

# INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL COMO CATALISADORA DA INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL: INTERSECÇÕES COM A ECONOMIA CIRCULAR

**TIAGO ESTRELA DA CUNHA MORAES**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" - UNESP BAURU

**ADRIANO ALVES TEIXEIRA**

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL

**TALITA BORGES TEIXEIRA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" - UNESP BAURU

**MARCOS MEURER DA SILVA**

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO" - UNESP BAURU

**ADRIANO PEREIRA DOS SANTOS**

## Introdução

A crescente complexidade dos desafios ambientais e econômicos impulsiona a busca por modelos capazes de promover eficiência no uso de recursos e redução de impactos. A Economia Circular (EC) emerge como estratégia central para a transição sustentável (Kirchherr et al., 2017, Geissdoerfer et al., 2017, Stahel, 2016). Avanços da Inteligência Artificial (IA) catalisam a inovação (Bonakdari et al., 2025, Jan et al., 2025, Balogun et al., 2025). Revisão de 63 artigos mostra predominância em modelagem preditiva, resíduos, agroindústria e cidades, mas aponta lacunas em PMEs e países emergentes.

## Problema de Pesquisa e Objetivo

O problema de pesquisa está na escassez de evidências sobre como a Inteligência Artificial (IA) contribui de forma integrada para a Economia Circular (EC), sobretudo em pequenas e médias empresas e em países emergentes, onde barreiras tecnológicas e de dados limitam sua adoção. Assim, o objetivo é revisar sistematicamente a literatura para identificar aplicações da IA na EC, destacando benefícios, limitações e oportunidades de pesquisa para fortalecer a transição sustentável

## Fundamentação Teórica

A Economia Circular (EC) contrapõe-se ao modelo linear, equilibrando economia, ambiente e sociedade (Kristensen; Mosgaard, 2020; Bakker et al., 2021). É sistema reparador, gerador de inovação e empregos (Sehnm; Pereira, 2019), com redução de custos e competitividade (Zemanová, 2023). Envolve redes produtivas (Murray et al., 2017), prolonga a vida útil (Vanegas et al., 2017), mas enfrenta barreiras tecnológicas (Jabbour et al., 2020; Kumar et al., 2019). A IA pode apoiar (Bag et al., 2020), embora as interações com Indústria 4.0 ainda careçam de clareza (Mardani et al., 2022).

## Metodologia

Para compreender como a IA atua como catalisadora da inovação sustentável em modelos de EC, realizou-se revisão sistemática da literatura, seguindo diretrizes de Lages Junior e Godinho Filho (2010), aplicadas por Jabbour (2013) e Teixeira et al. (2025). A busca, em setembro/2025, na Scopus, utilizou "circular economy" AND "artificial intelligence" e variações. Identificaram-se 71 artigos, restando 63 após exclusões, seguindo PRISMA (Moher et al., 2009). A análise usou estatística descritiva (Excel), bibliometria (VOSviewer, Bibliometrix) e classificação de Lages Junior e Godinho Filho (2010).

## Análise e Discussão dos Resultados

A análise dos 63 artigos evidencia a IA como alavanca para inovação em EC, otimizando processos, prevendo cenários e apoiando decisões. Técnicas como machine learning, deep learning, Random Forest e SHAP aplicam-se a resíduos, logística, riscos ambientais e indicadores (Ranta et al., 2021; Bianchi et al., 2019; Rejeb et al., 2022). Referenciais como Kirchherr et al. (2017), Geissdoerfer et al. (2017), Stahel (2016), Su et al. (2013) e Ellen MacArthur Foundation sustentam a EC. Lacunas: PMEs, integração teórica, setores pouco explorados, interpretabilidade, social e escalabilidade

## Considerações Finais

A revisão mostra que a IA tem papel estratégico na EC, otimizando processos, prevendo cenários, mensurando impactos e apoiando novos modelos circulares. A EC consolida-se como referencial, somando teorias institucionais, capacidades dinâmicas e inovação sustentável. Há avanço de revisões para análises quantitativas, com machine learning, técnicas explicáveis e métodos mistos. Persistem limitações: escassez de dados, custos e foco em países desenvolvidos. Futuras pesquisas devem explorar contextos emergentes, integração teórica, interpretabilidade e impactos sociais.

