicar com outras a até um quilômetro de distância. Após a detecção do som suspeito, os dados são transmitidos por radiofrequência para um roteador central, que pode estar a até 15 quilômetros de distância, e, em seguida, enviados para análise em um programa de computador. Essa arquitetura permite uma cobertura eficiente e em tempo real de grandes áreas da floresta, superando limitações de comunicação típicas do ambiente amazônico. Além da identificação de sons de desmatamento, o Curupira está em processo de expansão para reconhecer outros sinais de ameaça, como focos de fumaça e vibrações, ampliando ainda mais sua capacidade de alerta precoce. O desenvolvimento dessa solução representa um avanço importante na integração de tecnologia de ponta com estratégias de conservação ambiental na Amazônia (Matos, 2025).

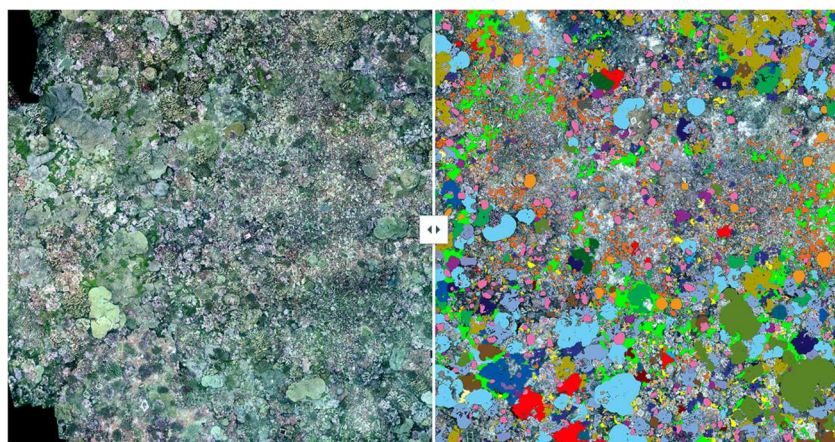
Figura 17: Projeto curupira



Fonte: Gato Junior/Rede Amazônica (2025)

O Laboratório SANDIM (*Sustainable AI for Natural Disaster and Climate Impact Modeling*), da University of California, San Diego (UCSD) aplica técnicas avançadas de IA para acelerar a análise de dados ambientais, melhorar previsões climáticas e otimizar respostas a desastres naturais, contribuindo decisivamente para a mitigação dos impactos ambientais (Bock, 2023). Sua produção de pesquisa é rica atuando em diferentes vertentes.

Figura 18: Demonstração de gêneros de corais anotados com *machine learning*



Fonte: Palmyra Atoll (Site FR3, 2014)

Um exemplo do uso da IA no SANDIM envolve o monitoramento dos recifes de corais. Inicialmente, os pesquisadores realizavam o rastreamento manual de corais a partir de imagens subaquáticas coletadas em levantamentos locais, interpretando visualmente as imagens para identificar espécies e avaliar a saúde dos ecossistemas. Contudo, com quase um milhão de corais distribuídos por cerca de 100 ilhas, o volume de dados tornou-se impraticável para análise manual. Para resolver esse gargalo, o laboratório desenvolveu ferramentas assistidas por IA baseadas em visão computacional e aprendizado profundo (*deep learning*), capazes de extrair automaticamente informações relevantes das imagens, como a identificação de espécies, cobertura e sinais de branqueamento. Essa automação acelerou significativamente o fluxo de trabalho dos pesquisadores, permitindo análises em escala antes inviável e facilitando descobertas científicas mais rápidas e precisas (Bock, 2023). Outra aplicação técnica importante é o desenvolvimento de modelos híbridos que combinam aprendizado de máquina com leis físicas para melhorar a previsão climática. Tradicionalmente, modelos climáticos baseiam-se em equações físicas complexas que demandam alto poder computacional e apresentam limitações na resolução temporal e espacial. O SANDIM utiliza redes neurais profundas que incorporam restrições físicas para evitar previsões inconsistentes — um problema conhecido como “alucinação” dos modelos de IA. Por exemplo, ao prever o degelo do *permafrost* no Ártico, essas redes conseguem reduzir a janela temporal das previsões de décadas para meses, aumentando a precisão e a utilidade das informações para formulação de políticas públicas e respostas emergenciais (Bock, 2023). Além disso, o laboratório aplica IA para monitorar o aquecimento dos oceanos. Utilizando dados geoespaciais de satélites e sensores oceânicos, algoritmos de aprendizado profundo analisam o conteúdo de calor na camada superior dos oceanos, um indicador crítico do aquecimento global. A IA permite quantificar e interpretar as incertezas associadas a esses dados, entregando previsões mais confiáveis sobre o impacto do aquecimento oceânico nos padrões climáticos globais (Bock, 2023).

Outra vertente do trabalho do SANDIM é a otimização da integração de energias renováveis na rede elétrica. Por meio de modelos preditivos baseados em aprendizado de máquina, o laboratório antecipa a disponibilidade de energia solar e eólica, considerando variáveis meteorológicas em tempo real. Essa previsão aprimorada permite que operadores de redes ajustem a oferta energética para atender à demanda, minimizando desperdícios e reduzindo emissões de gases de efeito estufa. Técnicas como redes neurais recorrentes (RNN) e modelos probabilísticos são empregadas para capturar a dinâmica temporal e a variabilidade inerente às fontes renováveis (Bock, 2023).

O investimento em IA no contexto climático, como realizado pelo SANDIM, é crucial para acelerar a ciência e a ação climática. O processamento eficiente de grandes volumes de dados ambientais, aliado à capacidade de gerar previsões precisas em escalas temporais e espaciais relevantes, capacita decisores políticos, cientistas e gestores a implementar estratégias mais eficazes de mitigação e adaptação. Por outro lado, o laboratório enfatiza a necessidade de equilibrar o avanço tecnológico com a sustentabilidade ambiental, uma vez que os sistemas de IA demandam grande capacidade computacional e, conseqüentemente, consumo energético elevado. Assim, o financiamento contínuo é fundamental não apenas para ampliar a infraestrutura computacional, mas também para desenvolver algoritmos mais eficientes e sustentáveis (Bock, 2023).

A integração da IA no Laboratório SANDIM representa uma revolução na ciência climática, permitindo que tarefas antes manuais e demoradas sejam automatizadas com precisão, enquanto modelos híbridos garantem rigor científico e previsões confiáveis. Essa sinergia entre inteligência humana e artificial potencializa a capacidade global de enfrentar a crise climática com rapidez e eficácia (Bock, 2023).

