

**VI CONGRESSO INTERNACIONAL DE
DIREITO E INTELIGÊNCIA
ARTIFICIAL (VI CIDIA)**

EMPRESA, TECNOLOGIA E SUSTENTABILIDADE

E55

Empresa, tecnologia e sustentabilidade [Recurso eletrônico on-line] organização VI Congresso Internacional de Direito e Inteligência Artificial (VI CIDIA): Skema Business School – Belo Horizonte;

Coordenadores: Marcia Andrea Bühring, Ana Cláudia Redecker e Maraluce Maria Custódio – Belo Horizonte: Skema Business School, 2025.

Inclui bibliografia

ISBN: 978-65-5274-358-9

Modo de acesso: www.conpedi.org.br em publicações

Tema: Perspectivas globais para a regulação da inteligência artificial.

1. Responsabilidade social. 2. Tecnologias verdes. 3. Governança corporativa. I. VI Congresso Internacional de Direito e Inteligência Artificial (1:2025 : Belo Horizonte, MG).

CDU: 34

skema
BUSINESS SCHOOL

LAW SCHOOL
FOR BUSINESS

VI CONGRESSO INTERNACIONAL DE DIREITO E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (VI CIDIA)

EMPRESA, TECNOLOGIA E SUSTENTABILIDADE

Apresentação

A SKEMA Business School é uma organização francesa sem fins lucrativos, com presença em sete países diferentes ao redor do mundo (França, EUA, China, Brasil, Emirados Árabes Unidos, África do Sul e Canadá) e detentora de três prestigiadas creditações internacionais (AMBA, EQUIS e AACSB), refletindo seu compromisso com a pesquisa de alta qualidade na economia do conhecimento. A SKEMA reconhece que, em um mundo cada vez mais digital, é essencial adotar uma abordagem transdisciplinar.

Cumprindo esse propósito, o VI Congresso Internacional de Direito e Inteligência Artificial (VI CIDIA), realizado nos dias 18 e 19 de setembro de 2025, em formato híbrido, manteve-se como o principal evento acadêmico sediado no Brasil com o propósito de fomentar ricas discussões sobre as diversas interseções entre o direito e a inteligência artificial. O evento, que teve como tema central a "Regulação da Inteligência Artificial", contou com a presença de renomados especialistas nacionais e internacionais, que abordaram temas de relevância crescente no cenário jurídico contemporâneo.

Profissionais e estudantes dos cursos de Direito, Administração, Economia, Ciência de Dados, Ciência da Computação, entre outros, tiveram a oportunidade de se conectar e compartilhar conhecimentos, promovendo um ambiente de rica troca intelectual. O VI CIDIA contou com a participação de acadêmicos e profissionais provenientes de diversas regiões do Brasil e do exterior. Entre os estados brasileiros representados, estavam: Alagoas (AL), Bahia (BA), Ceará (CE), Goiás (GO), Maranhão (MA), Mato Grosso do Sul (MS), Minas Gerais (MG), Pará (PA), Paraíba (PB), Paraná (PR), Pernambuco (PE), Piauí (PI), Rio de Janeiro

Foram discutidos assuntos variados, desde a própria regulação da inteligência artificial, eixo central do evento, até as novas perspectivas de negócios e inovação, destacando como os algoritmos estão remodelando setores tradicionais e impulsionando a criação de empresas inovadoras. Com uma programação abrangente, o congresso proporcionou um espaço vital para discutir os desafios e oportunidades que emergem com o desenvolvimento algorítmico, reforçando a importância de uma abordagem jurídica e ética robusta nesse contexto em constante evolução.

A programação teve início às 13h, com o check-in dos participantes e o aquecimento do público presente. Às 13h30, a abertura oficial foi conduzida pela Prof.^a Dr.^a Geneviève Poulingue, que, em sua fala de boas-vindas, destacou a relevância do congresso para a agenda global de inovação e o papel da SKEMA Brasil como ponte entre a academia e o setor produtivo.

Em seguida, às 14h, ocorreu um dos momentos mais aguardados: a Keynote Lecture do Prof. Dr. Ryan Calo, renomado especialista internacional em direito e tecnologia e professor da University of Washington. Em uma conferência instigante, o professor explorou os desafios metodológicos da regulação da inteligência artificial, trazendo exemplos de sua atuação junto ao Senado dos Estados Unidos e ao Bundestag alemão.

A palestra foi seguida por uma sessão de comentários e análise crítica conduzida pelo Prof. Dr. José Luiz de Moura Faleiros Júnior, que contextualizou as reflexões de Calo para a realidade brasileira e fomentou o debate com o público. O primeiro dia foi encerrado às 14h50 com as considerações finais, deixando os participantes inspirados para as discussões do dia seguinte.

As atividades do segundo dia tiveram início cedo, com o check-in às 7h30. Às 8h20, a Prof.^a Dr.^a Margherita Pagani abriu a programação matinal com a conferência Unlocking Business

Após um breve e merecido coffee break às 9h40, os participantes retornaram para uma manhã de intensas reflexões. Às 10h30, o pesquisador Prof. Dr. Steve Ataky apresentou a conferência Regulatory Perspectives on AI, compartilhando avanços e desafios no campo da regulação técnica e ética da inteligência artificial a partir de uma perspectiva global.