## Referências

KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M. Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions. *Resources, Conservation & Recycling*, v. 127, p. 221-232, 2017. GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N. M. P.; HULTINK, E. J. The Circular Economy - A new sustainability paradigm? *Journal of Cleaner Production*, v. 143, p. 757-768, 2017. STAHEL, W. R. The circular economy. *Nature*, v. 531, n. 7595, p. 435-438, 2016

## Palavras Chave

Economia Circular, Inteligência Artificial, Inovação Sustentável

# INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL COMO CATALISADORA DA INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL: INTERSECÇÕES COM A ECONOMIA CIRCULAR

## 1 INTRODUÇÃO

A intensificação dos desafios ambientais e econômicos tem ampliado a necessidade de modelos produtivos capazes de reduzir impactos e aumentar a eficiência no uso de recursos, conforme destacado por pesquisas que analisam diferentes padrões de sustentabilidade em sistemas complexos (Li *et al.*, 2025, Chidepatil *et al.*, 2020). Nesse cenário, a Economia Circular (EC) tem emergido como uma estrutura estratégica ao propor ciclos fechados de materiais, regeneração de recursos e redução de resíduos, especialmente em setores como manufatura, energia e agroindústria (D'Amato *et al.*, 2017, Bianchini *et al.*, 2019).

Paralelamente, o avanço da Inteligência Artificial (IA) tem se consolidado como elemento central na transformação de sistemas produtivos ao permitir grande capacidade preditiva, integração de variáveis ambientais e otimização de processos complexos, como demonstrado por estudos de modelagem em múltiplos domínios (Bonakdari *et al.*, 2025, Reuter, 2023). Pesquisas recentes evidenciam que a IA amplia a performance de estratégias circulares ao apoiar decisões operacionais, prever falhas, melhorar fluxos materiais e integrar análises em tempo real, especialmente por meio de machine learning, redes neurais e técnicas avançadas de análise de dados (Balogun *et al.*, 2025, Rajput; Singh, 2020). Ainda, investigações no campo da bioenergia, resíduos sólidos e valorização de subprodutos industriais indicam que a IA possibilita maior eficiência, qualidade e escalabilidade em processos de reaproveitamento e reuso (Jan *et al.*, 2025, Selvam *et al.*, 2025, Bressanelli *et al.*, 2020).

Diante desse avanço, o presente artigo tem como objetivo revisar sistematicamente as formas pelas quais a Inteligência Artificial tem sido aplicada na Economia Circular, identificando padrões de uso, contribuições teóricas e lacunas presentes na literatura, alinhando-se ao esforço de pesquisas que buscam integrar modelos digitais e circulares em diferentes setores. Para isso, foi conduzida uma revisão sistemática internacional que identificou 63 artigos publicados até setembro de 2025, permitindo mapear tendências metodológicas e tecnológicas semelhantes às observadas em estudos que analisam transições digitais e circulares em escala global.

Os resultados encontrados revelam que a IA tem sido aplicada predominantemente em quatro grandes eixos: modelagem preditiva, otimização de desempenho, valorização de resíduos e gestão de recursos e sistemas inteligentes, ampliando a eficiência em setores como construção, agroindústria, bioenergia e saneamento (Balogun *et al.*, 2025, Jan *et al.*, 2025, Bonakdari *et al.*, 2025). Também foi identificado que a aplicação da IA contribui para integrar diferentes fontes de dados, construir indicadores de circularidade e apoiar a tomada de decisão em operações complexas, especialmente por meio de abordagens baseadas em machine learning e sensores inteligentes (Li *et al.*, 2025, Bianchini *et al.*, 2019).

Apesar dos avanços, a literatura aponta lacunas recorrentes relacionadas à escassez de estudos empíricos, limitações de replicabilidade, ausência de dados de regiões emergentes e falta de aplicações em pequenas e médias empresas, reforçando a demanda por pesquisas mais integradas, contextuais e transversais (D'Amato *et al.*, 2017, Chidepatil *et al.*, 2020, Rajput; Singh, 2020). Esses desafios revelam a necessidade de expandir abordagens interdisciplinares que combinem soluções digitais com estratégias circulares adaptadas a diferentes realidades socioeconômicas (Reuter, 2023, Bressanelli *et al.*, 2020).

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

### 2.1 ECONOMIA CIRCULAR

A Economia Circular (EC) consolidou-se como uma abordagem estratégica para enfrentar crises ambientais, otimizar recursos e promover sistemas produtivos regenerativos, conforme amplamente discutido em estudos que analisam práticas circulares em setores industriais, energéticos e de materiais (D'Amato *et al.*, 2017, Bianchini *et al.*, 2019). Pesquisas mostram que a EC busca substituir o modelo linear por fluxos circulares, nos quais o valor é mantido ao máximo por meio de reuso, reciclagem, remanufatura e extensão da vida útil dos produtos (Bakker *et al.*, 2021, Vanegas *et al.*, 2017).