3.5 Eficiência energética

A aplicação da IA na busca pela eficiência energética tem se mostrado uma estratégia promissora, especialmente no contexto de edificações públicas, que representam entre 30% e 45% da demanda mundial de energia elétrica, com destaque para o consumo em sistemas de iluminação e climatização. A crescente urbanização e a necessidade de sustentabilidade impulsionam o desenvolvimento de soluções inteligentes para o uso racional da energia, reduzindo custos operacionais e impactos ambientais (Justino *et al.*, 2020). Sistemas inteligentes podem ajustar automaticamente a iluminação e a climatização com base na ocupação e nas condições ambientais, reduzindo significativamente o consumo energético. A IA também pode ser utilizada para prever padrões de consumo, identificar anomalias e sugerir medidas corretivas em tempo real. Isso se traduz em maior eficiência operacional e na possibilidade de manutenção preditiva, evitando falhas e otimizando o desempenho dos equipamentos. O uso de IA em prédios inteligentes, ou smart buildings, destaca-se como uma tendência global, com avanços significativos em países como China, Estados Unidos e nações europeias, que lideram publicações e patentes na área (Matos *et al.*, 2020).

No Brasil, políticas públicas e programas como o Procel e a Lei de Eficiência Energética (Lei n. 10.295/2001) incentivam o desenvolvimento e a adoção de tecnologias

voltadas à eficiência energética, sendo a um dos pilares para atingir metas de sustentabilidade e racionalização do consumo. A integração entre políticas, inovação tecnológica e automação baseada em IA representa um caminho viável para a redução do desperdício energético e para o atendimento das demandas atuais e futuras de energia. Portanto, a IA contribui para a eficiência energética ao proporcionar automação inteligente, otimização do uso de recursos, previsão de demandas e suporte à tomada de decisão em tempo real, consolidando-se como ferramenta fundamental para a gestão energética sustentável em edifícios públicos e demais setores consumidores de energia (Matos, 2020).

3.6 Monitoramento e mitigação de desastres

A IA é uma peça fundamental no monitoramento e mitigação de desastres naturais pois integra dados de sensores, imagens de satélite, informações meteorológicas e sociais para antecipar eventos extremos com maior precisão e antecedência. Arquiteturas de redes neurais profundas como redes neurais convolucionais, analisam padrões climáticos e ambientais para identificar riscos, como incêndios florestais, inundações e deslizamentos, possibilitando alertas precoces que salvam vidas e minimizam danos materiais. (uniformizar: sugiro adotar o termo em português – redes neurais profundas – ao longo da dissertação, e não *deep learning*) A IA também otimiza a logística de emergência ao priorizar regiões vulneráveis e orientar equipes de resgate com uso de drones e robótica, além de possibilitar o monitoramento contínuo de infraestruturas críticas. Essa capacidade adaptativa e de processamento em tempo real supera limitações dos métodos tradicionais, tornando a resposta a desastres naturais mais eficiente e resiliente diante das mudanças climáticas globais.

Um exemplo do uso da IA no monitoramento de terremotos é o aplicativo (App) chamada UrbanDenoiser, desenvolvido por pesquisadores de Stanford para superar um grande desafio nas zonas urbanas: o ruído causado pelas vibrações da cidade, como tráfego e máquinas, que atrapalha os sensores sísmicos tradicionais. Esse App usa técnicas avançadas de *deep learning* para filtrar esses ruídos urbanos e destacar as verdadeiras vibrações que indicam abalos sísmicos, aumentando a qualidade dos sinais captados e permitindo detectar terremotos que antes passavam despercebidos. Com essa tecnologia, cidades em áreas de risco, como Cidade do México e Tóquio, podem aprimorar seu monitoramento sísmico, facilitando a identificação rápida de tremores e aumentando a resiliência comunitária. Além disso, o algoritmo acelera o processo de análise dos dados sísmicos, auxiliando os sismólogos a reduzir o volume de informações e agir mais rapidamente em emergências.

Na conclusão deste capítulo que delimitou o paradoxo sustentável da IA é que o que está em jogo, são as próprias "regras do jogo", ou seja, a regulação e o responsabilidade dos reguladores. Definir os limites, responsabilidades e diretrizes que permitirão como essa tecnologia será desenvolvida e utilizada de modo a impulsionar tanto o progresso econômico quanto a sustentabilidade ambiental e social.

4. PILARES ESTRUTURAIS PARA UMA IA SUSTENTÁVEL

Ao longo desta dissertação, explorou-se dois tópicos principais: o primeiro referiu-se aos elementos que compõe o paradoxo sustentável da IA. O segundo abordou, através das diretrizes do referencial teórico pesquisado, os caminhos possíveis para integrar princípios sustentáveis ao ciclo de vida dos sistemas de IA, desde sua concepção até a implementação. Assim, através da pesquisa documental realizada e explorada nesta dissertação pôde-se identificar o aparente *gap* de fortalecimento de dois pilares estruturais: (1) regulamentação e governança e (2) interdisciplinaridade e transdisciplinaridade. Esses elementos se mostraram indispensáveis para garantir que o avanço tecnológico ocorra alinhado a compromissos éticos e ambientais globais, promovendo práticas responsáveis e conscientes.

Este capítulo buscou resumir a seguir o significado e a importância desses dois pilares, não com a pretensão de estabelecer todas as ações necessárias, mas explorar, com base nos artigos analisados, as razões pelas quais esses pilares devem ser fortalecidos.

4.1 Regulamentação e governança

A questão da regulamentação é central. O direito é o instrumento que pode garantir a delimitação dos benefícios e riscos da IA e estabelecer regras claras para seu desenvolvimento e uso responsável. Por se tratar de uma tecnologia de propósito geral e em constante evolução, o entendimento completo sobre todos os seus benefícios e riscos só será possível à medida que novas experiências e aplicações surgirem, o que exige uma governança flexível e adaptativa. (Zavaglia, 2025).