Encerrando o ciclo de palestras, às 11h10, o Prof. Dr. Filipe Medon trouxe ao público uma análise profunda sobre o cenário brasileiro, com a palestra AI Regulation in Brazil. Sua exposição percorreu desde a criação do Marco Legal da Inteligência Artificial até os desafios atuais para sua implementação, envolvendo aspectos legislativos, econômicos e sociais.

Nas tardes dos dois dias, foram realizados grupos de trabalho que contaram com a apresentação de cerca de 60 trabalhos acadêmicos relacionados à temática do evento. Com isso, o evento foi encerrado, após intensas discussões e troca de ideias que estabeleceram um panorama abrangente das tendências e desafios da inteligência artificial em nível global.

Os GTs tiveram os seguintes eixos de discussão, sob coordenação de renomados especialistas nos respectivos campos de pesquisa:

a) Startups e Empreendedorismo de Base Tecnológica – Coordenado por Allan Fuezi de Moura Barbosa, Laurence Duarte Araújo Pereira, Cildo Giolo Júnior, Maria Cláudia Viana Hissa Dias do Vale Gangana e Yago Oliveira

b) Jurimetria Cibernética Jurídica e Ciência de Dados – Coordenado por Arthur Salles de Paula Moreira, Gabriel Ribeiro de Lima, Isabela Campos Vidigal Martins, João Victor Doreto e Tales Calaza

c) Decisões Automatizadas e Gestão Empresarial / Algoritmos, Modelos de Linguagem e Propriedade Intelectual – Coordenado por Alisson Jose Maia Melo, Guilherme Mucelin e

f) Regulação da Inteligência Artificial – III – Coordenado por Ana Júlia Silva Alves Guimarães, Erick Hitoshi Guimarães Makiya, Jessica Fernandes Rocha, João Alexandre Silva Alves Guimarães e Luiz Felipe Vieira de Siqueira

g) Inteligência Artificial, Mercados Globais e Contratos – Coordenado por Gustavo da Silva Melo, Rodrigo Gugliara e Vitor Ottoboni Pavan

h) Privacidade, Proteção de Dados Pessoais e Negócios Inovadores – I – Coordenado por Dineia Anziliero Dal Pizzol, Evaldo Osorio Hackmann, Gabriel Fraga Hamester, Guilherme Mucelin e Guilherme Spillari Costa

i) Privacidade, Proteção de Dados Pessoais e Negócios Inovadores – II – Coordenado por Alexandre Schmitt da Silva Mello, Lorenzo Antonini Itabaiana, Marcelo Fonseca Santos, Mariana de Moraes Palmeira e Pietra Daneluzzi Quinelato

j) Empresa, Tecnologia e Sustentabilidade – Coordenado por Marcia Andrea Bühring, Ana Cláudia Redecker, Jessica Mello Tahim e Maraluce Maria Custódio.

Cada GT proporcionou um espaço de diálogo e troca de experiências entre pesquisadores e profissionais, contribuindo para o avanço das discussões sobre a aplicação da inteligência artificial no direito e em outros campos relacionados.

Um sucesso desse porte não seria possível sem o apoio institucional do Conselho Nacional de Pesquisa e Pós-graduação em Direito - CONPEDI, que desde a primeira edição do evento provê uma parceria sólida e indispensável ao seu sucesso. A colaboração contínua do CONPEDI tem sido fundamental para a organização e realização deste congresso, assegurando a qualidade e a relevância dos debates promovidos.

Reitora – SKEMA Business School - Campus Belo Horizonte

Prof. Ms. Dorival Guimarães Pereira Júnior

Coordenador do Curso de Direito – SKEMA Law School

Prof. Dr. José Luiz de Moura Faleiros Júnior

Coordenador de Pesquisa – SKEMA Law School

GOVERNANÇA SUSTENTÁVEL DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: FUNDAMENTOS E DESAFIOS DA GREEN AI NO CONTEXTO DIGITAL

SUSTAINABLE GOVERNANCE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE: FOUNDATIONS AND CHALLENGES OF GREEN AI IN THE DIGITAL CONTEXT

Deilton Ribeiro Brasil ¹

Resumo

O presente artigo examina as possibilidades de incorporação dos fundamentos da Inteligência Artificial Verde (Green AI) aos modelos contemporâneos de governança tecnológica, com ênfase na sustentabilidade ambiental e na eficiência computacional. Parte-se da seguinte problematização: em que medida práticas associadas à Green AI podem mitigar os impactos ambientais dos sistemas de inteligência artificial sem comprometer sua funcionalidade e capacidade inovadora? A hipótese de pesquisa sustenta que a adoção de princípios como eficiência energética, rastreamento de emissões e transparência algorítmica constitui uma estratégia viável para a compatibilização entre desenvolvimento tecnológico e responsabilidade ecológica. Utiliza-se o método hipotético-dedutivo, com procedimentos metodológicos baseados em revisão bibliográfica interdisciplinar e instrumentos normativos internacionais. Os resultados obtidos indicam avanços no uso de métricas de impacto ambiental, na construção de modelos computacionais de menor consumo energético e na introdução de critérios de sustentabilidade em propostas regulatórias. Verificou-se ainda que a consolidação da Green AI requer a integração entre inovação técnica, diretrizes jurídicas e mecanismos de governança responsáveis.