Ressalta-se que a EC promove benefícios como geração de empregos, redução de custos, inovação e competitividade, aspectos observados em cadeias produtivas que utilizam resíduos industriais como insumo energético ou material (Selvam *et al.*, 2025, Jan *et al.*, 2025). Estudos recentes destacam ainda que a EC depende da articulação entre redes produtivas, políticas públicas e práticas éticas voltadas à sustentabilidade, ampliando impactos socioeconômicos positivos (Chidepatil *et al.*, 2020, Reuter, 2023).

Apesar do potencial, a literatura aponta diversas barreiras estruturais e tecnológicas, incluindo falta de infraestrutura, limitações de design circular, ausência de modelos replicáveis e dificuldade de integração entre atores das cadeias produtivas (Rajput; Singh, 2020, Bressanelli *et al.*, 2020). Pesquisas também evidenciam lacunas relacionadas à carência de dados empíricos, principalmente em países emergentes, o que limita o avanço de modelos circulares em setores estratégicos (Li *et al.*, 2025, Bonakdari *et al.*, 2025).

Outro desafio recorrente refere-se à necessidade de sistemas capazes de operar com alto nível de informação e monitoramento contínuo, especialmente em indústrias que dependem de avaliações em tempo real para operar circularmente, como mineração, saneamento e agroindústria (Reuter, 2023, Bonakdari *et al.*, 2025). Portanto, a literatura converge para a ideia de que a transição circular exige não apenas mudanças operacionais, mas também avanços tecnológicos capazes de lidar com a complexidade dos fluxos materiais e energéticos (Balogun *et al.*, 2025, Selvam *et al.*, 2025).

### 2.2 INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A Inteligência Artificial (IA) tem sido amplamente reconhecida como um conjunto de tecnologias capazes de aprender, prever padrões e apoiar decisões em cenários de alta complexidade, sendo aplicada em áreas como saneamento, energia, resíduos, construção e agricultura (Li *et al.*, 2025, Bonakdari *et al.*, 2025). Estudos mostram que algoritmos como Random Forest, redes neurais e modelos híbridos possuem capacidade elevada de prever comportamentos ambientais, otimizar processos e gerar análises robustas para sistemas produtivos (Li *et al.*, 2025, Balogun *et al.*, 2025).

Pesquisas também indicam que a IA atua como um hub de integração entre múltiplas variáveis operacionais, permitindo análises em tempo real capazes de apoiar decisões críticas em infraestrutura urbana e industrial (Reuter, 2023, Jan *et al.*, 2025). No campo do saneamento, por exemplo, a IA contribui para prever eficiência de tratamentos e otimizar parâmetros ambientais (Bonakdari *et al.*, 2025), enquanto na construção civil auxilia no design de estruturas mais eficientes e com maior potencial de desmontagem (Balogun *et al.*, 2025).

Na valorização de resíduos, estudos mostram que técnicas de machine learning podem identificar padrões de composição, prever rendimento energético e analisar a viabilidade de processos avançados de reaproveitamento (Selvam *et al.*, 2025, Chidepatil *et al.*, 2020). Outros trabalhos evidenciam que a IA melhora processos logísticos, reduz falhas, aperfeiçoa cadeias

produtivas e apoia decisões estratégicas que dependem de grande volume de informações (Bressanelli *et al.*, 2020, Rajput; Singh, 2020).

Apesar dos avanços, autores destacam lacunas importantes, como a falta de replicação de modelos, a dependência de grandes conjuntos de dados e a ausência de análises contextualizadas que considerem diferenças regionais e estruturas produtivas diversas (D’Amato *et al.*, 2017, Li *et al.*, 2025). Essas limitações indicam a necessidade de ampliar estudos empíricos e integrar abordagens computacionais com práticas industriais de forma mais consistente (Chidepatil *et al.*, 2020, Reuter, 2023).

### 2.3 INTERFACES ENTRE ECONOMIA CIRCULAR E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

A integração entre Inteligência Artificial e Economia Circular tem ganhado relevância, uma vez que a EC demanda ferramentas capazes de lidar com fluxos complexos de dados, monitorar ciclos de vida e apoiar decisões que envolvem múltiplos critérios ambientais e econômicos (Reuter, 2023, Bianchini *et al.*, 2019). Estudos demonstram que a IA pode fortalecer a EC ao prever geração de resíduos, otimizar processos de reaproveitamento, identificar oportunidades de simbiose industrial e apoiar o design de produtos com maior potencial circular (Jan *et al.*, 2025, Selvam *et al.*, 2025).

No entanto, pesquisas apontam que a IA amplia a eficiência na logística reversa, melhoram a rastreabilidade de materiais e favorecem o gerenciamento inteligente de recursos hídricos, energéticos e agrícolas, alinhando-se às necessidades da transição circular (Bonakdari *et al.*, 2025, Bressanelli *et al.*, 2020). A literatura também evidencia o papel da IA na criação de indicadores de circularidade, na modelagem de cenários e na integração de sistemas de monitoramento ambiental em tempo real (Li *et al.*, 2025, Balogun *et al.*, 2025).

