

Meio ambiente digital: datacenters subaquáticos como solução para a vingança de Gaia?

Digital environment: underwater data centers as a solution to Gaia's revenge?

Gustavo Abrahão dos Santos
UNIP-Santos/BR

Resumo

Este trabalho analisa a sustentabilidade do meio ambiente digital frente ao aquecimento global, investigando a viabilidade dos *datacenters* subaquáticos como estratégia de mitigação do impacto térmico. A investigação fundamenta-se na Teoria de Gaia, de James Lovelock, interpretando o planeta como um organismo autorregulado que reage a agressões antropogênicas, como o calor residual de servidores. Através de revisão bibliográfica, discute-se a "materialidade da nuvem", evidenciando que a infraestrutura de IA e *Big Data* demanda consumo energético massivo e resfriamento ininterrupto. Os resultados, baseados no Projeto Natick (Microsoft) e na expansão comercial na China (Hainan), demonstram que, embora a imersão oceânica ofereça ecoeficiência e redução de carbono, ela institui o risco da poluição térmica marinha. Conclui-se que a governança do mundo virtual deve submeter-se aos limites físicos de Gaia, exigindo que a inovação tecnológica internalize as externalidades ambientais para garantir a sustentabilidade multidimensional e a preservação dos sistemas vitais da biosfera.

Palavras-chave: meio ambiente digital; *datacenters* subaquáticos; vingança de Gaia; sustentabilidade multidimensional; poluição térmica.

Abstract

This work analyzes the sustainability of the digital environment in the face of global warming, investigating the viability of underwater data centers as a strategy for mitigating thermal impact. The investigation is based on James Lovelock's Gaia Theory, interpreting the planet as a self-regulating organism that reacts to anthropogenic aggressions, such as the residual heat from servers. Through a literature review, the "materiality of the cloud" is discussed, highlighting that AI and Big Data infrastructure demands massive energy consumption and uninterrupted cooling. The results, based on Project Natick (Microsoft) and commercial expansion in China (Hainan), demonstrate that, although ocean immersion offers eco-efficiency and carbon reduction, it introduces the risk of marine thermal pollution. It concludes that the governance of the virtual world must submit to the physical limits of Gaia, requiring technological innovation to internalize environmental externalities to ensure multidimensional sustainability and the preservation of vital biosphere systems.

Keywords: digital environment; underwater data centers; Gaia's revenge; multidimensional sustainability; thermal pollution.



1. INTRODUÇÃO

A digitalização da vida contemporânea estabeleceu uma nova dimensão ecológica: o meio ambiente digital. Embora a percepção do usuário médio sobre a "nuvem" sugira uma natureza imaterial, ela possui uma materialidade densa e geográfica, composta por vastos complexos de servidores que demandam refrigeração ininterrupta e consumo energético massivo. Diante da crise climática global, surge o paradoxo da infraestrutura digital: a ferramenta que impulsiona o progresso humano é, simultaneamente, um vetor de pressão sobre o sistema biofísico da Terra.

A justificativa deste estudo reside na urgência de conciliar a expansão tecnológica com os limites da biosfera. À medida que o processamento de dados cresce exponencialmente, a dissipação de calor torna-se um desafio térmico e ambiental. A investigação fundamenta-se na Teoria de Gaia, de James Lovelock, que interpreta o planeta como um organismo autorregulado capaz de reagir a agressões antropogênicas. Assim, a questão norteadora desta pesquisa busca compreender: em que medida a instalação de datacenters submersos representa uma solução frente à "Vingança de Gaia" ou apenas uma transferência de externalidades negativas para o ecossistema marinho?

O objetivo geral desta pesquisa é analisar a sustentabilidade do meio ambiente digital frente ao aquecimento global, investigando especificamente a viabilidade dos datacenters submersos como estratégia de mitigação do impacto térmico. Para tanto, busca-se compreender a relação entre o hardware e o metabolismo terrestre, avaliando os riscos de poluição térmica decorrentes do resfriamento passivo pelas águas profundas.

A metodologia adotada consiste em uma revisão bibliográfica de caráter qualitativo, com forte rigor acadêmico, estruturada a partir do diálogo entre a ecologia profunda, o Direito Ambiental Digital e a gestão de infraestruturas tecnológicas. O estudo delimita-se à análise das consequências biofísicas e regulatórias dessa transição para o leito oceânico.

Espera-se, com este trabalho, oferecer uma contribuição relevante tanto para o mundo acadêmico quanto para a sociedade, ao demonstrar que a harmonia com o metabolismo da Terra exige uma governança de dados que integre a proteção ambiental ao desenvolvimento digital. O estudo conclui que, embora a inovação subaquática reduza a pegada de carbono, ela demanda vigilância ética e técnica para evitar que novas reações defensivas da biosfera sejam desencadeadas.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. Ontologia de gaia e a materialidade do meio ambiente digital

James Lovelock, cientista do Reino Unido, apresentou ao mundo sua tese sobre a vida na Terra em 1979, por meio do livro intitulado "Gaia: Um Novo Olhar sobre a Vida na Terra".

Para Lovelock (1987), Gaia¹ é um sistema biológico autorregulado que mantém a homeostase planetária, mas que hoje reage agressivamente aos excessos humanos. O conceito de que a Terra funciona como um organismo vivo e autossuficiente é conhecido como Teoria de Gaia. Elaborada pelo cientista Lovelock, (1987) essa tese sugere que a vida não apenas habita o planeta, mas gerencia ativamente seus sistemas ambientais para garantir a própria sobrevivência.

A vulnerabilidade crítica do sistema terrestre exige que as políticas ecológicas sejam pautadas pelo princípio da cautela imediata, que de acordo com Lovelock (2010):

A geofisiologia vê os organismos da Terra evoluindo por meio da seleção natural darwiniana num ambiente que é o produto de seus ancestrais, e não simplesmente uma consequência da história geológica da Terra. Logo, o oxigênio da atmosfera é quase integralmente o produto dos organismos fotossintéticos, e sem ele não haveria animais nem invertebrados nem queimaríamos combustíveis, lançando dióxido de carbono no ar. Acho surpreendente que os biólogos tenham levado tanto tempo, mesmo que de má vontade, para reconhecer que os organismos se adaptaram não ao mundo estático, cômodo mas erroneamente descrito por seus colegas geólogos, mas a um mundo dinâmico construído pelos próprios organismos.