Palavras-chave: Inteligência artificial verde, Sustentabilidade digital, Governança algorítmica

Abstract/Resumen/Résumé

This paper investigates the incorporation of Green Artificial Intelligence (Green AI) principles into current models of technological governance, focusing on environmental

integration of sustainability criteria into regulatory proposals. The study concludes that the institutionalization of Green AI requires the convergence of technical innovation, legal frameworks, and responsible governance mechanisms.

Keywords/Palabras-claves/Mots-clés: Green artificial intelligence, Digital sustainability, Algorithmic governance

Introdução

A crescente pressão por modelos de desenvolvimento sustentáveis tem impulsionado uma profunda revisão das bases tecnológicas sobre as quais a sociedade contemporânea se estrutura. Nesse cenário, a *Green Artificial Intelligence* - ou IA Verde - emerge como uma resposta crítica às externalidades ambientais geradas pela evolução acelerada da inteligência artificial (IA), sobretudo no que diz respeito à emissão de carbono, ao consumo energético e à obsolescência computacional. Conforme demonstram Strubell, Ganesh e McCallum (2019), o treinamento de um único modelo de linguagem baseado em transformadores pode emitir mais de 284 toneladas de dióxido de carbono, valor equivalente às emissões de cinco automóveis ao longo de toda a sua vida útil. Essa constatação explicita o paradoxo entre o avanço técnico da IA e os compromissos ambientais assumidos em acordos internacionais, como o Acordo de Paris.

O conceito de IA Verde, proposto por Schwartz *et al.* (2020), representa uma inflexão no paradigma dominante da chamada *Red AI*, caracterizada pela maximização da acurácia e desempenho computacional sem consideração pelas consequências ecológicas. A *Green AI*, por sua vez, propõe a centralidade de critérios como eficiência energética, rastreamento de emissões, modularidade e transparência no uso de recursos computacionais. Trata-se de um modelo orientado por valores que articula inovação tecnológica com responsabilidade ambiental, alinhando-se a outras vertentes da discussão normativa sobre ética algorítmica, como a IA responsável e a governança digital sustentável (Cowls *et al.*, 2021).

Em outras palavras, enfatiza a eficiência como um critério de avaliação essencial, promovendo práticas que reduzam o consumo de energia e as emissões de carbono. Isso inclui, por exemplo, a adoção de técnicas como a quantização, que otimiza o uso de recursos computacionais e energéticos, ao reduzir a precisão dos parâmetros do modelo e diminuir o tamanho do modelo, ou o compartilhamento de modelos pré-treinados, que evita a redundância no uso de recursos (Ferraro *et al.*, 2024).

Diante desse contexto, o objetivo geral deste trabalho é investigar como os princípios da IA Verde podem ser incorporados aos modelos contemporâneos de governança tecnológica, visando a promoção de um desenvolvimento digital sustentável. Os objetivos específicos consistem em: (i) examinar os custos ambientais

associados ao ciclo de vida dos sistemas de IA; (ii) identificar princípios, métricas e boas práticas que fundamentam a *Green AI*; e (iii) avaliar instrumentos jurídicos e políticos que possam viabilizar a integração da sustentabilidade ambiental às políticas públicas e privadas de inovação em IA.

A problematização que norteia esta investigação pode ser sintetizada da seguinte forma: De que maneira a adoção de práticas vinculadas à IA Verde pode contribuir para a redução dos impactos ambientais das tecnologias algorítmicas sem comprometer sua eficiência funcional e inovação?

A hipótese de pesquisa formulada parte do pressuposto de que: a incorporação de princípios da *Green AI* - como a otimização energética, o rastreamento de emissões e a modularização de sistemas - constitui uma estratégia viável para mitigar os danos ambientais associados à IA, sem inviabilizar sua competitividade tecnológica.

A investigação adota o método hipotético-dedutivo, partindo da construção de uma hipótese com base na literatura especializada e testando sua plausibilidade mediante revisão crítica e análise de casos concretos. Os procedimentos metodológicos envolvem pesquisa bibliográfica em fontes científicas, análise de documentos institucionais e políticas públicas.

Os resultados obtidos indicam que, embora ainda incipiente, a *Green AI* representa um campo promissor para a convergência entre inovação digital e justiça ambiental. Verificou-se que a viabilidade técnica de modelos menos custosos energeticamente, o avanço de métricas de rastreamento de emissões e a inclusão progressiva da sustentabilidade entre os critérios de avaliação de risco e conformidade em ambientes regulados.