Apesar do potencial, autores destacam que ainda existem lacunas significativas na compreensão das interfaces EC-IA, especialmente no que diz respeito à falta de modelos replicáveis, limitações de dados em países periféricos e fragilidades na conexão entre pesquisa computacional e práticas industriais (D’Amato *et al.*, 2017, Chidepatil *et al.*, 2020). Ainda, há escassez de estudos que investiguem o papel da IA em pequenos negócios e em regiões emergentes, aquelas que mais se beneficiariam de soluções circulares guiadas por dados (Rajput; Singh, 2020, Li *et al.*, 2025).

Logo, a literatura indica que o avanço das interfaces entre EC e IA requer abordagens interdisciplinares, integração tecnológica e ampliação das investigações empíricas, criando um campo fértil para pesquisas que combinem sustentabilidade, inovação digital e transformação produtiva em diferentes realidades socioeconômicas (Reuter, 2023, Bressanelli *et al.*, 2020).

## 3 MÉTODO

Com o objetivo de compreender como a IA tem sido aplicada como catalisadora da inovação sustentável em modelos de EC, realizou-se uma revisão sistemática da literatura, abordagem recomendada para mapear o estado da arte em campos emergentes e multidisciplinares. A estratégia adotada seguiu rigorosamente as diretrizes metodológicas propostas por Lages Junior e Godinho Filho (2010), posteriormente aplicadas em estudos consolidados de revisão por Jabbour (2013) e Teixeira *et al.* (2020; 2025), o que garante reprodutibilidade e solidez ao processo analítico.

A busca bibliográfica foi conduzida em setembro de 2025, contemplando as bases Scopus e Web of Science, ambas amplamente reconhecidas pela amplitude e qualidade dos periódicos indexados. Utilizaram-se as palavras-chave “circular economy” AND “artificial intelligence”, além de variações relacionadas às técnicas utilizadas no domínio da IA, tais como “machine learning” e “deep learning”, permitindo ampliar a cobertura dos estudos vinculados

à temática. Não foram adotados recortes temporais, de modo a contemplar toda a produção acadêmica disponível até o momento da coleta, incluindo títulos, resumos e palavras-chave.

A busca resultou em 108 artigos, sendo 59 recuperados na Scopus e 49 no Web of Science. Seguiu-se então a etapa de elegibilidade, com exclusão de duplicados, publicações sem acesso integral e estudos sem aderência ao escopo teórico-empírico da revisão. Após esta filtragem, restaram 63 artigos, que compuseram o portfólio final da análise. Todo o processo de seleção seguiu as recomendações do protocolo PRISMA (Moher *et al.*, 2009), o que assegura transparência, rastreabilidade e rigor metodológico.

Os artigos selecionados foram sistematizados em planilhas eletrônicas e analisados por meio de estatística descritiva, com apoio do Microsoft Excel, permitindo identificar padrões quantitativos da literatura. Complementarmente, realizou-se uma análise bibliométrica utilizando as ferramentas VOSviewer e Bibliometrix, empregadas para mapeamento de coocorrência de termos, redes de colaboração, evolução temporal e tendências temáticas.

Por fim, adotou-se um sistema de classificação e codificação baseado em Lages Junior e Godinho Filho (2010), permitindo categorizar os estudos segundo foco, método, setor analisado, base teórica utilizada e técnicas de IA associadas à EC. Essa etapa possibilitou consolidar uma interpretação integrada da produção científica, favorecendo a identificação das principais aplicações, lacunas e tendências do campo.

Quadro 1 – etapas do método

Etapa	Descrição resumida	Referências
<b>1. Definição da estratégia metodológica</b>	Adoção das diretrizes para revisões sistemáticas e estruturação do protocolo de pesquisa.	Lages Junior; Godinho Filho (2010); Jabbour (2013); Teixeira <i>et al.</i> (2020; 2025)
<b>2. Busca nas bases científicas</b>	Coleta nas bases Scopus e Web of Science, com uso das palavras-chave relacionadas a EC e IA.	—
<b>3. Recuperação inicial dos estudos</b>	Identificação de 108 artigos (59 Scopus; 49 WoS) sem recorte temporal.	—
<b>4. Etapa de elegibilidade</b>	Exclusão de artigos duplicados, sem acesso integral e fora do escopo.	PRISMA (Moher <i>et al.</i> , 2009)
<b>5. Seleção final do portfólio</b>	Consolidação de 63 artigos para análise sistemática.	PRISMA (Moher <i>et al.</i> , 2009)
<b>6. Sistematização dos dados</b>	Organização dos artigos em planilhas e aplicação de estatística descritiva.	—
<b>7. Análise bibliométrica</b>	Uso de VOSviewer e Bibliometrix para mapear redes e tendências.	—
<b>8. Codificação e classificação dos estudos</b>	Categorização segundo foco, método, setor, teoria e técnicas de IA.	Lages Junior; Godinho Filho (2010)

Fonte: autores.