Devemos pensar em Gaia como o sistema completo, incluindo partes animadas e inanimadas. O crescimento e a expansão das formas de vida que promovem a luz solar fortalecem Gaia, mas é uma forma de salvação e caótica de poder que se fortalece por uma série de limitações que, por sua vez, moldam esta entidade que se autorregula pelo bem da vida (Lovelock e Lantero, 2024, p. 6 - 7).

A "vingança de Gaia" manifesta-se no meio ambiente digital através do calor residual de servidores, pois, como adverte Lovelock (2010 p. 15): "Gaia está se ajustando para um novo estado de calor, um estado em que a maioria de nós e nossos descendentes não terá lugar".

A transposição do conceito de autorregulação biológica para o campo tecnológico evidencia-se na adoção de sistemas de monitoramento institucional. Como exemplo dessa

¹ O nome da teoria foi sugerido pelo escritor britânico William Golding (1911- 1993), amigo de Lovelock, e é o nome da Deusa da mitologia grega Gaia ou Geia, a personificação da Terra, que representa o elemento primordial do qual saíram as raças divinas. Nasceu depois do Caos (personificação da vida primordial, anterior à criação) e antes de Eros (Deus do amor). Sem o auxílio de nenhum elemento masculino, engendrou o Céu (Urano), as Montanhas e o Mar. Os antigos gregos consideravam que Gaia possuía o segredo dos destinos. (Cruz; Borba e Abreu, 2005).

correlação, a Universidade de São Paulo (USP) implementou o Sistema de Gestão Ambiental Institucional e Acadêmica (Gaia), cujo acrônimo remete à concepção de equilíbrio planetário. Segundo o Jornal da USP (2023), a ferramenta visa centralizar o controle de atividades ambientais, operando inicialmente com um módulo voltado ao gerenciamento de substâncias laboratoriais sob a égide da Superintendência de Gestão Ambiental (SGA).

Conforme aponta a superintendente de Gestão Ambiental da USP, Patrícia Iglecias (citada por Sitnik, 2023), a plataforma unifica o registro de insumos químicos, o que otimiza a transparência e a rastreabilidade dos processos. Segundo a gestora, essa conformidade (*compliance*) é estratégica para elevar o prestígio da instituição em rankings globais de sustentabilidade.

A implementação do sistema Gaia na USP ilustra como os sistemas de gestão ambiental padronizados em dados configuram uma espécie de nuvem imaterial de governança. Ao converter o ciclo físico de produtos químicos em fluxos digitais, a plataforma promove uma desmaterialização do controle.

Logo, a nuvem imaterial revela-se um vetor de pressão térmica que desafia o equilíbrio metabólico da Terra, pois, conforme observa Mosco (2014, p. 74): *A nuvem é uma solução de engenharia para o problema de gerenciar a explosão de dados, mas ela impõe um custo físico real", transformando bits em emissões de carbono e calor sensível.*

3.1 A Teoria de Gaia e a homeostase sob pressão no meio ambiente digital

A fundamentação deste estudo repousa na Teoria de Gaia, proposta por Lovelock, (1987) que define a Terra não como um amontoado de rochas e gases, mas como um sistema holístico e autorregulado. Segundo esta perspectiva, os organismos vivos e seu ambiente inorgânico evoluem como uma unidade funcional única para manter as condições físicas e químicas adequadas à vida. Neste passo, a sensibilidade desse equilíbrio é advertida por Lovelock (2010, p. 22):

Gaia como um sistema, tem o objetivo de manter a habitabilidade. Quando a atividade de uma espécie — a humana — interfere massivamente nos ciclos de carbono e calor, o sistema reage para buscar um novo ponto de equilíbrio, muitas vezes hostil aos seus perturbadores.

A compreensão deste equilíbrio exige a definição precisa do espaço onde tais interações ocorrem. O meio ambiente digital é compreendido como um desdobramento do meio ambiente artificial, sendo este o conjunto de bens e elementos edificados ou alterados pela atividade humana. Nesse sentido, Fiorillo (2021, p. 114) conceitua que:

O meio ambiente digital nada mais é do que o patrimônio informacional estruturado por meio de suporte magnético, óptico ou congênere, que permite a interação entre indivíduos em uma realidade virtual.

Meio ambiente digital: datacenters no fundo do oceano como solução para a vingança de Gaia?

Portanto, embora a interação ocorra no campo intangível da informação, sua sustentação depende diretamente de uma base física — o hardware — que consome recursos naturais e desafia a capacidade de resiliência do planeta.

Neste contexto, essa interferência manifesta-se na demanda energética invisível. A "nuvem", termo que sugere etereidade, é, na verdade, uma vasta rede de hardwares que operam como órgãos exógenos ao sistema natural, consumindo recursos e dissipando calor residual diretamente na biosfera.

3.2. A Vingança de Gaia e a materialidade dos servidores

A transição da Teoria para a Vingança de Gaia ocorre quando os mecanismos de autorregulação (*feedbacks* positivos) aceleram o aquecimento global em resposta aos abusos antropogênicos. A infraestrutura de dados, operando 24 horas por dia para sustentar Inteligências Artificiais e o *Big Data*, atua como um catalisador desse processo.

Embora o usuário perceba apenas o bit, o planeta sofre o impacto do átomo. A imensa quantidade de servidores utiliza recursos naturais — água para resfriamento e minerais raros para componentes — de forma predatória.

Sobre essa materialidade oculta, Mosco (2014) argumenta que a computação em nuvem é o estágio final da industrialização da informação, e neste sentido, afirma Mocos (2014, p. 74): "A nuvem é uma solução de engenharia para o problema de gerenciar a explosão de dados, mas ela impõe um custo físico real. Cada data center é um consumidor voraz de eletricidade e um produtor de calor que Gaia não consegue mais dissipar sem alterar seu clima."

Embora a gestão ambiental contemporânea se apresente como uma camada de dados digitalizada, Lovelock, (2010) em sua obra *A vingança de Gaia*, alerta que as respostas do sistema planetário às intervenções humanas são físicas e, muitas vezes, severas. Ao transpor essa visão para a tecnologia da informação, observa-se uma dicotomia: a 'nuvem' de dados, embora imaterial em sua função lógica, possui uma materialidade incontornável nos centros de processamento.

Frisa-se que a manutenção dessa infraestrutura de servidores demanda um consumo energético massivo e sistemas de resfriamento que impactam diretamente os recursos hídricos e térmicos de Gaia, evidenciando que a busca pela sustentabilidade digital não está isenta das leis biofísicas de autorregulação descritas pelo autor.