Alguns esclarecimentos necessários

O futuro da IA verde dependerá da capacidade coletiva de equilibrar a inovação tecnológica com princípios éticos e sustentáveis. Seu desenvolvimento acelerado nas últimas décadas tem incentivado o interesse acadêmico por pesquisas sobre os impactos da IA na sociedade, na economia e no meio ambiente. Em resposta a esses desafios, surgiu um novo campo de pesquisa denominado “IA verde” ou “algoritmo verde”, cujo objetivo consiste em desenvolver sistemas de IA mais eficientes e sustentáveis sob diversas perspectivas ambientais. Do ponto de vista técnico, múltiplos estudos têm explorado estratégias para a redução do consumo energético e

das emissões de carbono associadas ao treinamento e à execução de modelos de IA (Costa, 2024, p. 6).

Além disso, a IA verde tem sido aplicada em diversas áreas estratégicas, como a gestão de recursos naturais, a otimização de sistemas de energia renovável e a previsão de eventos relacionados às mudanças climáticas. Modelos baseados em IA, por exemplo, têm sido utilizados para otimizar a localização e o *design* de parques eólicos e solares, com o objetivo de maximizar os benefícios logísticos e econômicos ao longo da cadeia de suprimentos, ao mesmo tempo em que se minimiza o impacto ambiental dessas infraestruturas. Do mesmo modo, a IA tem contribuído para a elevação da eficiência energética em edificações, favorecendo o avanço do conceito de cidades inteligentes. Por meio da análise de dados provenientes de sensores e da otimização do consumo energético em tempo real, têm-se alcançado resultados significativos em termos de economia e sustentabilidade operacional (Costa, 2024, p. 6).

No entanto, apesar dos avanços técnicos observados, o campo da *Green AI* ainda enfrenta desafios estruturais. Um dos principais entraves reside na ausência de métricas padronizadas e consensuais para avaliação da sustentabilidade de sistemas baseados em IA, o que dificulta a comparação entre soluções e a identificação de tecnologias verdadeiramente ecológicas. Essa lacuna também se manifesta na dificuldade de implementação prática de soluções verdes em ambientes industriais, muitas vezes marcados por restrições orçamentárias e baixa capacidade técnica. Sob a perspectiva ética e social, emergem ainda preocupações relacionadas à homogeneidade no acesso e à concentração dessas tecnologias nas mãos de poucos atores privilegiados. Tal concentração tende a agravar desigualdades já existentes no que se refere à distribuição dos recursos e dos benefícios ambientais associados à inovação digital (Costa, 2024, p. 6-7).

As premissas da governança sustentável da IA na União Europeia

A Proposta de Regulação Europeia de Inteligência Artificial (AI Act), apresentada pela Comissão Europeia em 2021 e aprovada pelo Parlamento Europeu em 2024, representa um marco normativo no esforço por consolidar um modelo de governança sustentável da IA no contexto europeu. A proposta busca harmonizar o desenvolvimento tecnológico com a proteção de direitos fundamentais, a segurança

dos sistemas e a promoção de valores democráticos. Contudo, destaca-se também por integrar, de forma transversal, diretrizes ambientais e climáticas, estabelecendo um arcabouço jurídico que conecta inovação digital com os compromissos da transição ecológica europeia (Comissão Europeia, 2021).

Esse modelo regulatório alinha-se aos objetivos delineados no *European Green Deal*, que estabelece a meta de neutralidade climática da União Europeia até 2050 e reconhece a importância da digitalização como instrumento para a mitigação da crise ambiental (Comissão Europeia, 2019). Nesse cenário, a governança da IA não pode ser compreendida de forma dissociada das exigências de sustentabilidade: a regulação proposta orienta o desenvolvimento e a utilização de sistemas de IA com base em princípios como a eficiência energética, a minimização da pegada ecológica e a preservação de recursos naturais, elementos essenciais para garantir o equilíbrio entre progresso técnico e responsabilidade ambiental.

Segundo Floridi e Cowls (2019), uma governança ética da IA deve operar com base em princípios orientadores que incluam, além da autonomia e da justiça, o compromisso com a sustentabilidade ambiental como imperativo moral e político. A proposta do *AI Act* expressa esse compromisso por meio de exigências que condicionam a implementação de sistemas de alto risco à realização de avaliações de impacto, que, embora voltadas prioritariamente à proteção de direitos fundamentais, abrem espaço para a consideração dos impactos ambientais e sociais dos sistemas algorítmicos. Como observa Mantelero (2022), tais avaliações constituem ferramentas fundamentais para a construção de um modelo de governança que valorize a responsabilidade intergeracional, articulando o progresso científico à proteção de bens jurídicos coletivos.