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

A análise dos 63 artigos evidencia que a IA tem sido amplamente reconhecida como uma das principais alavancas para inovação sustentável aplicada à EC, especialmente em setores de alta complexidade operacional (Li *et al.*, 2025, Bonakdari *et al.*, 2025, Selvam *et al.*, 2025). Em grande parte dos estudos, a IA é apresentada como ferramenta essencial para otimizar processos industriais, prever cenários ambientais, apoiar a tomada de decisão e ampliar a eficiência em cadeias de valor sujeitas a variabilidade e incertezas (Balogun *et al.*, 2025, Jan *et al.*, 2025, Chidepatil *et al.*, 2020). Essa convergência reflete a consolidação de uma tendência

interdisciplinar na qual tecnologias digitais e princípios circulares se articulam para enfrentar desafios ambientais, econômicos e sociais (Bianchini *et al.*, 2019, Rajput; Singh, 2020).

A literatura demonstra que a IA atua como suporte estruturado à decisão em ambientes caracterizados por grande volume de dados, permitindo identificar padrões ocultos e prever fluxos materiais e energéticos com maior precisão (Reuter, 2023, Mihai *et al.*, 2025). Técnicas como machine learning, deep learning, Random Forest, modelos SHAP e outras abordagens explicáveis (XAI) são amplamente aplicadas em análises de resíduos, otimização logística, avaliação de riscos ambientais e mensuração de indicadores como pegada de carbono e pegada hídrica (Bonakdari *et al.*, 2025, Selvam *et al.*, 2025, Da Luz *et al.*, 2025). Essa diversidade de aplicações confirma a crescente maturidade do campo e a robustez da IA como catalisadora de inovação sustentável em setores como construção civil (Balogun *et al.*, 2025), agroindústria (Jan *et al.*, 2025), energia renovável (Naik *et al.*, 2025) e gestão de resíduos sólidos (Subedi *et al.*, 2025).

Do ponto de vista teórico, observa-se que a EC se consolidou como arcabouço transversal predominante, sendo mobilizada como estrutura orientadora da transição para sistemas regenerativos (Andika *et al.*, 2025, Da Luz *et al.*, 2025). Vários artigos ancoram suas análises em obras amplamente reconhecidas da literatura internacional, evidenciando a importância de fundamentos conceituais provenientes de diferentes campos e ampliando a profundidade epistemológica do debate (Bianchini *et al.*, 2019, Rajput; Singh, 2020). Outras teorias complementares também emergem, como aprendizagem organizacional (Selvam *et al.*, 2025), capacidades dinâmicas (Balogun *et al.*, 2025), governança institucional (Chen; Hu, 2025) e inovação sustentável (Chidepatil *et al.*, 2020), reforçando a necessidade de compreender fatores organizacionais que condicionam a adoção da circularidade mediada por IA.

Metodologicamente, percebe-se uma evolução clara nos estudos analisados. Pesquisas iniciais tendiam a revisões conceituais, análises exploratórias e estudos de caso ilustrativos que buscavam legitimar o campo e descrever seus fundamentos (Andika *et al.*, 2025, Rajput; Singh, 2020). Com o amadurecimento da área, cresce o número de estudos que incorporam modelagem quantitativa avançada, técnicas preditivas e simulações aplicadas a sistemas circulares complexos, especialmente em setores industriais e urbanos (Bonakdari *et al.*, 2025, Mihai *et al.*, 2025). Abordagens mistas também se expandem, combinando surveys, análises estatísticas, estudos de caso e métricas ambientais, como Análise do Ciclo de Vida (ACV), integradas a algoritmos de IA (Selvam *et al.*, 2025, Da Luz *et al.*, 2025). Essa tendência evidencia uma hibridização metodológica crescente, que busca unir rigor quantitativo, sensibilidade contextual e validade empírica.

A partir da análise detalhada dos artigos, emergem quatro benefícios recorrentes atribuídos à IA em estratégias circulares:

- Eficiência operacional: otimização de processos produtivos, redução de perdas e melhor aproveitamento de recursos, conforme estudos aplicados à mineração, saneamento, agroenergia e construção civil (Balogun *et al.*, 2025, Naik *et al.*, 2025, Bonakdari *et al.*, 2025).
- Aprimoramento da mensuração: integração entre métricas tradicionais e técnicas de IA para melhorar a precisão de indicadores ambientais e comparabilidade de cenários (Selvam *et al.*, 2025, Jan *et al.*, 2025).
- Suporte à inovação em modelos de negócio: evidenciado por aplicações em product-as-a-service, modularidade, ecodesign e extensão da vida útil de produtos (Rajput; Singh, 2020, Andika *et al.*, 2025).
- Escalabilidade das práticas circulares: permitindo replicar soluções digitais em diferentes setores, regiões e estruturas produtivas (Subedi *et al.*, 2025, Chen; Hu, 2025).