Neste sentido, constatou-se que o EU AI Act, considerada pioneira na regulação da IA, avançou em temas como segurança, ética e transparência, mas praticamente não abordou de maneira direta a sustentabilidade ambiental (Hacker, 2023). Aspectos como o consumo energético e o uso de recursos hídricos por grandes modelos de IA aparecem apenas de forma abrangente, priorizando mecanismos voluntários como códigos de conduta e rótulos verdes

(*green labels*)¹⁵ (Hacker, 2023). Mesmo diante de propostas do Parlamento Europeu para fortalecer princípios de sustentabilidade, prevaleceram medidas de transparência e recomendações não obrigatórias. Para que a IA seja sustentável é necessário ir além da simples divulgação de informações ambientais, incorporar critérios ambientais desde a concepção dos sistemas (“*sustainability by design*”) e integrar a regulação da IA com instrumentos ambientais já existentes, como o sistema de comércio de emissões e a diretiva de recursos hídricos. Sem essa integração, o avanço tecnológico pode ocorrer desalinhado dos compromissos ambientais europeus (Hacker, 2023).

No Brasil, o Projeto de Lei 2338/2023 estabelece em suas normas gerais a sustentabilidade como um dos fundamentos para o desenvolvimento, implementação e uso de sistemas de inteligência artificial, conforme previsto no Artigo 2º, inciso IV: “a proteção ao meio ambiente e o desenvolvimento sustentável”. Contudo, o projeto não prevê medidas explícitas de divulgação pública referentes ao consumo de água, emissão de GEE ou uso energético dos sistemas de inteligência artificial, limitando-se a diretrizes gerais de sustentabilidade sem obrigatoriedade formal de transparência sobre esses aspectos (Senado Federal, 2023). Essas políticas devem abarcar mecanismos que garantem a orientação, o controle e a responsabilização nas tomadas de decisão, especialmente em contextos complexos como o da IA. Isso envolve a definição de normas, diretrizes e estruturas institucionais que asseguram transparência, participação social, equidade e conformidade ética e legal ao longo de todo o ciclo de vida tecnológico. A transparência, defendida pelos especialistas, é um instrumento estratégico para a construção de um ambiente tecnológico mais sustentável.

Kaufman (2024) afirma que um caminho eficaz para aplicar a regulação é por meio de agências reguladoras setoriais — como Anatel, Anac, Aneel, Ancine, ANS e Anvisa — pois essas entidades já possuem expertise específica nos setores diretamente impactados pela IA. A governança setorial possibilita uma regulação mais precisa, contextualizada e eficiente, evitando a criação de normas genéricas que poderiam inibir a inovação ou não atender às particularidades de cada área. Além disso, a governança setorial facilita a adaptação das políticas públicas conforme a tecnologia avança.

Nos Estados Unidos, a regulação da IA, a princípio, seguiu uma abordagem semelhante, com ênfase na coordenação entre diferentes agências federais especializadas, como por exemplo, a *Federal Trade Commission* (FTC), a *Food and Drug Administration* (FDA) e o

¹⁵ Rótulos verdes (ou “*green labels*”, em inglês) são certificações, selos ou identificações voluntárias atribuídas a produtos, serviços ou tecnologias que atendem a determinados critérios de sustentabilidade ambiental.

Department of Transportation (DOT), que supervisionam setores específicos onde a IA é aplicada. A governança setorial permite que as normas sejam ajustadas às características técnicas e riscos particulares de cada área. Estudos acadêmicos indicaram que essa abordagem setorial nos EUA facilita a rápida adaptação das regulamentações diante do avanço tecnológico, ao mesmo tempo em que busca mitigar riscos éticos, de segurança e privacidade associados (Fiuza, 2024). No entanto, em 2025, o governo Trump mudou a abordagem da regulação da IA e priorizou medidas como a revogação de políticas consideradas barreiras à inovação, a simplificação dos processos regulatórios para acelerar a introdução de novas soluções no mercado, e a flexibilização de regras ambientais para facilitar a expansão da infraestrutura tecnológica, como *data centers*, além do combate a vieses ideológicos em grandes modelos de linguagem. Essas medidas refletem a prioridade dada à liberdade de inovação e à competitividade global americana, em detrimento de regulações setoriais tradicionais mais rígida (Aarbitx, 2025). Embora o governo federal tenha imposto restrições, os estados americanos têm promulgado legislações sobre o desenvolvimento e o uso da IA nos seus respectivos territórios.

Destaca-se, sobretudo, o papel das organizações para a efetividade da regulação da IA, uma vez que a governança corporativa — atuando como mecanismo orquestrador — integra a gestão de riscos e a conformidade regulatória (Zavaglia, 2025). Os riscos variam conforme a aplicação e podem mudar ao longo do tempo; por isso, devem ser identificados desde a criação da solução e constantemente monitorados.

A governança corporativa proporciona práticas, políticas e processos que garantem que a IA seja desenvolvida e aplicada com princípios baseados em ética, transparência e alinhada aos objetivos estratégicos institucionais. Assim, a inclusão dessas pautas nas agendas dos órgãos de governança das companhias que desenvolvem ou utilizam IA assegura o compromisso organizacional com seu desenvolvimento sustentável (Zavaglia, 2025). Assim, é possível mitigar riscos, além de promover a inovação responsável, aumentar a confiança dos *stakeholders* e gerar impactos positivos para a sociedade.

4.2 Interdisciplinaridade e Transdisciplinaridade

Uma barreira a ser enfrentada é a falta de interdisciplinaridade e transdisciplinaridade, consequência da lacuna significativa na formação e no entendimento entre, por um lado, especialistas das ciências humanas e sociais e, por outro lado, especialistas das

ciências naturais e da engenharia, tanto dentro quanto fora da academia: especialistas com formação em ciências humanas precisam se conscientizar da importância de pensar sobre as novas tecnologias, como a IA, e adquirir conhecimento básico dessas tecnologias e do que elas fazem. Por outro lado, cientistas e engenheiros precisam ser mais sensíveis aos aspectos éticos e sociais do desenvolvimento e uso da IA (Kaufman, 2023, p. 155).

Transdisciplinaridade na IA envolve a integração de conhecimentos provenientes de áreas como ciência da computação, estatística, filosofia, psicologia, direito, ética e ciências ambientais, com o objetivo de enfrentar de maneira holística os desafios relacionados a vieses algorítmicos, transparência e sustentabilidade. Mais do que a atuação paralela de especialistas, a transdisciplinaridade promove o diálogo entre diferentes formas de saber — acadêmicas e não acadêmicas — para cocriar princípios, métodos e soluções que transcendam as fronteiras tradicionais das disciplinas. Psicólogos, por exemplo, não apenas identificam vieses cognitivos, mas colaboram com filósofos, cientistas e engenheiros na formulação de abordagens éticas e tecnicamente viáveis. A construção de sistemas de IA sustentáveis, nesse contexto, exige a convergência e a síntese de perspectivas técnicas, sociais, culturais e ambientais. Essa abordagem integrada permite compreender e antecipar os impactos diretos e indiretos da IA favorecendo decisões mais conscientes, inclusivas e responsáveis.