Gustavo Abrahão dos Santos

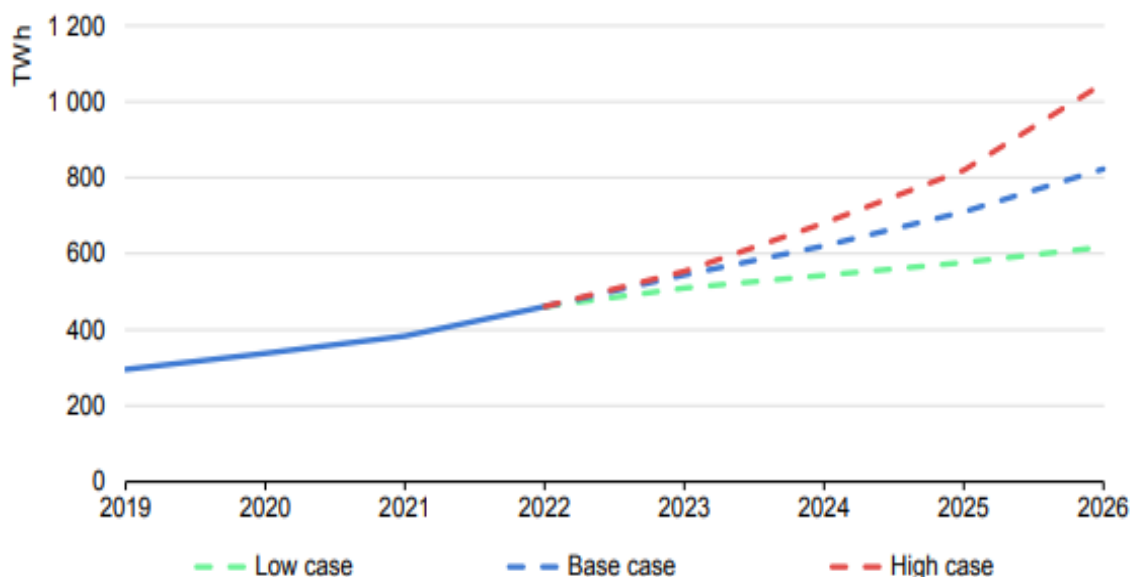
Estima-se que esses centros de processamento já consomem entre 1% e 1,5% da eletricidade global, com projeções de crescimento acelerado devido à demanda por Inteligência Artificial (Hintemann; Hinterholzer, 2022, p. 7).

Embora o consumo global estivesse entre 1% e 1,5% em 2022, dados recentes indicam que a demanda energética de *data centers* pode dobrar até 2026 (IEA, 2024, p. 31), conforme os estudos do Relatório Eletricidade 2024: Análise e previsão até 2026, como se observa abaixo:

As tendências futuras do setor de data centers são complexas de se prever, visto que os avanços tecnológicos e os serviços digitais evoluem rapidamente. Dependendo do ritmo de implementação, da gama de melhorias de eficiência, bem como das tendências de inteligência artificial e criptomoedas, esperamos que o consumo global de eletricidade de data centers, criptomoedas e inteligência artificial varie entre 620 e 1.050 TWh em 2026, com nosso cenário base de demanda em pouco mais de 800 TWh – um aumento em relação aos 460 TWh em 2022. Isso corresponde a um aumento de 160 TWh a 590 TWh na demanda de eletricidade em 2026 em comparação com 2022, o que equivale aproximadamente a adicionar pelo menos uma Suécia ou, no máximo, uma Alemanha (IEA, 2024, p. 31).

E ainda, valioso para a compreensão do mencionado relatório é a o Gráfico 1, a seguir, retirada da fonte da Agência de Eletricidade Internacional (2024, p. 31):

Gráfico 1 - Demanda global de eletricidade proveniente de data centers, IA e criptomoedas, 2019-2026
Global electricity demand from data centres, AI, and cryptocurrencies, 2019-2026



Fonte: IEA. CC BY 4.0.

Enfim, esse crescimento exponencial com gasto energético, reforça a urgência de uma governança digital que harmonize a expansão da IA com a capacidade de suporte energética do planeta.

3.3. Datacenters subaquáticos: adaptação ou transferência de dano?

Lovelock (2010), em seu trabalho argumenta que o sistema terrestre atingiu um ponto de inflexão onde as medidas paliativas de conservação podem ser insuficientes frente à aceleração do aquecimento global. Essa visão de urgência encontra um paralelo crítico na materialidade da infraestrutura digital contemporânea: a pegada de carbono da Tecnologia da Informação.

Um exemplo contundente dessa intersecção são os *datacenters* subaquáticos, projetados para utilizar a inércia térmica dos oceanos como sistema de resfriamento. Embora apresentados como soluções de eficiência energética, tais estruturas exemplificam o que Lovelock define como a transferência de estresse térmico para o ecossistema marinho, evidenciando que a tentativa de desmaterializar a gestão ambiental em uma nuvem de dados permanece inexoravelmente ligada ao metabolismo biofísico do planeta.

A proposta de instalar datacenters no leito oceânico surge como uma tentativa de "biomimetismo tecnológico", utilizando o oceano como um dissipador térmico gigante. No entanto, a governança ambiental questiona se essa medida não seria uma nova faceta da agressão ao metabolismo terrestre.

Neste passo, segundo estudos sobre infraestruturas críticas realizadas por Smith (2021, p. 112): "O resfriamento passivo subaquático reduz a pegada de carbono direta, mas introduz a variável da poluição térmica marinha. Estamos movendo o calor da atmosfera para a hidrosfera, sem reduzir a entropia total do sistema".

A Governança de Dados e a Governança Ambiental se interligam precisamente neste ponto: a gestão do fluxo de informação deve considerar a "dieta energética" das IAs. A manutenção de algoritmos de aprendizagem de máquina exige volumes de energia que superam o consumo de pequenas nações, tornando a sustentabilidade digital um imperativo para a sobrevivência do bioma humano dentro de Gaia.

3.4 Governança de dados e impacto climático

A integração entre o Direito Ambiental Digital e a gestão de dados busca mitigar o que Lovelock (2010), descreve como a "febre da Terra". A governança não pode mais ser apenas sobre privacidade ou segurança; ela deve ser sobre eficiência termodinâmica. Como aponta Rodotà (2011), o ambiente digital é o novo habitat humano, e sua gestão exige responsabilidade ecológica.