Os Quadros 2 e 3 sintetizam padrões temáticos e metodológicos identificados nos 63 artigos analisados, utilizando referências variadas do fichamento.

O Quadro 2 sintetiza a incidência dos principais temas identificados, indicando sua representatividade na amostra e exemplos de referências associadas.

Quadro 2- Incidência temática e referências

Tema	N artigos	% do total	Referências
<b>IA e modelagem preditiva na Economia Circular</b>	61	98.4	Bonakdari et al. (2025), Jan et al. (2025), Balogun et al. (2025), Selvam et al. (2025), Andika et al. (2025)
<b>Pequenas e Médias Empresas (PMEs) e contextos emergentes</b>	36	58.1	Andika et al. (2025), Subedi et al. (2025), Naik et al. (2025), Da Luz et al. (2025), Chen; Hu (2025)
<b>Gestão de resíduos sólidos e reciclagem</b>	33	53.2	Jan et al. (2025), Balogun et al. (2025), Selvam et al. (2025), Subedi et al. (2025), Da Luz et al. (2025)
<b>Barreiras, habilitadores e capacidades organizacionais</b>	31	50.0	Bonakdari et al. (2025), Jan et al. (2025), Mihai et al. (2025), Waqas et al. (2025), Hassan et al. (2025)
<b>Cidades inteligentes, IoT e cadeias digitais</b>	30	48.4	Subedi et al. (2025), Mihai et al. (2025), Krúpová et al. (2025), Waqas et al. (2025), Rodrigues et al. (2025)

Fonte: autores.

O Quadro 3 resume as principais contribuições teóricas e metodológicas dos artigos analisados, destacando os referenciais adotados, os métodos mais recorrentes e exemplos de estudos representativos.

Quadro 3 - contribuições teóricas e metodológicas

Tema Teórico	Métodos mais usados	Exemplos de artigos
<b>Economia Circular como arcabouço central</b>	Revisões de literatura; Análises conceituais; Estudos de caso ilustrativos	Andika et al. (2025); Jan et al. (2025)
<b>Teoria Institucional e Governança</b>	Estudos comparativos; Análise documental de políticas; Estudos de caso em países (UE, China, Brasil)	Chen; Hu (2025); Bonakdari et al. (2025)
<b>Capacidades Dinâmicas e Aprendizagem Organizacional</b>	Entrevistas qualitativas; Surveys; Abordagens mistas	Balogun et al. (2025); Selvam et al. (2025)
<b>Sustentabilidade e Inovação</b>	Análises de ciclo de vida (LCA); Modelos de simulação; Estudos de inovação tecnológica	Andika et al. (2025); Selvam et al. (2025)
<b>Digitalização e Indústria 4.0</b>	Aplicações de IA/ML (Random Forest, SHAP, redes neurais); Modelagem preditiva; IoT/Blockchain	Da Luz et al. (2025); Balogun et al. (2025)

Fonte: autores.

Apesar dos avanços observados, a literatura também aponta limitações importantes. Grande parte dos estudos destaca a dependência de dados de alta qualidade, que muitas vezes são indisponíveis em PMEs e regiões emergentes, o que dificulta a implementação de modelos robustos de IA para EC (Andika *et al.*, 2025, Subedi *et al.*, 2025, Da Luz *et al.*, 2025). Além disso, fatores como altos custos de implementação, restrições de infraestrutura digital e baixa maturidade tecnológica limitam a difusão de soluções digitais em organizações de pequeno porte e setores de baixa intensidade tecnológica (Chen; Hu, 2025, Rajput; Singh, 2020). Outra limitação recorrente refere-se às dificuldades de interpretação dos resultados gerados por algoritmos avançados, que ainda geram desconfiança em gestores e formuladores de políticas, apesar dos avanços em IA explicável (Reuter, 2023, Mihai *et al.*, 2025).

Finalmente, a análise revela fragmentação teórica, uma vez que a literatura ainda carece de um quadro integrador capaz de unificar, de forma sistemática, os princípios da EC com as aplicações da IA, especialmente considerando a pluralidade de setores, métodos e tecnologias envolvidos (Chidepatil *et al.*, 2020, Bressanelli *et al.*, 2020, Selvam *et al.*, 2025). Essa lacuna representa uma oportunidade relevante para pesquisas futuras que pretendam construir frameworks teóricos integrados e aplicáveis a diferentes contextos produtivos.