Já a interdisciplinaridade integra esses saberes para criar sistemas inovadores. Na saúde, equipes multidisciplinares (médicos, engenheiros, cientistas de dados) desenvolvem tecnologia de diagnóstico preditivo que reduzem custos e melhoram a eficiência energética em hospitais. Coeckelbergh (2020) afirma que existe uma lacuna de entendimento entre pessoas das humanidades e das ciências naturais e engenharias, o que dificulta o desenvolvimento de uma ética eficaz para a IA. Ele afirma que “se realmente queremos ter alta tecnologia ética, como uma IA ética, precisamos aproximar essas pessoas e esses mundos, mais cedo do que tarde” (Coeckelbergh, 2020). Se engenheiros aprendem a trabalhar com textos e pessoas das humanidades aprendem a trabalhar com computadores, há mais esperança para uma ética e políticas tecnológicas que funcionem na prática. Essa integração entre áreas é o caminho para uma ética da IA que seja ao mesmo tempo tecnicamente sólida e socialmente relevante, capaz de enfrentar os desafios complexos que a IA impõe à sociedade contemporânea (Coeckelbergh, 2020).

Conceitos como “*ethics by design*”, “*sustainability by design*” e “*privacy by design*” emergiram como abordagens que orientam a concepção e o desenvolvimento dos sistemas de IA desde suas etapas iniciais, incorporando critérios ambientais, éticos e de

privacidade como elementos centrais do processo. Levar em conta as implicações éticas do uso de dados pessoais e os impactos sociais em áreas sensíveis à sociedade, como trabalho, saúde e educação, e contemplar desde o início do desenvolvimento do sistema de IA as questões éticas, para tal pressupõe a formação de equipes de desenvolvedores multidisciplinares, diversificadas cognitivamente (Kaufman, 2022). Essa perspectiva implica que a sustentabilidade não deve ser uma preocupação posterior ou acessória, mas sim um princípio estruturante que permeia o design, a implementação e a operação dos algoritmos e infraestruturas de IA. A adoção do *sustainability by design* contribui para a mitigação do consumo energético excessivo, a redução do uso de recursos naturais e a minimização dos impactos ambientais associados ao ciclo de vida das tecnologias de IA.

Somente por meio da colaboração entre os campos é possível desenvolver soluções inovadoras e equilibradas, que considerem os múltiplos aspectos envolvidos na sustentabilidade da IA. A interdisciplinaridade é, assim, um caminho essencial para a construção de um futuro no qual a IA possa contribuir efetivamente para o desenvolvimento sustentável. Futuras pesquisas devem aprofundar a mensuração dos impactos ambientais da IA e a criação de métricas padronizadas, fortalecendo a base para decisões conscientes e responsáveis no campo da IA.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Coeckelbergh (2020) destaca que os debates sobre IA refletem divergências sobre a natureza humana e conceitos como mente, consciência e criatividade, envolvendo diversas disciplinas como filosofia, ciência da computação e psicologia. Tanto filósofos quanto cientistas buscam entender esses fenômenos, considerando também o impacto das mudanças tecnológicas na vida social, econômica e cultural, reconhecendo que a tecnologia é sempre inserida em um contexto social e humano. A IA não é apenas sobre tecnologia, mas igualmente sobre o que os humanos fazem com ela, como a usam, como a percebem e experimentam, e como a inserem em ambientes técnico-sociais mais amplos. Coeckelbergh sugere pensar a ética, que diz respeito às decisões humanas, em uma perspectiva histórica e sociocultural (Kaufman, 2023, p. 153).

As empresas tendem a adotar soluções baseadas em IA para aumentar a eficiência de seus processos e reduzir custos, mas essa é apenas uma parte da equação. A expansão da IA está impulsionada também pela criação contínua de novos mercados. Conforme abordado nesta dissertação, o paradoxo sustentável da IA pode ser superado, desde que haja uma combinação estratégica de investimentos e iniciativas focadas na minimização dos impactos ambientais.

Essa transição não ocorre espontaneamente; depende de infraestruturas energeticamente eficientes, da integração da IA em redes inteligentes e da governança que priorize a eficiência energética e a adoção de energias limpas (Melguizo *et al.*, 2025). Assim, o avanço tecnológico deve ser acompanhado por uma gestão cuidadosa que minimize o impacto ambiental e permita que a IA contribua positivamente para a sustentabilidade global.

Mhlanga (2025) destaca que, embora a IA promova ganhos significativos em eficiência operacional nos setores de transporte, energia e manufatura, esses avanços podem ser neutralizados por um efeito rebote, que acarreta que a redução no consumo por unidade acaba impulsionando um aumento no consumo total de recursos. Nesse contexto, a dimensão cultural assume papel central para mitigar esse fenômeno, pois a simples inovação tecnológica não é suficiente para garantir a sustentabilidade. Mhlanga (2025) enfatiza que a transformação cultural deve envolver a conscientização e o engajamento dos consumidores e das comunidades para que adotem práticas de consumo mais responsáveis e reconheça os impactos ambientais de suas escolhas e resistindo à lógica do consumo crescente que caracteriza o sistema capitalista.

A conscientização se dá através do amplo debate e educação. É necessário refletir sobre a lógica que orienta a vida em sociedade, marcada muitas vezes pela incessante busca por acumulação material, obsolescência, desperdício, descarte e pela valorização do ter, estar e parecer em detrimento do ser. Essa condição impõe desafios que ultrapassam a simples adoção de tecnologias mais eficientes ou a implementação de políticas públicas.

Santaella (2023) identifica impasses ecológicos, tecno científicos, macro, geo e micropolíticos, comunicacionais e socio psíquicos na contemporaneidade, destacando a evidente idolatria ao consumo, a poluição, a destruição do meio ambiente e a extinção de inúmeras espécies. Além disso, aponta as falhas na correção das injustiças globais e a negligência dos valores humanos e espirituais, mostrando que o crescimento da inteligência coletiva não necessariamente resulta em maior sabedoria.