Adicionalmente, o *AI Act* está em consonância com o entendimento de que a governança sustentável da IA requer não apenas controle técnico e jurídico, mas também transparência, rastreabilidade e auditabilidade dos sistemas, o que possibilita o monitoramento contínuo de seus efeitos e o aperfeiçoamento de suas práticas operacionais. A sustentabilidade torna-se, assim, um vetor transversal da regulação, com desdobramentos normativos, técnicos e éticos. Gregorio (2022) enfatiza que a arquitetura constitucional digital europeia depende de uma regulação que estabeleça limites ao poder algorítmico, ao mesmo tempo em que promova a inovação orientada ao bem comum. A sustentabilidade da governança algorítmica não se limita à questão ambiental, mas envolve também a criação de uma estrutura normativa estável,

participativa e alinhada aos princípios do constitucionalismo digital europeu (Gregorio, 2022, p. 4-5). Nesse sentido, a União Europeia tem buscado um modelo regulatório baseado em uma abordagem centrada no ser humano (*human-centric approach*), que prioriza a dignidade, a participação democrática e o controle público sobre os sistemas tecnológicos, em oposição à autorregulação por agentes privados ou ao domínio irrestrito da lógica de mercado (Gregorio, 2022, p. 4, 19).

Defende ainda que uma governança sustentável da IA deve incluir, como elemento essencial, a intervenção deliberativa do poder público. Essa atuação não deve ocorrer apenas por meio da imposição de sanções, mas também pela construção de um ecossistema institucional capaz de garantir a conformidade tecnológica com valores públicos, como a equidade, a responsabilidade e a proteção de grupos vulneráveis (Gregorio, 2022, p. 4-5). Para tanto, o autor enfatiza a necessidade de criar condições para o exercício do controle democrático sobre tecnologias algorítmicas, sobretudo por meio da participação ativa dos cidadãos nos processos decisórios que envolvem a introdução e operação de sistemas de IA em contextos públicos e privados (Gregorio, 2022, p. 3).

Entre os instrumentos destacados para viabilizar essa governança sustentável, está a Avaliação de Impacto Algorítmico (*AIA - Algorithmic Impact Assessment*), concebida como uma ferramenta normativa essencial para antecipar riscos sistêmicos relacionados aos direitos fundamentais e à estrutura democrática das sociedades. A AIA, quando bem implementada, atua como mecanismo de transparência, permitindo que as decisões automatizadas sejam auditadas, contestadas e sujeitas a revisão pública, o que fortalece a *accountability* institucional e social (Gregorio, 2022, p. 189-190).

Por fim, o autor argumenta que a regulação da IA no contexto europeu deve dialogar não apenas com os valores constitucionais tradicionais, mas também com os objetivos de sustentabilidade estabelecidos pelo *European Green Deal*. Isso implica considerar, além dos impactos sociais, os impactos ambientais da tecnologia, como o uso intensivo de energia no treinamento de modelos e os efeitos ecológicos da digitalização massiva (Gregorio, 2022, p. 130-133). Assim, a governança sustentável da IA deve ser compreendida como uma estrutura normativa, fundada na combinação entre inovação regulada, controle democrático e responsabilidade intergeracional.

A presença de princípios ambientais implícitos no *AI Act* - como os da precaução, da prevenção e da eficiência no uso de recursos - revela que a governança

sustentável da IA é entendida como uma governança ampliada, que transcende os limites da proteção individual e incorpora dimensões coletivas e ecológicas. A análise do *High-Level Expert Group on AI* (2019) reforça essa concepção ao incluir a sustentabilidade como um dos sete requisitos essenciais para que os sistemas de IA sejam considerados confiáveis. Assim, a regulação da IA na União Europeia oferece uma resposta normativa integrada aos desafios colocados pela digitalização intensiva, demonstrando que a sustentabilidade ambiental não é um obstáculo à inovação, mas uma condição para sua legitimidade e continuidade.

Também importante registrar sobre o Programa Nacional de Algoritmos Verdes (PNAV) da Espanha representa uma política pública inovadora voltada à articulação entre transformação digital e transição ecológica. Seu ponto de partida é o reconhecimento de que, embora a IA possua um elevado potencial para enfrentar desafios ambientais - como a modelagem climática, a gestão eficiente de recursos naturais e a previsão de desastres -, o próprio desenvolvimento e operação dos sistemas algorítmicos também geram impactos ambientais significativos. O alto consumo energético dos centros de dados, os processos intensivos de treinamento de modelos e a dependência de infraestruturas computacionais intensivas apontam para a necessidade urgente de incorporar critérios de sustentabilidade ambiental ao ciclo de vida dos sistemas de IA. O plano reconhece que a IA deve ser desenvolvida com responsabilidade ecológica, integrando princípios de eficiência energética, descarbonização e economia circular, em sintonia com os objetivos climáticos da União Europeia (PNAV, 2022, p. 10-11).