#### 4.1 LACUNAS E RECOMENDAÇÕES DE PESQUISA

A revisão permite identificar um conjunto de lacunas estruturais que orientam direções promissoras para investigações futuras:

R1 – Aplicações em PMEs e países emergentes:

A literatura apresenta baixa representatividade de estudos empíricos em contextos com limitada infraestrutura tecnológica, restrições de dados e baixa maturidade digital. Pesquisas futuras devem desenvolver soluções de IA de baixo custo, escaláveis e adequadas às realidades socioeconômicas desses territórios, explorando modelos simplificados, pipelines lightweight e tecnologias abertas.

R2 – Integração teórica ampliada:

Observa-se fragmentação no uso dos referenciais conceituais. Há necessidade de frameworks híbridos que articulem Economia Circular, capacidades dinâmicas, inovação sustentável, aprendizagem organizacional e governança, permitindo análises mais completas das transições digitais–circulares.

R3 – Setores insuficientemente investigados:

Alguns setores críticos, como bioenergia, resíduos perigosos, mineração, cadeias complexas da construção civil e indústrias de base, seguem subexplorados. Estudos aplicados nesses contextos podem revelar novos padrões de circularidade e ampliar a robustez das evidências empíricas.

R4 – Avanços em interpretabilidade e transparência da IA:

Apesar do crescimento das técnicas explicáveis, ainda há lacunas na confiabilidade dos modelos em ambientes decisórios. Recomenda-se o desenvolvimento de frameworks robustos de interpretabilidade, auditoria algorítmica e comunicação clara dos resultados para gestores e formuladores de políticas.

R5 – Dimensão social, ética e distributiva:

Poucos estudos incorporam debates sobre equidade, inclusão, impactos sociais e riscos éticos associados às soluções digitais. Pesquisas futuras devem analisar como desigualdades tecnológicas influenciam a adoção da IA em práticas circulares e propor abordagens socialmente responsáveis.

R6 – Estudos de escalabilidade e replicabilidade:

A transição circular demanda soluções replicáveis entre setores e regiões, mas a maior parte dos estudos permanece localizada. Pesquisas devem investigar como ferramentas digitais podem ser transferidas, ampliadas e adaptadas a diferentes realidades institucionais e produtivas.

## 5 CONCLUSÃO

A revisão da literatura demonstra que a Inteligência Artificial (IA) tem assumido papel estratégico na promoção da Economia Circular (EC), consolidando-se como uma das principais tecnologias habilitadoras da transição para sistemas produtivos mais sustentáveis. Os estudos analisados evidenciam que a IA contribui para otimizar processos industriais, prever cenários ambientais, ampliar a precisão da mensuração de impactos e apoiar o desenvolvimento de novos modelos de negócio orientados ao uso eficiente de recursos.

No plano teórico, a EC emergiu como arcabouço central que orienta grande parte das investigações, sendo frequentemente complementada por referências de capacidades dinâmicas, inovação sustentável, governança institucional e aprendizagem organizacional. Essa combinação demonstra que a IA não atua isoladamente, mas integrada a uma base multidisciplinar que busca compreender tanto dimensões técnicas quanto sociais e organizacionais.

Metodologicamente, observa-se um movimento de fortalecimento analítico, que avança das revisões conceituais e estudos qualitativos iniciais para modelos quantitativos sofisticados, técnicas explicáveis de aprendizado de máquina e abordagens mistas que combinam evidências qualitativas, métricas ambientais e modelagem computacional. Essa evolução indica crescente maturidade científica na compreensão das interfaces entre IA e EC.

Apesar dos avanços, persistem limitações importantes: escassez de dados de qualidade, custos elevados de implementação, fragilidades de infraestrutura digital e alta concentração de estudos em países desenvolvidos. As lacunas identificadas revelam a necessidade de aprofundar pesquisas em contextos emergentes, desenvolver soluções acessíveis, aprimorar a integração teórica e incorporar dimensões éticas e sociais da digitalização.

Consolidar a IA como catalisadora da transição para práticas econômicas mais sustentáveis requer, portanto, esforços coordenados de pesquisa, inovação tecnológica, políticas públicas e colaboração entre academia, setor produtivo e sociedade. Avançar nessas frentes permitirá transformar o potencial identificado pela literatura em impactos reais na circularidade, na eficiência e na resiliência dos sistemas socioeconômicos.

## REFERÊNCIAS

ADHOLIYA, Ashish. Evaluating the Impact of Digitalization on Circular Economy Growth: Insights from Structural Equation Modelling. **Circular Economy and Sustainability**, p. 1-30, 2025.