No contexto do Antropoceno, a ideia da construção da identidade humana contribui para refletir sobre o papel do ser humano no desenvolvimento da IA. Para Charles Taylor (1997), a identidade refere-se à autodefinição do indivíduo, ou seja, à compreensão de como ela é construída no diálogo com seus valores morais e seu ambiente social e cultural. Essa identidade é moralmente orientada e se forma através do reconhecimento e da interação comunitária, sendo um processo dinâmico e contínuo de autointerpretação. Isso implica que as decisões tecnológicas estão enraizadas nas formas de vida e nos sistemas de significado, não sendo meramente técnicas nem apenas políticas. De certo modo, cada indivíduo pode ser ator

na determinação dos rumos que a IA tomará, como por exemplo através de hábitos e consumo. Comportamentos de consumo se chocam com sustentabilidade. Na interseção entre cultura, ética e tecnologia, desenha-se o paradoxo sustentável da IA: o desafio de desenvolver sistemas inteligentes que potencializem o progresso sem comprometer os limites ambientais e sociais do planeta.

Nesse sentido, a responsabilidade humana vai além da simples criação de máquinas e regulamentação; ela reside na capacidade de construir coletivamente uma cultura que oriente a IA para caminhos que promovam a sustentabilidade diante das transformações do Antropoceno (Coeckelbergh, 2020).

Que possibilite ao homem discussão corajosa de sua problemática. De sua inserção nesta problemática. Que o coloque em diálogo constante com o outro. Que o predisponha a constantes revisões. À análise crítica de seus achados (Freire, 2003, p. 38).

A compreensão de uma educação transformadora condiciona a desvendar sempre novas alternativas factíveis de proporcionar o incremento de uma cultura educacional, para além dos contextos escolares. Isto se converte em um aspecto determinante de cultura de educação para a vida e, em especial, para lidar com a degradação do ambiente global que clama pela sustentabilidade (Marujo, 2019). A cultura sustentável, busca educar e engajar os consumidores sobre os limites ambientais e a importância da preservação dos recursos naturais, cria um ambiente propício para que as tecnologias de IA sejam utilizadas de forma responsável e alinhada a objetivos ambientais.

O avanço sustentável da IA depende de um compromisso integrado entre regulação flexível, governança setorial eficiente, e a promoção de uma cultura interdisciplinar que valorize dimensões éticas, sociais e ambientais. O fortalecimento do diálogo entre áreas do conhecimento, aliado à educação crítica e à conscientização pública, é fundamento para transformar hábitos e práticas, e mitiga externalidades negativas associadas à tecnologia. Dessa forma, a construção de um ambiente favorável à inovação responsável exige políticas públicas adaptativas, padrões claros de transparência e o engajamento coletivo para que a IA possa efetivamente contribuir para um desenvolvimento justo, equilibrado e ambientalmente sustentável (Coeckelbergh, 2020; Kaufman, 2022). É necessário governar, regular e controlar o uso da IA para alinhá-la com os valores da democracia e da equidade (Kaufman, 2025).

O paradoxo sustentável da IA, mostra que os desafios humanos permanecem enraizados ao longo da história. O humano continua no centro de tensões conhecidas como por exemplo, guerras — incluindo a corrida armamentista de drones, na qual a IA foi perfeitamente integrada à tecnologia militar, tecido que se desenvolve há várias décadas e serve como espinha dorsal para avanços que vão desde armas autônomas até mísseis de cruzeiro inteligentes, disputas por recursos e lutas por poder (Oniani, 2024). Apesar das inovações tecnológicas, a IA traz consigo tensões e conflitos, considerando que o ser humano enquanto *animal político*¹⁶, está naturalmente inserido em uma dinâmica social marcada por disputas.

A separação entre natureza e sociedade, definida por Latour (2001) como um dos fundamentos da modernidade, pode limitar a eficácia na gestão das mudanças climáticas, dificultando a superação do paradoxo sustentável da IA, na medida em que desloca questões simultaneamente técnicas, ambientais e sociais para fora dos espaços tradicionais de deliberação política. Se fenômenos dessa ordem são tratados ora como fatos puramente técnicos, ora como externalidades naturais, eles podem escapar a definições mais precisas e a decisões coletivamente assumidas, permanecendo em uma zona de indeterminação. Nesse sentido, a sustentabilidade da IA se apresenta como um objeto em disputa, cuja formulação depende da capacidade institucional de articular ciência, técnica e política. Trata-se, portanto, de um campo aberto de problematização, no qual a questão da sustentabilidade da IA é uma questão política em permanente composição.

¹⁶ “não menos estranho seria fazer do homem feliz um solitário, pois ninguém escolheria a posse do mundo inteiro sob a condição de viver só, já que o homem é um ser político e está em sua natureza o viver em sociedade. Por isso, mesmo o homem bom viverá em companhia de outros, visto possuir ele as coisas que são boas por natureza (Aristóteles, 1973, IX, 9, 1169 b 18/20).”

REFERÊNCIAS

- ALVES, Raí Fernandes Queiroz. et al. Comparison of Volumetric Distribution in Drone Spraying Considering Height, Application Volume, and Nozzle Type. *AgriEngineering*, Basel, v. 7, n. 4, p. 123, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriengineering7040123>. Acesso em: 23 jun. 2025.
- ANDREWS, Edmund. AI's carbon footprint problem. Stanford Doerr School of Sustainability, 7 fev. 2020. Disponível em: <https://sustainability.stanford.edu/news/ais-carbon-footprint-problem>. Acesso em: 23 jun. 2025.
- ARBIX, Glauco *et al.* Cadernos vale a pena Perguntar: IA e meio ambiente. São Paulo: Fundação FHC, 2025.
- ARCHER, David; RAHMSTORE, Stefan. *The Climate Crisis: An Introductory Guide to Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.
- BANGALORE, Srinu et al. Investing in the rising data center economy. McKinsey & Company, 2023. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/industries/technology-media-and-telecommunications/our-insights/investing-in-the-rising-data-center-economy>. Acesso em: 5 jun. 2025.
- BARRINGER, Felicity. Thirsty for power and water, AI-crunching data centers sprout across the West. & the West, Stanford University, 2025. Disponível em: <https://andthewest.stanford.edu/2025/thirsty-for-power-and-water-ai-crunching-data-centers-sprout-across-the-west/>. Acesso em: 2 jun. 2025.
- BARTHOLOMEU, André Brandolin. A revolução da IA na saúde: impacto, oportunidades e desafios pelo mundo. *Revista Qualidade HC*, 2024.
- BOCK, Sara. THE AI revolution is upon us—and UC San Diego researchers are using it to inform climate action. *UC San Diego Today*, 2023. Disponível em: <https://today.ucsd.edu/story/the-ai-revolution-climate-action>. Acesso em: 22 jun. 2025.
- CAVALCANTE, Bruna Giovanna Amaral. Acesso à justiça e a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. *Anais do Congresso Brasileiro de Processo Coletivo e Cidadania*, n. 11, p. 919-938, out. 2023. Disponível em: <https://revistas.unaerp.br/cbpcc/article/download/3180/2324/10358>.
- CHEN, Michael. O que é latência de dados? Um guia por especialistas. Oracle, 13 maio 2024. Disponível em: <https://www.oracle.com/br/data-latency/>. Acesso em: 27 set. 2025.
- COECKELBERGH, Mark. *AI ethics*, Cambridge, MA: The MIT Press, 2020.
- COFFAY, Matthew; BOCKEN, Nancy. Sustainable by design: An organizational design tool for sustainable business model innovation. *Journal of Cleaner Production*, v. 427, p. 139294, 2023