Nesse contexto, o PNAV insere-se como medida 20 da Estratégia Nacional de Inteligência Artificial (ENIA) e propõe quatro eixos estratégicos interdependentes. O Eixo 1 concentra-se na pesquisa científica de base, com enfoque transdisciplinar, promovendo sinergias entre os campos da IA, das ciências ambientais e sociais. Este eixo apoia iniciativas como as *Cátedras ENIA* e a *Red Española de Excelencia en Inteligencia Artificial*, fomentando investigações orientadas por impactos climáticos e ecológicos, e não apenas por critérios de vanguarda tecnológica (PNAV, 2022, p. 16-18). A criação de grupos de pesquisa voltados ao impacto ambiental dos sistemas algorítmicos visa instituir um corpo teórico e empírico que permita o desenvolvimento de soluções de IA com menor pegada ecológica, aspecto ainda incipiente na literatura científica e no campo da inovação.

O Eixo 2 aborda a infraestrutura técnica necessária para tornar os sistemas de IA mais eficientes do ponto de vista energético. Propõe o desenvolvimento de ferramentas padronizadas para a medição do consumo energético dos algoritmos durante todo seu ciclo de vida - do *design* ao treinamento e execução (PNAV, 2022, p. 21). A criação de um esquema de certificação para empresas *Green Tech* e de um selo de qualidade para IA ambientalmente sustentável é outro avanço significativo, pois atua como instrumento regulatório voluntário, mas com forte potencial de transformação de mercado. Tais mecanismos aproximam-se de um modelo de governança orientado por métricas técnicas, reforçando o papel do Estado como catalisador da sustentabilidade no setor tecnológico.

Já o Eixo 3 visa a incorporação da IA verde ao setor produtivo, especialmente por meio da integração nas cadeias de valor, do financiamento a *misiones I+D+i* e da atuação do *Fondo NextTech*, que busca mobilizar até €4 bilhões para projetos digitais sustentáveis (PNAV, 2022, p. 28). Essa lógica aproxima-se da proposta formulada no próprio plano de que a IA verde deve funcionar como *palanca de cambio* - ou seja, como alavanca transformadora - para o reposicionamento econômico e ecológico dos setores produtivos. O PNAV propõe o financiamento de projetos colaborativos com alto impacto territorial e ambiental, como as *Redes Territoriales de Especialización Tecnológica (RETECH)*, com o objetivo de impulsionar tecnologias *verdes por diseño*, que contribuam tanto para a neutralidade climática quanto para a geração de empregos verdes, digitais e sustentáveis (PNAV, 2022, p. 28-29).

O Eixo 4 propõe a dinamização do mercado espanhol por meio dos Desafios *Green AI*, competições públicas voltadas à resolução de problemas ambientais concretos, com a geração de bases de dados abertas de alta qualidade (PNAV, 2022, p. 31-33). Esta estratégia estimula a participação de *startups*, pesquisadores e atores do terceiro setor, promovendo a inovação aberta e o fortalecimento de ecossistemas tecnológicos sustentáveis. A política de dados abertos prevista no programa reforça a lógica da *economia do dado* como motor da transformação digital verde, com potencial de estimular a circularidade da informação e a transparência algorítmica.

Teoricamente, o PNAV opera sob o paradigma da tecnologia verde (*Green Tech*), que compreende um conjunto de boas práticas e diretrizes voltadas à redução dos impactos ambientais das tecnologias digitais, promovendo a eficiência no uso de recursos computacionais, a neutralidade climática e o uso de energia renovável (PNAV, 2022, p. 14). A participação da Espanha na *European Green Digital Coalition*

e seu alinhamento ao *Pacto Verde Europeu* evidenciam a adesão a um modelo regulatório que reconhece os riscos ambientais da transformação digital, mas que aposta na sua reversibilidade tecnológica e institucional.

Em suma, o Programa Nacional de Algoritmos Verdes representa um esforço relevante de governança sustentável da IA, combinando instrumentos de fomento, regulação voluntária e participação multissetorial. Sua lógica remete à formulação de políticas públicas orientadas por dados, sustentabilidade e inovação inclusiva, alinhadas aos objetivos da transição ecológica e da transformação digital da União Europeia.

Conclusões

A pesquisa confirma a hipótese de que os princípios da IA Verde (*Green AI*) oferecem um caminho viável e necessário para conciliar inovação tecnológica com sustentabilidade ambiental. Longe de representar um obstáculo ao progresso técnico, a adoção de práticas voltadas à eficiência energética, rastreamento de emissões, modularização de sistemas e reaproveitamento de modelos pré-treinados mostra-se compatível com os objetivos de desempenho computacional e competitividade global. A literatura especializada, aliada às diretrizes normativas emergentes da União Europeia, especialmente por meio do *AI Act*, e às iniciativas de políticas públicas como o *Programa Nacional de Algoritmos Verdes (PNAV)* da Espanha, atesta que uma governança ambientalmente responsável da IA é não apenas tecnicamente exequível, mas politicamente urgente e juridicamente justificável.

