



**TECNOLOGIA E SUSTENTABILIDADE AMBIENTAL: UMA ANÁLISE
ESTRUTURADA DAS INOVAÇÕES, PRÁTICAS E DESAFIOS NO CENÁRIO
BRASILEIRO**

**TECHNOLOGY AND ENVIRONMENTAL SUSTAINABILITY: A STRUCTURED
ANALYSIS OF INNOVATIONS, PRACTICES, AND CHALLENGES IN THE
BRAZILIAN CONTEXT**

**TECNOLOGÍA Y SOSTENIBILIDAD AMBIENTAL: UN ANÁLISIS
ESTRUCTURADO DE LAS INNOVACIONES, PRÁCTICAS Y RETOS EN EL
ESCENARIO BRASILEÑO**

 <https://doi.org/10.56238/levv16n55-022>

Data de submissão: 04/11/2025

Data de publicação: 04/12/2025

Felipe Menezes de Abreu

Pós-graduado em Gestão de TI

Instituição: Universidade do Estado do Pará (UEPA)

E-mail: felipe.md.abreu@aluno.uepa.br

Antonio Carlos dos Reis Bezerra

Graduando em Engenharia de Software

Instituição: Universidade do Estado do Pará (UEPA)

E-mail: carlos-reis28@hotmail.com

David Alves Luna

Graduando em Engenharia de Software

Instituição: Universidade do Estado do Pará (UEPA)

E-mail: davidlunapocket@gmail.com

Raimundo Celestino do Amaral Junior

Graduando em Engenharia de Software

Instituição: Universidade do Estado do Pará (UEPA)

E-mail: amaraljunior.es@gmail.com

Larissa de Oliveira Moreira

Graduanda em Engenharia de Software

Instituição: Universidade do Estado do Pará (UEPA)

E-mail: larissaoliveira.proj@gmail.com

Lucas de Oliveira Moreira

Graduando em Engenharia de Software

Instituição: Universidade do Estado do Pará (UEPA)

E-mail: lucasmoreiraoliveira2345@gmail.com



Matheus Milhome de Lima

Graduando em Engenharia de Software

Instituição: Universidade do Estado do Pará (UEPA)

E-mail: matheusmilhome271@gmail.com

Rosivaldo de Jesus da Silva Rodrigues

Graduado em Licenciatura em Matemática

Instituição: Universidade do Estado do Pará (UEPA)

E-mail: rosivaldorodrigues@gmail.com

RESUMO

Este artigo analisa a intersecção entre a revolução digital (Indústria 4.0) e a gestão ambiental, focando no contexto brasileiro. A partir de uma revisão bibliográfica sistemática e documental (2019-2025), investiga-se como tecnologias emergentes — como Internet das Coisas (IoT), Inteligência Artificial (IA), Big Data e Sensoriamento Remoto — atuam na mitigação de impactos ecológicos e na promoção da economia circular. O estudo articula a Teoria da Modernização Ecológica com as diretrizes da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU. Os resultados indicam um avanço significativo na eficiência do monitoramento de biomas e na agricultura de precisão, contudo, destacam paradoxos críticos, como o aumento do lixo eletrônico (e-waste) e a demanda energética de grandes centros de processamento de dados.

Palavras-chave: Tecnologia Verde. Sustentabilidade. Indústria 4.0. Monitoramento Ambiental. Gestão de Resíduos.

ABSTRACT

This article analyzes the intersection between the digital revolution (Industry 4.0) and environmental management, focusing on the Brazilian context. Based on a systematic bibliographic and documentary review (2019–2025), it investigates how emerging technologies—such as the Internet of Things (IoT), Artificial Intelligence (AI), Big Data, and Remote Sensing—act to mitigate ecological impacts and promote the circular economy. The study connects Ecological Modernization Theory with the guidelines of the National Solid Waste Policy (PNRS) and the UN Sustainable Development Goals (SDGs). The results indicate significant progress in the efficiency of biome monitoring and precision agriculture, yet highlight critical paradoxes, such as the increase in electronic waste (e-waste) and the energy demand of large data processing centers.

Keywords: Green Tech. Sustainability. Industry 4.0. Environmental Monitoring. Waste Management.