COPERNICUS, November 2023 – Remarkable year continues, with warmest boreal autumn. 2023 will be the warmest year on record Disponível em: <https://climate.copernicus.eu/copernicus-november-2023-remarkable-year-continues-warmest-boreal-autumn-2023-will-be-warmest-year> Acesso em: 8 de dezembro de 2023.

CRONIN, T., Dwyer, G., Farmer, J. et al. Deep Arctic Ocean warming during the last glacial cycle. *Nature Geosci* 5, 631–634 (2012). <https://doi.org/10.1038/ngeo1557>

DIAS, Sabrina Melchíades. Cidades inteligentes e as políticas públicas de adaptação às mudanças climáticas: uma análise de quatro cidades latino-americanas em perspectiva comparada. 2024. 211 f. Dissertação (Mestrado em Relações Internacionais) – Instituto de Relações Internacionais, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2024. Disponível em: <https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/attachments/67590779/ce8e3369-db3e-4aef-b7d4-86b116b45271/79.pdf>. Acesso em: 21 jun. 2025.

ERCAN, *et al.* Life cycle assessment of a smartphone. *Journal of Cleaner Production*, v. 127, p. 101–115, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.091> Acesso em: 09 dez. 2025.

IBM. O que é um Data Center de IA? 2025. Disponível em: <https://www.ibm.com/br-pt/think/topics/ai-data-center>. Acesso em: 31 ago. 2025.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. Global energy review 2020: global energy and CO₂ emissions in 2020. Paris: IEA, 2020. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2020/global-energy-and-co2-emissions-in-2020>. Acesso em: 2 jun. 2025.

FAGUNDES, Eduardo. CRITÉRIOS ESTRATÉGICOS PARA INVESTIMENTO E OPERAÇÃO DE DATA CENTERS. Efagundes, 2025. Disponível em: <https://efagundes.com/blog/planejar-data-center/>. Acesso em: 26 set. 2025.

FERRARI, Vanessa. Inteligência Artificial: um paradoxo ambiental? *Cadernos Jurídicos*, São Paulo, v. 24, n. 65, p. 201-212, jan./mar. 2023.

FERREIRA, Ednaldo José et al. IA e ciência de dados para o desenvolvimento da agricultura inteligente. In: MARÇAL, Alexandre Ribeiro et al. (org.). *Agricultura de precisão: um novo olhar na era digital*. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2023. p. 43-68. Disponível em: <https://doi.org/10.4322/978-65-86819-38-0.1000071>. Acesso em: 21 jun. 2025.

FIUZA Bueno, Eric; FONSECA Santos, Marcelo. IA: desafios para regulação jurídica.. *Direito & TI*, [S. l.], v. 1, n. 18, p. 112–139, 2024.

FLORIDI, Luciano. What the near future of artificial intelligence could be. *Philosophy & technology*, v. 32, n. 1, p. 1–15, Mar. 2019.

FREIRE, Paulo. *Educação e atualidade brasileira*. 3. ed. São Paulo: Cortez – Instituto Paulo Freire. 2003.

GOODSON, Kenneth. STANFORD UNIVERSITY. Feasibility study of an evaporative cooling (with water recovery) for energy efficient and sustainable operation of edge data centers. Stanford Sustainability Accelerator, 2025. Disponível em: <https://sustainability-accelerator.stanford.edu/feasibility-study-evaporative-cooling-water-recovery-energy-efficient-and-sustainable-operation-0>. Acesso em: 07 set. 2025.

GOOGLE. Environmental Report 2023. Disponível em: <https://www.gstatic.com/gumdrop/sustainability/google-2023-environmental-report.pdf>. Acesso em: 21 set. 2025.

GOVERNO FEDERAL. Medida Provisória n. 1.318, de 2025. Institui o Regime Especial de Tributação para Serviços de Data Center (Redata) e dispõe sobre incentivos fiscais e sustentabilidade ambiental. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2025.

CONGRESSO NACIONAL. Projeto de Lei n. 3.018, de 2024. Dispõe sobre a regulamentação dos data centers de inteligência artificial no Brasil. Brasília, DF, 2024. Disponível em: [endereço eletrônico se disponível]. Acesso em: 27 set. 2025.

HACKER, Philip. Sustainable AI Regulations. 2023.

HADDAD, Eduardo Amaral et al. Impactos econômicos das mudanças climáticas no Brasil. [s.l.], 2011. Disponível em: https://people.ufpr.br/~jrgarcia/macroeconomia_ecologica/macroeconomia_ecologica/Impactos%20economicos%20das%20mudancas%20climaticas%20no%20Brasil.pdf. Acesso em: 2 jun. 2025.

HASHIMOTO, Naoyuki; YAMADA, Haruki; MATSUOKA, Shiho. Mapping Paddy Fields Using Satellite Images and Machine Learning to Identify High Temperature-Induced Sterility in Nankoku, Japan. *AgriEngineering*, Basel, v. 7, n. 4, p. 122, 2025. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/agriengineering7040122>. Acesso em: 23 jun. 2025.

HUGONNET et al., R., Accelerated global glacier mass loss in the early twenty-first century. *Nature*, 592(7856), 726–731. 2021. <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03436z>.

JONES, Nicola. How the World Passed a Carbon Threshold and Why It Matters, 2017. Disponível em: <https://e360.yale.edu/features/how-the-world-passed-a-carbon-threshold-400ppm-and-why-it-matters>. Acesso em: 30 de setembro de 2023.

JUSTINO, Marcelo Pereira *et al.* Perspectiva de Uso da Inteligência Artificial (IA) para a Eficiência Energética em Prédios Públicos. *Cadernos de Prospecção*, 2020. 13(3), 769-782. <https://doi.org/10.9771/cp.v13i3.33079>

CRAWFORD, Kate. Atlas of AI, London: Yale University Press, 2021.