Afirma Rodotá (2011,p. 105):

Não há liberdade digital em um planeta em colapso. A governança do mundo virtual deve submeter-se aos limites físicos do mundo real, sob pena de tornarmos a tecnologia o instrumento de nossa própria extinção.

Conseqüentemente, a governança de dados deve transitar de uma visão puramente antropocêntrica para uma visão voltada ao equilíbrio da natureza, na qual o desenvolvimento de algoritmos e o armazenamento massivo sejam pautados pelo princípio da precaução ambiental. A regulação do meio ambiente digital passa a exigir mecanismos que vinculem a liberdade de inovação à capacidade de suporte do planeta.

Nesse contexto, se torna importante a fundamentação teórica de Teixeira (2022, p. 142): "O Direito Digital, em sua intersecção com o Direito Ambiental, impõe que a sustentabilidade não seja apenas um valor ético, mas um requisito normativo de conformidade para as infraestruturas que sustentam a sociedade da informação".

Assim, a mitigação da "febre da Terra" depende da submissão do código à lei biológica, garantindo que o progresso tecnológico não acelere o colapso dos sistemas vitais de Gaia.

3. PROCEDIMENTO METODOLÓGICO

A presente investigação adota uma abordagem qualitativa, de natureza teórica e exploratória, estruturada por meio do procedimento de revisão bibliográfica. O objetivo da escolha deste método é permitir a análise densa de conceitos multidisciplinares que conectam a termodinâmica planetária à governança de dados.

A pesquisa pauta-se no método dedutivo, partindo das premissas gerais da Teoria de Gaia para as particularidades da infraestrutura dos datacenters subaquáticos. Para garantir a validade científica do estudo, a seleção do referencial teórico seguiu critérios de relevância acadêmica e atualidade técnica.

Conforme lecionam Marconi e Lakatos (2021, p. 182): "A pesquisa bibliográfica não é mera repetição do que já foi dito ou escrito sobre certo assunto, mas o exame de um tema sob novo enfoque ou abordagem, chegando a conclusões inovadoras". Desta forma, o método busca tensionar a dicotomia entre o progresso tecnológico e o limite biofísico da Terra.

A análise documental e bibliográfica concentrou-se em três eixos principais: a ecologia sistêmica de Lovelock, (1987), a materialidade física do meio ambiente digital e as normas emergentes do Direito Ambiental Digital. Segundo Gil (2022, p. 44): "A principal vantagem

Meio ambiente digital: datacenters no fundo do oceano como solução para a vingança de Gaia?

da pesquisa bibliográfica reside no fato de permitir ao investigador a cobertura de uma gama de fenômenos muito mais ampla do que aquela que poderia pesquisar diretamente".

Assim, a metodologia aqui empregada justifica-se pela necessidade de organizar o conhecimento fragmentado sobre o impacto invisível da "nuvem", utilizando a hermenêutica jurídica e ambiental para avaliar se as soluções de engenharia, como os servidores submersos, possuem sustentação teórica no Direito e na Ecologia.

4. ANÁLISE E DISCUSSÃO

4.1. A materialidade da nuvem e a viabilidade dos datacenters subaquáticos

A percepção popular sobre a tecnologia frequentemente não mostra claramente sua robustez física, conforme analisam Stacciarini e Gonçalves (2025, p. 3):

A frequente menção à "Inteligência Artificial" no noticiário, acompanhada de termos abstratos como "Nuvem", "Big Data", "Algoritmos", "Machine Learning" e "Virtualização", pode transmitir a ideia equivocada de que essas tecnologias operam de forma imaterial, sem qualquer vínculo com infraestrutura física. Por trás dessas nomenclaturas, entretanto, encontra-se uma vasta e complexa infraestrutura, geralmente localizada em data centers.

Essas instalações são projetadas para abrigar e operar milhares de servidores organizados em racks, acompanhados por sistemas de armazenamento, dispositivos de rede, unidades de processamento, fontes de alimentação, sistemas de backup de energia, sistemas de refrigeração, sensores para monitoramento ambiental, cabos de conexão e diversos outros dispositivos essenciais (Chatterjee e Venugopal, 2023).

Logo, a análise aqui discute como a viabilidade técnica dessas unidades estarem submersas no mar, buscando mitigar a pegada de carbono, confrontando a eficiência da engenharia com os limites biofísicos de autorregulação do sistema Gaia. E assim, a investigação revela que o futuro da gestão ambiental digital depende da harmonização entre o processamento de dados e o metabolismo térmico do planeta.

4.1. Da infraestrutura terrestre ao leito oceânico

A "nuvem" digital embora percebida como imaterial, demanda uma infraestrutura física de escala monumental que impacta diretamente o metabolismo térmico do planeta. A infraestrutura da Inteligência Artificial depende de uma base material controlada majoritariamente por Pequim. Segundo dados de Areddy e Follow (2023) e Xinyue (2024), citados por Stacciarini e Gonçalves (2025), a China detém a liderança na oferta de minerais estratégicos como o gálio e o germânio, elementos vitais para o hardware que compõe a

"nuvem".

Conforme Wedy e Iglecias (2024, p. 340), o emprego exacerbado de novas tecnologias, especialmente a Inteligência Artificial (IA), exige uma capacidade computacional e uma quantidade de eletricidade massiva para manter o treinamento e a execução de algoritmos complexos.

Segundo Stacciarini e Gonçalves (2025, p. 5), atualmente existem aproximadamente 12 mil data centers em todo o mundo, o que evidencia a pressão exercida por essas instalações sobre os recursos energéticos e o espaço geográfico global.

Conforme discutido por Stacciarini e Gonçalves (2025), a definição de *datacenters* de hiperescala exige, segundo dados da IBM (Powell e Smalley, 2024), ao menos 5 mil servidores em uma área superior a 900 m². Um exemplo extremo dessa materialidade é o "The Citadel Campus" da empresa Switch, que ocupa aproximadamente 66,9 hectares (Switch, 2024 *apud* Stacciarini e Gonçalves, 2025). Esses dados corroboram a tese de que a infraestrutura da IA demanda uma escala massiva de minerais críticos e espaço geográfico.

Neste passo, percebe-se que enquanto os EUA constroem *ciudades de servidores* em Nevada (consumindo solo e energia terrestre), a China e a Microsoft tentam "esconder" e resfriar essa massa monumental debaixo d'água.