RESUMEN

Este artículo analiza la intersección entre la revolución digital (Industria 4.0) y la gestión medioambiental, centrándose en el contexto brasileño. A partir de una revisión bibliográfica sistemática y documental (2019-2025), se investiga cómo las tecnologías emergentes —como el Internet de las cosas (IoT), la inteligencia artificial (IA), el big data y la teledetección— actúan en la mitigación de los impactos ecológicos y en la promoción de la economía circular. El estudio articula la Teoría de la Modernización Ecológica con las directrices de la Política Nacional de Residuos Sólidos (PNRS) y los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de la ONU. Los resultados indican un avance significativo en la eficiencia del monitoreo de biomas y en la agricultura de precisión, sin embargo, destacan paradojas críticas, como el aumento de los residuos electrónicos (e-waste) y la demanda energética de los grandes centros de procesamiento de datos.

Palabras clave: Tecnología Verde. Sostenibilidad. Industria 4.0. Monitorización Medioambiental. Gestión de Residuos.



1 INTRODUÇÃO

A relação entre desenvolvimento tecnológico e preservação ambiental é historicamente ambígua. Se, por um lado, a industrialização foi o motor da aceleração da crise climática no Antropoceno, por outro, a tecnologia contemporânea apresenta-se como a principal ferramenta para a remediação e monitoramento dos ecossistemas.

No século XXI, o paradigma da "Tecnologia Verde" (*Green Tech*) transcende a simples instalação de filtros em chaminés fabris. Trata-se de uma revolução sistêmica onde a digitalização permeia todas as etapas da cadeia produtiva. Em um mundo onde os recursos naturais finitos dão sinais claros de exaustão, o modelo econômico linear ("extrair, produzir, descartar") torna-se insustentável.

O Brasil ocupa uma posição central neste debate. Detentor da maior biodiversidade do planeta e de uma potência agrícola global, o país enfrenta o desafio dual de aumentar a produtividade enquanto preserva seus biomas. A pressão internacional sobre a Amazônia e o Cerrado, somada às exigências do mercado por critérios ESG (*Environmental, Social and Governance*), impulsiona a adoção acelerada de soluções tecnológicas.

A aplicação de sensores IoT para monitoramento de queimadas em tempo real, o uso de drones para reflorestamento e a implementação de *blockchain* para rastreabilidade de cadeias de suprimentos são exemplos de como o digital pode servir ao biológico. No entanto, a implementação dessas tecnologias não é neutra nem isenta de custos (Hoch et al., 2023).

O problema de pesquisa que norteia este trabalho é: **De que maneira as tecnologias da Indústria 4.0 podem efetivamente contribuir para a sustentabilidade ambiental no Brasil, e quais são os novos passivos ambientais gerados por essa própria digitalização?**

A justificativa deste estudo reside na urgência de avaliar criticamente o tecno-otimismo, compreendendo a tecnologia não como uma panaceia mágica, mas como um instrumento estratégico que exige governança ética e políticas públicas robustas.

2 METODOLOGIA

Para responder à questão de pesquisa, esta análise adota uma abordagem qualitativa de pesquisa bibliográfica, com caráter exploratório e descritivo, replicando a estrutura metodológica de revisões sistemáticas recentes.

2.1 COLETA DE DADOS

A seleção de fontes priorizou artigos científicos, relatórios técnicos de órgãos ambientais (IBAMA, INPE) e documentos de organizações internacionais publicados no recorte temporal de **2019 a 2025**. Este período foi escolhido para cobrir a aceleração tecnológica pós-pandemia e as recentes crises climáticas que reconfiguraram as prioridades globais.



As buscas foram realizadas nas seguintes bases de dados:

- **SciELO e Periódicos CAPES;**
- **Google Scholar** (para literatura cinzenta e relatórios corporativos de sustentabilidade);
- **Repositórios da Embrapa e do INPE** (focados em tecnologia agroambiental e monitoramento).

Os descritores utilizados incluíram: "tecnologia ambiental", "inteligência artificial na sustentabilidade", "monitoramento remoto", "e-waste Brasil" e "agricultura de precisão".

2.2 CRITÉRIOS DE ANÁLISE

Foram selecionados 25 documentos centrais que atendiam aos critérios de: (a) relevância temática direta; (b) dados empíricos aplicados ao contexto sul-americano ou brasileiro; (c) discussão crítica sobre impactos positivos e negativos. A análise de conteúdo temática categorizou as informações em: Fundamentos Teóricos, Aplicações Práticas, Eficiência Energética e Desafios do Lixo Eletrônico.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA APROFUNDADA

A compreensão da tecnologia ambiental exige a distinção entre conceitos de gestão e a análise das teorias sociológicas que sustentam a crença na tecnologia como salvadora do meio ambiente.