A análise da problemática central - como reduzir os impactos ambientais das tecnologias algorítmicas sem comprometer sua eficiência e capacidade de inovação - revelou que tal equilíbrio depende da adoção de uma abordagem normativa expandida, que vá além da lógica puramente técnica ou de mercado. A *Green AI* opera, nesse sentido, como uma inflexão crítica no modelo dominante da chamada *Red AI*, rompendo com a ideia de que a busca por acurácia e desempenho deve ocorrer a qualquer custo. A proposta de uma IA ambientalmente consciente articula os valores da sustentabilidade com os princípios da ética algorítmica, da governança digital democrática e do constitucionalismo tecnológico. Isso implica, conforme aponta Gregorio (2022), o reconhecimento de que o poder computacional deve ser submetido

ao controle democrático e aos imperativos de justiça intergeracional, especialmente diante da emergência climática.

Do ponto de vista normativo, o *AI Act* europeu representa um marco na tentativa de institucionalizar um modelo de regulação da IA centrado no ser humano (*human-centric approach*), mas também sensível às externalidades ecológicas da digitalização intensiva. A inclusão de princípios ambientais - como a eficiência no uso de recursos, a minimização da pegada ecológica e o princípio da precaução - demonstra que a sustentabilidade deixou de ser uma dimensão periférica e passou a ocupar posição central na definição da legitimidade dos sistemas algorítmicos. A exigência de avaliações de impacto algorítmico (*Algorithmic Impact Assessments – AIA*), ainda que voltadas prioritariamente aos Direitos Fundamentais, abre espaço para a incorporação de critérios ambientais como elementos estruturantes da conformidade regulatória. Trata-se de uma reconfiguração do próprio conceito de risco tecnológico, que passa a incluir, além dos danos sociais e individuais, os impactos ecológicos e coletivos.

No campo das políticas públicas, o PNAV espanhol oferece um exemplo concreto de como a sustentabilidade pode ser integrada de forma transversal a todo o ciclo de vida da IA. Com seus quatro eixos estratégicos - pesquisa científica, infraestrutura eficiente, integração ao setor produtivo e dinamização do mercado -, o plano propõe instrumentos concretos como selos de qualidade verde, certificações de eficiência energética, incentivos à inovação orientada à transição ecológica e promoção de ecossistemas digitais sustentáveis. Além disso, destaca-se a relevância da criação de métricas e ferramentas padronizadas para medir o consumo energético e a pegada de carbono dos sistemas de IA, o que responde diretamente a uma das principais lacunas identificadas pela literatura: a ausência de critérios objetivos que possibilitem comparar e classificar soluções tecnológicas segundo sua sustentabilidade ambiental.

Apesar dos avanços identificados, a pesquisa também evidencia desafios significativos. A ausência de padrões técnicos internacionais, a resistência de parte do setor privado à adoção de práticas sustentáveis, os altos custos iniciais de soluções verdes e a concentração de infraestrutura computacional em grandes corporações são barreiras que ainda limitam a difusão da *Green AI*. Além disso, persistem desigualdades estruturais quanto ao acesso a tecnologias sustentáveis, tanto entre países quanto entre setores econômicos, o que reforça a necessidade de um marco

regulatório internacional capaz de garantir equidade e justiça ambiental no processo de transição digital.

Por fim, constata-se que a consolidação da IA Verde exige um esforço coordenado entre governos, setor privado, academia e sociedade civil. Trata-se de um novo paradigma tecnológico que articula ciência, direito e ética, orientado por valores públicos como responsabilidade, transparência, equidade e proteção ambiental. A *Green AI* não é apenas uma tendência emergente no campo da inovação, mas um imperativo normativo e civilizatório. Em um contexto global marcado pela urgência climática e pela crescente digitalização de todos os domínios da vida social, a sustentabilidade algorítmica deve ser compreendida como condição de legitimidade das tecnologias emergentes e como fundamento para uma nova economia digital comprometida com a vida, a justiça e o futuro.

Além de suas implicações ambientais diretas, a *Green AI* pode ser compreendida como um instrumento estratégico de promoção da soberania digital e da justiça ambiental. Em um cenário global caracterizado pela assimetria na produção e controle de tecnologias avançadas, a promoção de uma IA sustentável e acessível pode contribuir para reequilibrar as relações entre países centrais e periféricos, democratizando o acesso à inovação verde e evitando que os custos ambientais da digitalização sejam desproporcionalmente arcados por regiões menos desenvolvidas. Nesse sentido, políticas públicas como o PNAV e mecanismos regulatórios como o *AI Act* apontam para um modelo de governança que articula responsabilidade ambiental com autonomia tecnológica, reforçando a capacidade dos Estados de estabelecer limites ao poder algorítmico e de fomentar ecossistemas de inovação alinhados aos interesses coletivos. Assim, a IA verde não deve ser vista apenas como um conjunto de boas práticas técnicas, mas como um vetor político de transformação estrutural das relações entre tecnologia, território e meio ambiente.

Também se identificou o avanço de ferramentas de rastreabilidade da pegada de carbono algorítmica, com destaque para plataformas como *ML CO₂ Impact* e *CodeCarbon*, que permitem mensurar em tempo real o consumo energético e a emissão de carbono associada ao treinamento e à execução de modelos de aprendizado de máquina (Hugging Face, 2022). Tais instrumentos tornam mais transparente o impacto ambiental das decisões técnicas, permitindo escolhas mais conscientes tanto por parte dos desenvolvedores quanto de empresas contratantes de serviços baseados em IA (Schwartz *et al.*, 2020, p. 56).