Sob a ótica do Direito dos Desastres e da Regulação Jurídica, Carvalho (2020) ressalta que a gestão de riscos na era digital deve considerar as "externalidades ambientais invisíveis" das infraestruturas tecnológicas, que operam à margem da percepção pública, mas exercem pressão real sobre os sistemas biofísicos.

Corroborando essa visão, Sarlet e Fensterseifer (2022) apontam que o dever fundamental de proteção à natureza impõe que a inovação tecnológica não ocorra de forma desvinculada dos limites ecológicos, sob pena de transformarmos a eficiência digital em um vetor de degradação climática.

E para Freitas (2012), a inovação tecnológica não pode ser avaliada apenas por sua eficiência funcional, mas deve obrigatoriamente internalizar os custos da sua pegada de carbono. A sustentabilidade é valor supremo com forme afirma (Freitas, 2012, p. 133-134):

(...) que se desdobra no princípio constitucional que determina, com eficácia direta e imediata, a responsabilidade do Estado e da sociedade pela concretização solidária do desenvolvimento material e imaterial, socialmente inclusivo, durável e equânime, ambientalmente limpo, inovador, ético e eficiente, no intuito de assegurar, preferencialmente de modo preventivo e precavido, no presente e no futuro, o direito ao bem-estar.

A integração de sistemas de dados à gestão ambiental não é apenas uma escolha técnica,

Meio ambiente digital: datacenters no fundo do oceano como solução para a vingança de Gaia?

mas um imperativo do Estado Ecológico de Direito. Conforme defendido por Sarlet e Fensterseifer (2022), a proteção do equilíbrio climático é um direito — e um dever — fundamental que deve balizar toda inovação. Essa base jurídica encontra ressonância prática na 'sustentabilidade multidimensional' de Freitas (2012), que argumenta que o direito ao futuro depende da capacidade da administração pública e das instituições em internalizar a pegada de carbono de suas infraestruturas.

Nesse sentido, o Projeto Natick da Microsoft (2026) exemplifica a busca por soluções de infraestrutura que conciliem alta disponibilidade de dados e sustentabilidade. Ao investigar a viabilidade de unidades de processamento submarinas, a iniciativa foca na eficiência térmica proporcionada pelo ambiente marinho, o que permite reduzir drasticamente o consumo energético de resfriamento. Como aponta a Microsoft (2026), essa abordagem não apenas otimiza a latência para populações costeiras, mas também propõe uma análise profunda sobre o impacto dessas estruturas no ecossistema oceânico, transformando o leito marinho em uma camada ativa da gestão ambiental digital.

4.3. O Projeto Natick e a eficiência energética subaquática

O conceito de datacenter subaquático entrou em cena na Microsoft em 2014 durante o *Think Week*, um evento que reúne funcionários para compartilhar ideias “fora da caixa”. O conceito foi considerado como uma forma com potencial de fornecer serviços em nuvem ultrarrápidos para populações costeiras e economizar energia. (Roach, 2020).

A materialização do projeto ocorreu com a implantação de um protótipo, o *Leona Philpot*, no Oceano Pacífico. Segundo dados da Microsoft (2026), a operação durou 105 dias e confirmou que a eletrônica subaquática poderia sobreviver e operar em condições de estanqueidade absoluta. Nesta fase, a pesquisa aqui utilizada como citação indireta, indica que a refrigeração passiva por troca de calor com a água do mar eliminou a necessidade de consumo de água doce, um recurso escasso em ecossistemas terrestres.

A fase mais crítica envolveu o lançamento de um datacenter do tamanho de um contêiner no Mar do Norte, conforme se verifica na Figura 2, a seguir, segundo a Microsoft (2026), Spencer Fowers, membro sênior da equipe técnica do grupo de pesquisa de projetos especiais da Microsoft, prepara o data center das Ilhas do Norte do Projeto Natick para implantação na costa das Ilhas Orkney, na Escócia. O data center está fixado a uma base triangular preenchida com lastro, que repousa no fundo do mar, conforme Figura 1, a seguir.

Figura 1. Data center das Ilhas do Norte do Projeto Natic.



Fonte: Microsoft (2026) e Foto de Scott Eklund/Red Box Pictures.

Roach (2020) relata que esta etapa incluiu parcerias com especialistas em energia renovável, pois o sistema era alimentado integralmente por redes eólicas e marés locais. A análise subsequente revelou um dado surpreendente: a taxa de falha dos servidores subaquáticos foi apenas um oitavo da registrada em centros terrestres, devido à atmosfera de nitrogênio e à ausência de interferência humana (Microsoft, 2026).

A descentralização da infraestrutura digital por meio de servidores subaquáticos apresenta-se como uma solução estratégica para a eficiência energética e a redução da latência.

De acordo com o Microsoft (2020), como metade da população mundial reside a menos de 200 km da costa, a imersão de centros de dados nessas regiões permite que o consumo de dados nas zonas costeiras locais seja atendido de forma imediata, sem sobrecarregar as redes elétricas e de transmissão urbanas de longa distância. Essa proximidade geográfica, aliada à troca de calor com o ambiente marinho, converte a infraestrutura submersa em um componente essencial para a resiliência energética das metrópoles litorâneas, harmonizando a demanda por IA com a sustentabilidade territorial.

A pesquisa do Natick não se limita à eficiência técnica. Ao correlacionar esses dados

Meio ambiente digital: datacenters no fundo do oceano como solução para a vingança de Gaia?

com a doutrina brasileira, observa-se que tal infraestrutura atende à "sustentabilidade multidimensional" de Freitas (2012), ao buscar a redução drástica da pegada de carbono. Contudo, como advertem Sarlet e Fensterseifer (2022), a ocupação do leito oceânico exige um monitoramento constante das externalidades térmicas, garantindo que o resfriamento dos servidores não resulte em um desequilíbrio para o metabolismo de Gaia, conforme o alerta clássico de Lovelock (2010).

Embora a Microsoft tenha concluído operacionalmente o Projeto Natick, o encerramento não deve ser interpretado como obsolescência tecnológica, mas como a conclusão de uma prova de conceito bem-sucedida. Conforme explica Roach (2020), a fase experimental confirmou que a confiabilidade dos servidores subaquáticos é oito vezes superior à dos terrestres, devido à atmosfera inerte de nitrogênio. No entanto, em atualizações recentes da infraestrutura de nuvem da empresa, a Microsoft (2026) indicou que o projeto serviu como "laboratório de aprendizado" para aplicação de métodos de resfriamento e sustentabilidade em larga escala, optando por não expandir a frota submersa própria no momento para focar em outras frentes de descarbonização terrestre.