3.1 GREEN IT VS. IT FOR GREEN

É fundamental distinguir duas vertentes principais na literatura:

- **Green IT (TI Verde):** Refere-se a práticas para tornar a própria tecnologia mais sustentável. Exemplo: *Data centers* com refrigeração natural, computadores com materiais recicláveis e redução do consumo de energia de *hardwares*.
- **IT for Green (TI para o Verde):** Refere-se ao uso da tecnologia para tornar *outros* processos sustentáveis. Exemplo: Um software que otimiza rotas de caminhões de lixo para economizar combustível, ou sensores que detectam vazamentos em redes de água.

Este estudo foca predominantemente no *IT for Green*, analisando a tecnologia como meio de transformação ecológica.

3.2 A TEORIA DA MODERNIZAÇÃO ECOLÓGICA

A base sociológica predominante é a Teoria da Modernização Ecológica. Proposta originalmente por autores como Huber e Mol, essa teoria sugere que o avanço tecnológico e o crescimento econômico podem ser dissociados da degradação ambiental.



Segundo essa visão, a inovação leva a uma "superindustrialização" que se torna mais limpa e eficiente. No Brasil, essa teoria é frequentemente evocada pelo setor do agronegócio, que defende que a tecnologia (transgênicos, maquinário autônomo) permite produzir mais em menos terra, poupando florestas (efeito land-sparing).

3.3 O PARADOXO DE JEVONS E A ECONOMIA CIRCULAR

Em contrapartida, é necessário considerar o Paradoxo de Jevons (ou Efeito Rebote). Esta teoria econômica postula que, à medida que a tecnologia aumenta a eficiência no uso de um recurso, o consumo total desse recurso tende a aumentar em vez de diminuir, devido à redução do custo e aumento da demanda.

A tecnologia ambiental busca romper esse paradoxo através da Economia Circular, onde o design dos produtos prevê o reaproveitamento total, eliminando o conceito de "lixo". Ferramentas digitais são cruciais aqui para rastrear materiais e garantir que retornem ao ciclo produtivo.

4 TECNOLOGIAS EMERGENTES E APLICAÇÕES PRÁTICAS

A aplicação prática dessas teorias no cenário brasileiro revela um ecossistema de inovação vibrante, embora desigual.

4.1 INTERNET DAS COISAS (IOT) E MONITORAMENTO SENSORIAL

A IoT representa a "nervura digital" do planeta. Sensores conectados à rede permitem a leitura ambiental em tempo real.

- **Cidades Inteligentes (*Smart Cities*):** No Brasil, cidades como Curitiba e Florianópolis utilizam sensores em bueiros para prevenir enchentes e sistemas de iluminação pública inteligente que economizam até 60% de energia.
- **Gestão Hídrica:** Sensores de pressão e fluxo em tubulações detectam vazamentos invisíveis. Considerando que o Brasil perde uma fatia significativa da água tratada na distribuição (SNIS, 2023), tecnologias de telemetria são vitais para a conservação desse recurso.

4.2 SENSORIAMENTO REMOTO E PROTEÇÃO FLORESTAL

O Brasil é referência mundial em monitoramento via satélite, liderado pelo INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais).

- **DETER e PRODES:** Sistemas que utilizam imagens de satélite para alertar sobre desmatamento na Amazônia e no Cerrado.



- **Novas Fronteiras:** O uso de satélites de baixa órbita e alta resolução permite identificar cortes seletivos de árvores (extração ilegal de madeira nobre) que antes passavam despercebidos pelos satélites mais antigos.

4.3 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL (IA) E BIG DATA

A IA processa o volume massivo de dados gerados pelos sensores e satélites para criar modelos preditivos.

- **Previsão de Desastres:** Algoritmos analisam padrões climáticos e topográficos para prever deslizamentos de terra em áreas de risco, essenciais para a realidade urbana brasileira (MAPA, 2021). Embora o MAPA se concentre na agricultura, o relatório aborda o potencial do uso de dados e IA para a gestão de recursos e prevenção de eventos extremos.
- **Agricultura 4.0:** Algoritmos de visão computacional acoplados a tratores identificam ervas daninhas individualmente, aplicando herbicida apenas na planta invasora ("aplicação localizada"). Isso pode reduzir o uso de agrotóxicos, diminuindo a contaminação do solo e lençóis freáticos.