Referências

Comissão Europeia. *O Pacto Ecológico Europeu*. Bruxelas: Comissão Europeia, 2019. (COM(2019) 640 final). Disponível em: http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:b828d165-1c22-11ea-8c1f-01aa75ed71a1.0008.02/DOC_1&format=PDF. Acesso em: 14 maio 2025.

Comissão Europeia. *Proposta de Regulamento do Parlamento Europeu e do Conselho que estabelece regras harmonizadas em matéria de inteligência artificial (AI Act) e altera certos atos legislativos da União*. Bruxelas, COM(2021) 206 final, 21 abr. 2021. Disponível em: http://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:e0649735-a372-11eb-9585-01aa75ed71a1.0004.02/DOC_1&format=PDF. Acesso em: 14 maio 2025.

Costa, Miriam Rodrigues. *Inteligencia Artificial Verde. Estudios de Economia y Empresa*. Barcelona: Universitat Oberta de Catalunya. <http://hdl.handle.net/10609/151151>. Acesso em: 12 maio 2025.

Cowls, Josh; Tsamados, Alex; Taddeo, Mariarosaria; Floridi, Luciano. The AI gambit: leveraging artificial intelligence to combat climate change - opportunities, challenges, and recommendations. *AI & Society*, [S.l.], v. 38, p. 1–17, 2021. DOI: <http://doi.org/10.1007/s00146-021-01294-x>. Acesso em: 12 maio 2025.

Ferraro, Vívian R. G.; Gullo, Gabriel; Costa, Daniel da Silva; Moura, Pedro Nuno de S. Aprendizagem profunda e inteligência artificial verde: caminhos para um futuro mais sustentável. In: Workshop de Computação Aplicada à Gestão do Meio Ambiente e Recursos Naturais - WCAMA, 15., 2024, Brasília. *Anais....* Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Computação, 2024. p. 159-168. ISSN 2595-6124. DOI: <http://doi.org/10.5753/wcama.2024.3033>. Acesso em: 12 maio 2025.

Floridi, Luciano; Cowls, Josh. A unified framework of five principles for AI in society. *Harvard Data Science Review*, v. 1, n. 1, 2019. Disponível em: <http://doi.org/10.1162/99608f92.8cd550d1>. Acesso em: 14 maio 2025.

Gobierno de España. (2022). *Programa Nacional de Algoritmos Verdes*. Secretaría de Estado de Digitalización e Inteligencia Artificial. Disponível em: http://portal.mineco.gob.es/RecursosNoticia/mineco/prensa/noticias/2022/20221213_plan_algoritmos_verdes.pdf. Acesso em: 14 maio 2025.

Gregorio, Giovanni de. *Digital constitutionalism in Europe: Reframing rights and powers in the algorithmic society*. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009071215. Disponível em: http://www.cambridge.org/core/services/aop-cambridge-core/content/view/A3F61C6368D17D953457234B8A59C502/9781316512777AR.pdf/Digital_Constitutionalism_in_Europe.pdf?event-type=FTLA. Acesso em: 14 maio 2025.

Heaven, Will Douglas. Training a single AI model can emit as much carbon as five cars in their lifetimes. *MIT Technology Review*, [S.l.], 06 jun. 2019. Disponível em: <http://www.technologyreview.com/2019/06/06/239031>. Acesso em: 12 maio 2025.

High-level expert group on Artificial Intelligence. *Ethics Guidelines for Trustworthy AI*. Bruxelas: European Commission, 2019. Disponível em: <http://digital-strategy.ec.europa.eu/en/library/ethics-guidelines-trustworthy-ai>. Acesso em: 14 maio 2025.

Hugging Face. Carbon emissions tracker. *Hugging Face Spaces*, 2022. Disponível em: <http://huggingface.co/spaces/mlco2/impact>. Acesso em: 12 maio 2025.

Mantelero, Alessandro. Beyond data: Human rights, ethical and social impact assessment in AI. *Information Technology and Law Series*, v. 36, Leiden University: Springer, 2022. Disponível em: <http://iasalut.cat/wp-content/uploads/2023/02/Beyond-Data-Human-Rights-Ethical-and-Social-Impact-Assessment-in-AI.pdf>. Acesso em: 14 maio 2025.

Schwartz, Roy; Dodge, Jesse; Smith, Noah A.; Etzioni, Oren. Green AI. *Communications of the ACM*, New York, v. 63, n. 12, p. 54–63, 2020. DOI: <http://doi.org/10.1145/3381831>. Acesso em: 12 maio 2025.

Strubell, Emma; Ganesh, Ananya; McCallum, Andrew. Energy and policy considerations for deep learning in NLP. *arXiv*, Ithaca, 2019. Pré-publicação. Disponível em: <http://arxiv.org/abs/1906.02243>. Acesso em: 12 maio 2025.