Enquanto a Microsoft encerrava as fases de teste do Projeto Natick, a China avançava para a viabilidade comercial. Segundo o portal especializado DatacenterDynamics (2023), o país inaugurou em novembro de 2023, em Sanya (província de Hainan), o primeiro centro de dados submerso em escala industrial, consolidando uma infraestrutura que visa economizar milhões de quilowatts-hora anualmente.

4.4. A Expansão Chinesa e o Resfriamento por Imersão Oceânica

Seguindo a mesma lógica, a China impulsionou o desenvolvimento de datacenters submarinos para sustentar seu *boom* de IA.

Sobre a evolução dos centros de dados na Ásia, observa-se que:

A expansão chinesa e o resfriamento por imersão oceânica configuram o primeiro caso de uso comercial em larga escala dessa tecnologia, permitindo que a província de Hainan se torne um hub de processamento com consumo hídrico próximo de zero nos sistemas de resfriamento. (Datacenterdynamics, 2023).

Conforme apontado por Lopes (2025, p. 1), essa aposta estratégica visa ganhar eficiência energética em larga escala, permitindo que os servidores operem ininterruptamente sem sobrecarregar as redes elétricas urbanas.

A operação ininterrupta dos servidores de alta performance impõe um desafio logístico às redes elétricas urbanas, exigindo o que a Agência Internacional de Energia (IEA, 2024, p. 31) identifica como uma necessidade de planejamento integrado. Segundo o relatório da IEA,

Gustavo Abrahão dos Santos

para que os centros de dados operem sem sobrecarregar a infraestrutura energética das cidades, é fundamental a implementação de soluções de eficiência e a diversificação da matriz, mitigando o risco de instabilidade no fornecimento para os consumidores residenciais.

Neste passo, a expansão chinesa em Hainan consolida o resfriamento por imersão oceânica como uma estratégia de ecoeficiência, utilizando a troca de calor marinha para mitigar o estresse térmico da IA, conforme Figura 2 a seguir. Essa infraestrutura redefine o processamento de dados ao integrar a alta demanda computacional aos limites físicos de Gaia, transformando o leito marinho em um componente vital da economia digital.

Figura 2 - Data centers mergulhados no mar



Fonte: (Shanghai Hailanyun Technology/ Wuhan Hi-Cloud Technology)

De acordo com Loiola (2026), a nova infraestrutura da China em Hainan estabelece novos padrões globais ao incorporar um cluster de computação voltado para a Inteligência Artificial, capaz de processar 7.000 consultas por segundo no fundo do mar.

Loiola (2026), afirma que:

... o módulo projetado para suportar cargas de trabalho de computação de alto desempenho (HPC) e inteligência artificial, o módulo modular faz parte de uma iniciativa mais ampla para descentralizar a infraestrutura de dados e integrar a sustentabilidade ao seu design.

4.5. Conflitos entre inovação digital e a Vingança de Gai

O debate acerca da viabilidade dessas macroestruturas digitais deve, obrigatoriamente, pautar-se nos limites da regeneração da biosfera. Se, sob a ótica da ecoeficiência, o resfriamento por imersão oceânica reduz o consumo de energia e a pegada de carbono, sob a perspectiva

Meio ambiente digital: datacenters no fundo do oceano como solução para a vingança de Gaia?

ecológica, ele introduz um novo vetor de estresse: a poluição térmica. Esse paradoxo tecnológico desafia a termorregulação de Gaia, evidenciando que a busca por soluções de baixo carbono não pode ignorar o impacto do descarte de calor residual nos sumidouros hídricos do planeta.

A tensão entre a aceleração tecnológica e a integridade da biosfera revela o que Lovelock (w2010) denomina como a "Vingança de Gaia", onde o sistema planetário reage ao estresse térmico imposto pela infraestrutura digital.

Conforme advertem Wedy, Hupffer e Weyermüller (2024, p. 13), "governança do mundo virtual deve submeter-se aos limites físicos do planeta, pois não há liberdade digital em um ecossistema em colapso.

Essa colisão entre a imaterialidade dos algoritmos e a realidade dos recursos hídricos é evidenciada pelo consumo massivo de água para resfriamento, que pode se equiparar ao de milhares de residências (UFU, 2025).

Assim, a inovação em centros de dados subaquáticos surge não apenas como avanço técnico, mas como uma tentativa desesperada de conciliar o processamento de dados com a regulação térmica do organismo vivo terrestre. Para Freitas (2012), a sustentabilidade multidimensional impõe que a eficiência econômica da IA não sacrifique o equilíbrio ecológico, sob pena de inviabilizar o próprio futuro da civilização.

4.6. Poluição térmica e o desequilíbrio dos ecossistemas marinhos

A introdução de calor residual nos oceanos por infraestruturas tecnológicas representa uma ameaça severa à biodiversidade, pois, conforme aponta a doutrina, "a governança do mundo virtual deve submeter-se aos limites físicos do planeta, pois não há liberdade digital em um ecossistema em colapso" (Wedy; Hupffer e Weyermüller, 2024, p. 13).

Esse fenômeno compromete a estabilidade climática global, uma vez que "o oceano é o grande regulador térmico de Gaia, e qualquer alteração em sua temperatura média pode desencadear feedbacks biológicos irreversíveis" (Lovelock, 2006, p. 88).

Assim, a poluição térmica marinha exige um rigoroso monitoramento para evitar que a solução de resfriamento da IA se torne o nexos causal de um novo desastre ecológico.

4.7. Governança ambiental digital e responsabilidade civil

A relação entre tecnologia e meio ambiente exige uma subordinação ética da inovação aos limites da biosfera. Nesse sentido, a governança do mundo virtual deve submeter-se aos limites físicos do planeta, pois não há liberdade digital em um ecossistema em colapso (Wedy;

Hupffer e Weyermüller, 2024, p. 13).

A busca pela neutralidade carbônica tem levado gigantes como Amazon e Google a investirem massivamente em infraestruturas próprias de energia solar e eólica, somando centenas de projetos globais e contratos de energia limpa que equivalem a milhões de painéis solares (Amazon, 2024a; Google, 2024b *Apud* Stacciarini Gonçalves, 2025). Segundo os autores, esse movimento visa não apenas o cumprimento de metas ambientais, mas o fortalecimento da imagem corporativa frente a investidores, o que corrobora a visão de Freitas (2012) sobre a sustentabilidade como pilar da gestão moderna.