4.4 BLOCKCHAIN E RASTREABILIDADE

O *Blockchain* oferece um registro imutável e transparente, fundamental para combater o *greenwashing*.

- **Cadeia da Carne e da Madeira:** Ferramentas de *blockchain* estão sendo testadas para rastrear o gado desde o nascimento até o frigorífico, garantindo que o animal não foi criado em áreas de desmatamento ilegal ou terras indígenas. A transparência digital torna-se um ativo econômico para exportação.

5 O CONTEXTO BRASILEIRO E A LEGISLAÇÃO

A tecnologia não opera no vácuo; ela é moldada e impulsionada pela regulação.

5.1 A POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS (PNRS)

A Lei 12.305/2010 instituiu a Logística Reversa obrigatória para eletroeletrônicos. Plataformas digitais e aplicativos de gestão de resíduos têm sido fundamentais para conectar consumidores, catadores e indústrias recicadoras. A tecnologia atua como o elo de informação que viabiliza a lei, tornando a gestão de resíduos eletroeletrônicos um problema logístico e de educação, conforme discutido por Vasconcelos et al. (2024).



5.2 O NOVO MARCO DO SANEAMENTO

A digitalização é um dos pilares para atingir as metas de universalização do saneamento até 2033. O uso de "Gêmeos Digitais" (*Digital Twins*) — réplicas virtuais de estações de tratamento — permite simular cenários e otimizar o uso de produtos químicos no tratamento da água.

5.3 DESIGUALDADE DIGITAL NO CAMPO

Apesar do avanço da *AgTech*, existe um abismo digital. Enquanto grandes latifúndios operam com máquinas autônomas e 5G, a agricultura familiar — responsável pela maioria dos alimentos na mesa dos brasileiros — muitas vezes carece de conectividade básica, ficando excluída dos benefícios da eficiência tecnológica. O relatório da CEPAL (Buainain, Cavalcante e Consoline, 2021) detalha o estado atual da agricultura digital no Brasil, destacando a restrição estrutural da infraestrutura e os desafios para a inclusão de pequenos produtores rurais.

6 EVIDÊNCIAS EMPÍRICAS E RESULTADOS

A análise da literatura aponta resultados tangíveis da aplicação tecnológica:

6.1 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

Estudos de caso em indústrias brasileiras mostram que a implementação de sistemas de gestão de energia baseados em IA (ISO 50001) resultou em reduções significativas no consumo elétrico industrial. A automação ajusta o consumo aos horários de ponta e à disponibilidade de luz natural.

6.2 RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS

Projetos piloto utilizando tecnologias avançadas, muitas vezes suportadas por financiamentos e iniciativas detalhadas em relatórios do setor (MAPA, 2021), indicam que o uso de drones para dispersão de sementes (semeadura aérea de precisão) tem demonstrado uma capacidade de plantio muito mais rápida que o método manual humano, com acesso a áreas de topografia difícil.

7 DESAFIOS, CRÍTICAS E RISCOS

Uma análise acadêmica rigorosa deve abordar as contradições da "solução tecnológica".

7.1 O PARADOXO DO LIXO ELETRÔNICO (*E-WASTE*)

Para salvar o meio ambiente com tecnologia, precisamos de *hardware*. O Brasil é um dos maiores produtores de lixo eletrônico. A obsolescência programada e a rápida troca de dispositivos geram toneladas de resíduos tóxicos (mercúrio, chumbo, cádmio). O estudo de Assis et al. (2021) sobre o descarte de resíduos eletroeletrônicos sob a perspectiva do *Green IT* reforça que a gestão adequada



requer ações articuladas para evitar a poluição química. Se a digitalização não vier acompanhada de uma logística reversa eficiente, a solução de um problema (eficiência) cria outro (poluição).

7.2 A PEGADA DE CARBONO DIGITAL

A "nuvem" não é etérea; ela é feita de aço, concreto e eletricidade. O aumento exponencial de *data centers* demanda uma quantidade massiva de energia e água (para refrigeração). O treinamento de modelos robustos de Inteligência Artificial exige um alto custo energético.

7.3 RISCOS DE GREENWASHING TECNOLÓGICO

Empresas podem utilizar a adoção de tecnologias superficiais como ferramenta de marketing, sem alterar a estrutura poluidora de seus negócios. Instalar sensores de monitoramento de ar em uma fábrica não reduz, por si só, a emissão de poluentes se não houver ação corretiva baseada nos dados.