KAUFMAN, Dora. Filosofia Unisinos Logic and foundations of artificial intelligence and society's reactions to maximize benefits and mitigate harm, 2023.

KAUFMAN, Dora. Desmistificando a IA. São Paulo: Autêntica Editora, 2022.

KAUFMAN, Dora. Resenha de Ética na IA, de Mark Coeckelbergh. TECCOGS – Revista Digital de Tecnologias Cognitivas, n. 28, 2023, p. 151-155.

KAUFMAN, Dora. IA: impactos sociais e éticos. Entrevista concedida a Heitor Shimizu. FCW Cultura Científica, Fundação Conrado Wessel, 23 jan. 2023.

KAUFMAN, Dora. Soberania digital do Brasil em risco. Rio de Janeiro: GESEL - UFRJ, 22 maio 2025. Disponível em: <https://gesel.ie.ufrj.br/wp-content/uploads/2025/05/Artigo-Dora-Kaufman-22.05.2025.pdf>. Acesso em: 26 set. 2025.

LATOUR, Bruno. Políticas da Natureza: Como associar as ciências à democracia, Editora Unesp, São Paulo, 2001.

LI, Peng *et.al.* Making AI Less Thirsty: Uncovering and Addressing the Secret Water Footprint of AI Models. UC Riverside, 2025. Disponível em: <https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/attachments/67590779/19370d3f-169a-4dbd-a240-a3253686ae1e/2.Making-AI-Less-Thirsty-Uncovering-and-Addressing-the.pdf>. Acesso em: 17 jun. 2025.

MARGULIS, Sergio; DUBEUX, Carolina Burle Schmidt. Economia da Mudança do Clima no Brasil: Custos e Oportunidades. São Paulo, 2010. Disponível em: https://www.iis-rio.org/wp-content/uploads/2019/10/Economia_do_clima.pdf. Acesso em: 07 set. 2025.

MARUJO, Marcelo Pereira. Sustentabilidade: cultura necessária na contemporaneidade. Fluxos & Riscos, v. 5, p. 81-97, 2019. DOI: <http://doi.org/10.31750/fr1801a05>. Disponível em: <https://revistas.ulusofona.pt/index.php/fluxoseriscos/article/view/7298/4311>. Acesso em: 27 set. 2025.

MATOS, Thais. REVISTA CENARIUM. ‘Projeto Curupira’ usa tecnologia a serviço da preservação no Amazonas, 2025. Disponível em: <https://revistacenarium.com.br/projeto-curupira-usa-tecnologia-a-servico-da-preservacao-no-amazonas/>. Acesso em: 22 jun. 2025.

MELGUIZO, Angel *et al.* Can AI grow green? Evidence of an inverted-U curve between AI, energy use and emissions. Oxford: Technology, Industrialisation and Development (TIDE) Centre, University of Oxford, 2025.

MHLANGA, David. AI Beyond Efficiency, Navigating the Rebound Effect in AI-Driven Sustainable Development. Frontiers in Energy Research, [S.l.], v. 13, p. 1-26, 2025.

MICROSOFT. 2024 Environmental Sustainability Report. [S.l.], 2024. Disponível em: <https://cdn-dynmedia-1.microsoft.com/is/content/microsoftcorp/microsoft/msc/documents/presentations/CSR/Microsoft-2024-Environmental-Sustainability-Report.pdf>. Acesso em: 21 set. 2025.

MINISTÉRIO DA FAZENDA, Medida Provisória nº 1.318, de 17 de setembro de 2025. Altera a Lei nº 11.196, de 21 de novembro de 2005, para instituir o Regime Especial de

Tributação para Serviços de Datacenter – REDATA, e a Lei nº 15.211, de 17 de setembro de 2025. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 18 set. 2025.

NVIDIA. GPU NVIDIA H200 Tensor Core - Turbinando cargas de trabalho de IA e HPC. Disponível em: <https://www.nvidia.com/pt-br/data-center/h200/>. Acesso em: 27 set. 2025.

OLEXA, Jocko. The Power Play on AI Data Centers. Morgan Stanley, 2024. Disponível em: https://advisor.morganstanley.com/jocko.olexa/documents/field/j/jo/jocko-olexa--cfp/AlphacurrentsThe_Power_Play_on_AI_Data_Centers.pdf

OLIARI, Reinaldo; SOARES, Daniele. Entenda as normas IFRS S1 e IFRS S2. Deloitte Brasil, 04 out. 2024. Disponível em: <https://www.deloitte.com/br/pt/services/audit-assurance/perspectives/normas-sustentabilidade-fatores-climaticos.html>. Acesso em: 7 set. 2025.

OLIVEIRA, Cyntia Barbosa. Racismo algorítmico e inteligência artificial: a discriminação nos sistemas de videomonitoramento. Em Tese, Florianópolis, v. 22, p. 1-20, 2025. Disponível em: <https://periodicos.ufsc.br/index.php/emtese/article/download/105023/59298/413807>. Acesso em: 27 set. 2025.

ONIANI, David, et al.. Adopting and expanding ethical principles for generative artificial intelligence from military to healthcare. npj Digital Medicine, Londres, v. 7, n. 1, p. 45, 2024. ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). “Crise climática também é uma crise de saúde”, afirma chefe da OMS. UN News, 7 dez. 2023. Disponível em: <https://news.un.org/pt/story/2023/12/1824307>. Acesso em: 5 set. 2025.

PAULO, Paula Paiva. TUVALU: conheça o país que pode ser engolido pelo mar e que tenta sobreviver como nação digital. G1, 08 dez. 2023. Disponível em: <https://g1.globo.com/meio-ambiente/noticia/2023/12/08/tuvalu-conheca-o-pais-que-pode-ser-engolido-pelo-mar-e-que-tenta-sobreviver-como-nacao-digital.ghtml>. Acesso em: 06 set. 2025.

PROSKE, *et al.* Obsolescence of electronics — the example of smartphones. The International Journal of Life Cycle Assessment, v. 21, n. 7, p. 1016–1026, 2016. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-0909-4>. Acesso em: 06 set. 2025.

RAGAGNIN, Marília Nagata. Efeitos de estressores múltiplos no impacto da acidificação oceânica na biota marinha. 2017. Dissertação (Mestrado em Oceanografia Biológica) - Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017. doi:10.11606/D.21.2018.tde-13032018-155525. Acesso em: 2025-05-27.