A pressão exercida pela infraestrutura digital sobre os recursos vitais é alarmante, conforme destaca a notícia institucional da Universidade Federal de Uberlândia:

Dependendo da tecnologia adotada para resfriar os chips que trabalham ininterruptamente, ainda mais com o aumento da demanda dos sistemas de inteligência artificial, o consumo hídrico de um data center pode se equiparar ao de dezenas de milhares de residências. “Em um cenário de intensificação das mudanças climáticas, com maior frequência de secas severas e eventos climáticos extremos, a presença de consumidores intensivos de água pode agravar pressões já existentes sobre os recursos hídricos”, alerta o professor Daniel Caixeta Andrade [...]. “Hoje existem tecnologias que prometem reduzir esse consumo e aumentar a eficiência desses sistemas, mas sempre haverá um consumo significativo à medida que os servidores aumentam de tamanho e capacidade de processamento” (UFU, 2025).

O consumo excessivo de água pela Inteligência Artificial hoje compromete a disponibilidade hídrica futura, sendo tal fato social contrário ao princípio do desenvolvimento sustentável e ao princípio da cooperação intergeracional prevista no artigo 225, caput da Constituição Federal de 1988 (Brasil, 2026):

Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

E mais, as empresas de tecnologia são poluidoras indiretas quando contratam *datacenters* que não possuem eficiência hídrica, ensejando a aplicação do princípio do poluidor-pagador, previsto no artigo 225, parágrafo 2º da Carta Magna de 1988 (Brasil, 2026): “Aquele que explorar recursos minerais fica obrigado a recuperar o meio ambiente degradado, de acordo com solução técnica exigida pelo órgão público competente, na forma da lei”.

Logo, a busca pela sustentabilidade na infraestrutura digital ampara-se no conceito de ecoeficiência, definido como:

[...] a oferta de produtos e serviços economicamente viáveis que atendem às necessidades humanas e melhoram a qualidade de vida, reduzindo progressivamente os impactos ecológicos e o uso de recursos ao longo de seu ciclo de vida, em consonância com a capacidade de suporte da Terra. Ela enfatiza o uso eficiente de materiais e energia para alcançar lucratividade e agregação de valor. (Sciencedirect, 2024).

É imperativo notar que a sustentabilidade não se encerra na eficiência do hardware; ela

Meio ambiente digital: datacenters no fundo do oceano como solução para a vingança de Gaia?

é um valor multidimensional que exige simbiose entre o econômico, o ecológico e o social. Ainda que uma empresa adote tecnologias ecoeficiente, como o resfriamento por imersão oceânica, a sua legitimidade sustentável depende de quão profundamente ela se integra ao território. Sem uma contribuição real para o desenvolvimento local e um impacto positivo na dinâmica social do entorno, o gigantismo dessas infraestruturas — submersas ou terrestres — falha em cumprir o dever de sustentabilidade em sua plenitude.

4.8. O Paradoxo da tecnologia como protetora e predadora

O paradoxo tecnológico revela uma dualidade crítica: enquanto ferramentas digitais monitoram a biosfera, sua infraestrutura física exerce uma pressão predatória sobre os recursos naturais. Neste ponto, a liberdade e o desenvolvimento do ambiente digital estão intrinsecamente condicionados à preservação da integridade ecológica, uma vez que a governança do virtual não pode prosperar sob a égide de um colapso sistêmico da biosfera (Wedy; Hupffer e Weyermüller, 2024).

Essa tensão é personificada pelos datacenters, que prometem eficiência, mas operam como consumidores vorazes de energia e água. Para Lovelock (2006, p. 88), o oceano atua como o regulador térmico de Gaia, e qualquer interferência em seu equilíbrio pode desencadear reações sistêmicas irreversíveis, transformando a suposta proteção tecnológica em predação ecológica.

Diante desse cenário, o paradoxo da tecnologia como protetora e predadora materializa a iminência da "Vingança de Gaia", caso a governança ambiental e digital, exercida por atores governamentais e não governamentais, negligencie os mandamentos da precaução e da prevenção. A ausência de uma vigilância ética sobre a expansão dos *datacenters* ignora que "a manutenção da homeostase planetária depende da contenção das externalidades antrópicas dentro dos limites de regeneração do sistema" (Lovelock, 2006, p. 92).

Portanto, a mitigação dessa resposta biofísica global exige que a inovação seja submetida a um controle normativo rigoroso, pois, na perspectiva da sustentabilidade multidimensional, "não se pode admitir um progresso técnico que fragilize a dignidade ambiental e o patrimônio genético das futuras gerações" (Freitas, 2012, p. 54).

Enfim, somente através da internalização desses deveres fundamentais será possível converter a predação tecnológica em uma simbiose segura entre o mundo virtual e o organismo vivo da Terra.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A investigação confirma que a aparente imaterialidade da "nuvem" mascara uma infraestrutura física monumental, cujo consumo energético massivo e demanda por resfriamento desafiam a homeostase planetária. Diante da iminente "Vingança de Gaia", a transferência de servidores para o leito oceânico surge como uma adaptação técnica eficaz para reduzir a pegada de carbono e mitigar o estresse térmico atmosférico.

Contudo, a viabilidade comercial demonstrada pela expansão chinesa em Hainan e pelo Projeto Natick da Microsoft alerta para o risco ético da poluição térmica nos ecossistemas marinhos. O paradoxo da tecnologia, que oscila entre protetora climática e predadora de recursos, exige que o descarte de calor residual não ultrapasse os limites biofísicos de autorregulação da hidrosfera.

Nesse contexto, a governança do meio ambiente digital deve transitar de uma visão puramente antropocêntrica para um modelo de sustentabilidade multidimensional pautado nos princípios da precaução e prevenção. A inovação tecnológica só alcançará legitimidade plena se internalizar os custos ambientais de sua infraestrutura, submetendo o código digital às leis biológicas que regem o metabolismo da Terra.

Em última análise, os servidores subaquáticos representam uma fronteira promissora, mas insuficiente se desvinculada de uma gestão de dados que priorize a eficiência termodinâmica global. O futuro da sociedade da informação depende, portanto, da simbiose entre o desenvolvimento de algoritmos e o dever fundamental de preservação ecológica para garantir a habitabilidade de Gaia.