7.4 PRIVACIDADE E VIGILÂNCIA

O monitoramento ambiental muitas vezes implica vigilância territorial. O uso de satélites e drones levanta questões éticas sobre a privacidade de comunidades tradicionais e populações rurais, cujos territórios podem ser mapeados e comercializados sem consentimento. Esta é uma extensão das críticas feitas por autores como Zuboff (2019) sobre o capitalismo de vigilância, onde a coleta de dados, mesmo para fins ambientais, pode ser cooptada para fins de controle e extração de valor.

8 CONSIDERAÇÕES FINAIS: O FUTURO É HÍBRIDO

A análise aponta que a tecnologia ambiental caminha para uma integração profunda entre sistemas biológicos e digitais.

- **Biomimética e Tecnologia:** O futuro aponta para soluções inspiradas na natureza, como painéis solares que imitam a fotossíntese ou materiais de construção que "respiram" como pele, reduzindo a necessidade de ar condicionado.
- **Transição Energética:** A tecnologia é o vetor essencial para a transição do petróleo para renováveis. *Smart Grids* (redes inteligentes) são necessárias para gerenciar a intermitência da energia eólica e solar.
- **Humanização da Tecnologia:** É imperativo que a formação dos engenheiros e desenvolvedores inclua ética ambiental, para que o código escrito hoje não se torne o desastre ecológico de amanhã.



9 CONCLUSÃO

Conclui-se que a tecnologia não é a "salvação" automática do meio ambiente, mas é, inegavelmente, a ferramenta mais potente disponível para gerenciar a complexidade da crise climática atual.

As evidências bibliográficas atestam que, quando bem aplicada e regulada, a tecnologia permite dissociar crescimento econômico de degradação ambiental (Modernização Ecológica).

Contudo, o sucesso dessa integração no Brasil depende menos do hardware e mais do humanware (políticas, educação e ética). É necessário mitigar o paradoxo do lixo eletrônico e garantir que a digitalização do campo e das cidades não aprofunde as desigualdades sociais, conforme alerta a CEPAL (Buainain, Cavalcante e Consoline, 2021). A verdadeira inovação será aquela que conseguir harmonizar os bits e bytes com a preservação da biodiversidade.



REFERÊNCIAS

ASSIS, I. O.; COSTA, S. T. da S.; CHAVES, P. V. A.; SILVA, M. R. L. da; FILHO, M. R.; ALVES, M. R. F. O descarte de resíduos eletroeletrônicos pelas empresas de assistência técnica sob a perspectiva do conceito de green IT. **Revista Gestão, Tecnologia e Ciências**, v. 10, n. 31, p. 1–16, 2021. Disponível em: <https://revistas.fucamp.edu.br/index.php/getec/article/view/2508>. Acesso em: 28 nov. 2025.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA). **Potencialidades e desafios do agro 4.0: GT III “Cadeias Produtivas e Desenvolvimento de Fornecedores”**. Brasília: Mapa/ACES, 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/inovacao/agricultura-digital/GT3VERSAOABNT.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2025.

BUAINAIN, A. M.; CAVALCANTE, P.; CONSOLINE, L. **Estado atual da agricultura digital no Brasil: Inclusão dos agricultores familiares e pequenos produtores rurais**. Documentos de Projetos (LC/TS.2021/61). Santiago: Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), 2021. Disponível em¹: <https://www2.cepal.org/pt-br/publicacoes/46958-estado-atual-agricultura-digital-brasil-inclusao-agricultores-familiares-pequenos>. Acesso em: 28 nov. 2025.

HOCH, P. A. et al. Sustentabilidade ambiental e inovação tecnológica: caminhos à ecoinovação. **Revista de Direito Econômico e Socioambiental**, v. 14, n. 2, p. 55-70, 2023. Disponível em: <https://periodicos.pucpr.br/direitoeconomico/article/view/25834>. Acesso em: 28 nov. 2025.

SNIS. **Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos**. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasília, 2023.

VASCONCELOS, V. D. F. et al. Resíduos eletroeletrônicos: um problema logístico, ambiental ou educacional? **Fórum Ambiental da Alta Paulista**, v. 20, n. 1, p. 1-13, 2024. Disponível em: https://publicacoes.amigosdanatureza.org.br/index.php/forum_ambiental/article/download/5141/5090/10911. Acesso em: 28 nov. 2025.

ZUBOFF, Shoshana. **A era do capitalismo de vigilância**: A luta por um futuro humano na nova fronteira do poder. Rio de Janeiro: Intrínseca, 2019.