REN, Shaolei. How much water does AI consume? The public deserves to know. OECD.AI. Disponível em: <https://oecd.ai/en/wonk/how-much-water-does-ai-consume>. Acesso em: 27 set. 2025.

ROCHA, Julio Cesar de Sá da. Título: O que é sustentabilidade - 2ª edição revisada e ampliada - Belo Horizonte - Editora Expert – 2023

RODRIGUES, Bernardo Salgado, & Padula, Raphael. LITHIUM GEOPOLITICS IN THE 21ST CENTURY. AUSTRAL: Brazilian Journal of Strategy & International Relations, 6(11), 2022. <https://doi.org/10.22456/2238-6912.66687>

ROLNICK, D. et al. Tackling Climate Change with Machine Learning. ACM Computing Surveys, v. 55, n. 2, Artigo 42, p. 1-96, fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1145/3485128>. Acesso em: 22 jun. 2025.

ROMM, Joseph. Climate Change: What Everyone Needs to Know. Third Edition. Oxford University Press, New York, N.Y. 2022 ISBN 978-0-1976-4713-4.

ROSALSKY, Greg. Why the AI world is suddenly obsessed with a 160-year-old economics paradox. Planet Money, NPR, 4 fev. 2025. Disponível em: <https://www.npr.org/sections/planet-money/2025/02/04/g-s1-46018/ai-deepseek-economics-jevons-paradox>. Acesso em: 25 set. 2025.

SANTAELLA, Lucia. Neo-humano: A Sétima Revolução Cognitiva do Sapiens. São Paulo: Paulus; 1ª edição 2023

SANTAELLA, Lúcia. Inteligência artificial e cultura: oportunidades e desafios para o Sul Global. Inteligência Artificial e cultura: perspectivas para a diversidade cultural na era digital. Montevideu: UNESCO, 2021. ISBN 9786586949728.

SENADO FEDERAL. Projeto de Lei nº 2338/2023. Dispõe sobre o uso da Inteligência Artificial, 2023.
Link: <https://www25.senado.leg.br/web/atividade/materias/-/materia/157233>

SEREC, Letícia De Conti. TRANSPARÊNCIA NA IA: MECANISMOS DE ENFRENTAMENTO NOS PROJETOS DE REGULAÇÃO DA EUROPA E DO BRASIL. São Paulo. PUC-SP. 2023.

SIGURJONSSON, Throstur Olaf, & WENDT, Stefan, S. (2025). The role of artificial intelligence in supporting sustainability in the food industry: Insights from Iceland. In M. Pazarskis, A. Kostyuk, V. Santolamazza, & P. Capuano (Eds.), Corporate governance: Scholarly research and practice (pp. 51–56). Virtus Interpress. DOI: 10.22495/cgsrapp9

SILVA, Tatiane. A QUESTÃO SOCIOAMBIENTAL E SEUS SIGNIFICADOS NO SERVIÇO SOCIAL, Revista Goitacá, v. 3, n. 2, p. 1-22, jul-dez/ 2024

SILVA, Erika Gislene da. A Inteligência Artificial e a Competição Global pela Hegemonia entre as Grandes Potências: China e Estados Unidos. REVISTA DE GEOPOLÍTICA. v. 15, n. 2, 2024. Disponível em: <https://revistageo.com.br/revista/issue/view/40>. Acesso em: 25 set. 2025.

SOUZA, Ana. Impactos ambientais da extração de lítio no Deserto do Atacama. 2023. Relatório Técnico.

STACCIARINI, João Henrique Santana; GONÇALVES, Ricardo Junior de Assis Fernandes. Data Centers, Minerais Críticos, Energia e Geopolítica: as bases da IA. *Sociedade & Natureza*, Uberlândia, MG, v. 37, e77215, 2025. DOI: 10.14393/SN-v37-2025-77215. Disponível em: [arquivo fornecido]. Acesso em: 2 set. 2025.

STEIN, Amy Lee., Artificial Intelligence and Climate Change. *Yale Journal on Regulation*, Vol. 37, No. 890, 2020, University of Florida Levin College of Law Research Paper No. 20-39, Disponível em: <https://ssrn.com/abstract=3665760>

STERN, N. *The Economics of Climate Change – the Stern Review*. Cambridge: Cambridge University Press. 2007.

TAYLOR, Charles. *As fontes do self – A construção da identidade moderna.*, Tradução Adail UBIRAJARA Sobral e Dinah de Azevedo de Abreu). São Paulo: Edições Loyola, 1997

UNITED NATIONS ENVIRONMENT PROGRAMME. Artificial Intelligence (AI) end-to-end: The Environmental Impact of the Full AI Lifecycle Needs to be Comprehensively Assessed – Issue. 2024. Note. <https://wedocs.unep.org/20.500.11822/46288>.

VIEIRA, Suhelen Araújo; OLIVEIRA, João Paulo Leonardo de. Cidades inteligentes – práticas e indicadores adotados no âmbito internacional. *Revista De Gestão E Secretariado*, 2023. 14(11), 20641–20661. <https://doi.org/10.7769/gesec.v14i11.3028>

VINUESA, R. et al., The role of artificial intelligence in achieving the sustainable development goals. *Nature Communications*, 11(1):233. 2020.

WEBELEMENTS. Lithium - 3Li: historical information. *WebElements*, [s.l.], 2025. Disponível em: <https://www.webelements.com/lithium/history.html>. Acesso em: 25 jun. 2025.

WMO (WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION). WMO confirms 2024 as warmest year on record at about 1.55°C above pre-industrial level. 10 jan. 2025. Disponível em: <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level>. Acesso em: 2 jun. 2025.

WU, Siegfried Zhiqiang.. Beyond Smart City: The AI City is Coming. In: *The AI City. The Urban Book Series*. Springer, Singapore, 2025. https://doi.org/10.1007/978-981-96-2560-4_2

ZAVAGLIA, Alexandre Coelho. *Governança Corporativa como elemento estruturantes da gestão de riscos e conformidade legal da inteligência legal*. São Paulo. PUC-SP. 2025.

ZHANG, Liren *et.al.* Energy-efficient wildlife monitoring using AI at the edge of network. In: QIAO, Daji; ZHANG, Fengwei (eds.). *Energy-efficient edge computing for the IoT*. Cham: Springer, 2023. p. 61-79. Disponível em: https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-031-81920-9_4. Acesso em: 27 set. 2025.