6. REFERÊNCIAS

- BRASIL. [Constituição (1988)]. **Constituição da República Federativa do Brasil de 1988**. Brasília, DF: Presidente da República, [2026]. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm Acesso em: 13/02/2026.
- CARVALHO, Delton Winter de. **Direito dos Desastres e Regulação Jurídica**. 2. ed. São Paulo: Revista dos Tribunais, 2020.
- CRUZ, Franklin Nelson da; BORBA, Gilvan Luiz; ABREU, Luiz Roberto Diz de. *A hipótese Gaia*. 2. ed. Natal, RN: EDUFRRN, 2005. (Série Ciências da Natureza e Realidade).
- DATACENTERDYNAMICS (DCD). **China's first commercial underwater data center deployed off Hainan coast**. London: DCD News, 31 nov. 2023. Disponível em: <https://www.datacenterdynamics.com/en/news/chinas-first-commercial-underwater-data-center-deployed-off-hainan-coast/> Acesso em: 13/02/2026.

Meio ambiente digital: datacenters no fundo do oceano como solução para a vingança de Gaia?

- FIORILLO, Celso Antonio Pacheco. **Curso de Direito Ambiental Brasileiro**. 21. ed. São Paulo: Saraiva, 2021.
- FREITAS, Juarez. **Sustentabilidade: direito ao futuro**. Belo Horizonte: Fórum, 2012.
- HINTEMANN, Ralph; HINTERHOLZER, Simon. **Data centers 2021: Cloud computing drives the growth of the data center industry and its energy consumption**. Berlin: Borderstep Institute, 2022.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Electricity 2024: Analysis and forecast to 2026**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/electricity-2024> Acesso em: 13/02/2026.
- LOIOLA, Sergio A. **A China lançou um data Center subaquático, com um cluster de computação dedicado a IA, em Hainan**. Nature & Space, 3 fev. 2026. Disponível em: <https://naturespace.com.br/sustentavel-china-lancou-data-center-de-ia-no-fundo-do-mar> Acesso em: 14/02/2026.
- LOPES, Luiza. **Data centers mergulhados no mar são aposta chinesa para refrigeração**. Superinteressante, 26 ago. 2025. Disponível em: <https://super.abril.com.br/tecnologia/data-centers-mergulhados-no-mar/> Acesso em: 15/02/2026.
- LOVELOCK, James. **A vingança de Gaia**. Tradução de Ivo Korytowski. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2006.
- LOVELOCK, James. **Gaia: Alerta Final**. Tradução de Vera de Paula Assis. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2010.
- LOVELOCK, James. **Gaia: um novo olhar sobre a vida na terra**. Tradução de Maria Georgina Segurado. Rio de Janeiro, RJ : Ed.70, 1987.
- LOVELOCK, James. Tradução de Álvaro Marcos Lantero. **Pertencemos a Gaia**. Editora GG. 1a ed. Barcelona, Espanha, (Trad.), 2024.
- MICROSOFT. **A Microsoft concluiu que os centros de dados subaquáticos são confiáveis, práticos e utilizam energia de forma sustentável**. Fonte Microsoft, 14 set. 2020. Disponível em: <https://news.microsoft.com/source/features/sustainability/project-natick-underwater-datacenter/>. Acesso em: 15/02/2026.
- MICROSOFT. **Project Natick Phase 2: final research report on underwater data centers**. Redmond: Microsoft Research, 2020. Disponível em: <https://natick.research.microsoft.com> Acesso em: 15/02/2026.
- MICROSOFT. **Project Natick: Cloud computing is going subsea**. Redmond: Microsoft Research, 2026. Disponível em: <https://www.microsoft.com/en-us/research/project/natick/> Acesso em: 15/02/2026.
- MOSCO, Vincent. **To the Cloud: Big Data in a Turbulent World**. Boulder: Paradigm Publishers, 2014.
- ROACH, John. **A Microsoft considera datacenters subaquáticos confiáveis, práticos e que usam energia de forma sustentável**. Microsoft News, 14 set. 2020. Disponível em: <https://news.microsoft.com/pt-br/a-microsoft-considera-datacenters-subaquaticos-confiaveis-praticos-e-que-usam-energia-de-forma-sustentavel/> Acesso em: 15/02/2026.



Gustavo Abrahão dos Santos

- RODOTÀ, Stefano. **A vida na sociedade da vigilância: a privacidade hoje**. Organização de Maria Celina Bodin de Moraes. Rio de Janeiro: Renovar, 2011.
- SARLET, Ingo Wolfgang; FENSTERSEIFER, Tiago. **Curso de direito ambiental**. 3. ed. Rio de Janeiro: Forense, 2022.
- SCIENCEDIRECT. **Eco-efficiency**. Topics in Engineering, [s. 1.], 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/eco-efficiency> Acesso em: 16/02/2026.
- SITNIK, Michel. **USP lança plataforma para gestão ambiental com foco em produtos químicos**. Jornal da USP, São Paulo, 21 jul. 2023. Disponível em: <https://jornal.usp.br/institucional/usp-lanca-plataforma-para-gestao-ambiental-com-foco-em-produtos-quimicos/> Acesso em: 16/02/2026.
- SMITH, Janet. **Submarine Data Centers and the Marine Environment: Thermal Impacts and Governance**. London: Tech-Eco Press, 2021.
- STACCIARINI, João Henrique Santana; GONÇALVES, Ricardo Junior de Assis Fernandes. Data centers, minerais críticos, energia e geopolítica: as bases da inteligência artificial. **Sociedade & Natureza**, Uberlândia, MG, v. 37, e77215, 2025.
- UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA. **Cientistas alertam: data centers podem causar crise de água e energia**. Comunica UFU, Uberlândia, 15 set. 2025. Disponível em: <https://comunica.ufu.br/noticias/2025/09/cientistas-alertam-data-centers-podem-causar-crise-de-agua-e-energia> Acesso em: 17/02/2026.
- WEDY, Gabriel; HUPFFER, Haide Maria; WEYERMÜLLER, André Rafael (Org.). **Direito e inteligência artificial: perspectivas para um futuro ecologicamente sustentável**. São Leopoldo: Casa Leiria, 2024.
- WILLIAMS, Eric. **Environmental effects of information and communications technologies**. Nature, v. 479, n. 7373, p. 354-358, 2011.
- YOU, Xiaoying. **China impulsiona o boom da IA com centros de dados submarinos**. Scientific American, 16 jul. 2025. Disponível em: <https://www.scientificamerican.com/article/china-powers-ai-boom-with-undersea-data-centers/> Acesso em: 17/02/2026.