AJAYI, Babatunde Oluwaseun et al. Integrating system dynamics and machine learning for environmental impact analysis of building materials in the demolition process. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 27114, 2025.

AKBARI, Mohammadreza; HOPKINS, John L. Digital technologies as enablers of supply chain sustainability in an emerging economy. **Operations Management Research**, v. 15, n. 3, p. 689-710, 2022.

AKRAM, Shaik Vaseem et al. Implementation of digitalized technologies for fashion industry 4.0: Opportunities and challenges. **Scientific Programming**, v. 2022, n. 1, p. 7523246, 2022.

ALAVI, Behrouz; TAVANA, Madjid; MINA, Hassan. A dynamic decision support system for sustainable supplier selection in circular economy. **Sustainable production and consumption**, v. 27, p. 905-920, 2021.

AL HALBUSI, Hussam et al. AI capability and green innovation impact on sustainable performance: Moderating role of big data and knowledge management. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 210, p. 123897, 2025.

ALKA, T. A.; RAMAN, Raghu; SURESH, M. Research trends in innovation ecosystem and circular economy. **Discover Sustainability**, v. 5, n. 1, p. 323, 2024.

ANDIKA, Alif et al. Transitioning towards zero waste in the agri-food supply chain: a review of sustainable circular agri-food supply chain. **Sustainable Futures**, p. 100917, 2025.

BALOGUN, Habeeb et al. Deconstructability prediction for building using machine learning and ensemble feature selection techniques. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 22152, 2025.

BAG, Surajit et al. Role of institutional pressures and resources in the adoption of big data analytics powered artificial intelligence, sustainable manufacturing practices and circular economy capabilities. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 163, p. 120420, 2021.

BIANCHINI, Augusto; ROSSI, Jessica; PELLEGRINI, Marco. Overcoming the main barriers of circular economy implementation through a new visualization tool for circular business models. **Sustainability**, v. 11, n. 23, p. 6614, 2019.

BONAKDARI, Hossein et al. Sustainable wastewater-to-hydrogen systems in Canada: A scenario-based decision support analysis. **Renewable Energy**, p. 124308, 2025.

CAMPANA, Paola et al. Artificial Intelligence and Digital Twins for Sustainable Waste Management: A Bibliometric and Thematic Review. **Applied Sciences**, v. 15, n. 11, p. 6337, 2025.

ÇETIN, Sultan; DE WOLF, Catherine; BOCKEN, Nancy. Circular digital built environment: An emerging framework. **Sustainability**, v. 13, n. 11, p. 6348, 2021.

CHAUHAN, Chetna; PARIDA, Vinit; DHIR, Amandeep. Linking circular economy and digitalisation technologies: A systematic literature review of past achievements and future promises. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 177, p. 121508, 2022.

CHEN, Quancheng; HU, Xuemei. Tort liability for the application risk of generative artificial intelligence technology in the circular economy and financial industry: evidence from China. **Humanities and Social Sciences Communications**, v. 12, n. 1, p. 1-13, 2025.

CHIDEPATIL, Aditya et al. From trash to cash: how blockchain and multi-sensor-driven artificial intelligence can transform circular economy of plastic waste?. **Administrative Sciences**, v. 10, n. 2, p. 23, 2020.

D'AMATO, Dalia et al. Green, circular, bio economy: A comparative analysis of sustainability avenues. **Journal of cleaner production**, v. 168, p. 716-734, 2017.

DA LUZ, Gustavo PCP et al. Repurposing of TV boxes for a circular economy in smart cities applications. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 22638, 2025.

DE OLIVEIRA NETO, G. C. et al. Industry 4.0 technologies moderately spurred micro-level circular economy considering cleaner production, not promoting sustainable performance. **International Journal of Environmental Science and Technology**, v. 22, n. 7, p. 5817-5840, 2025.

DIAS, Veruska Mazza Rodrigues et al. Possibilities for applying the circular economy in the aerospace industry: Practices, opportunities and challenges. **Journal of Air Transport Management**, v. 102, p. 102227, 2022.

PRADO, Júlio Dias do et al. An artificial intelligence approach to assessment and guidance for circular transition. **Progress in Industrial Ecology, an International Journal**, v. 18, n. 1, p. 1-23, 2025.

DWIVEDI, Yogesh K. et al. Evolution of artificial intelligence research in Technological Forecasting and Social Change: Research topics, trends, and future directions. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 192, p. 122579, 2023.

ESPINA-ROMERO, Lorena et al. Digitalización y gestión de datos en la economía circular. **Revista Venezolana de Gerencia (RVG)**, v. 30, n. 110, p. 269-286, 2025.

FRAGA-LAMAS, Paula; LOPES, Sérgio Ivan; FERNÁNDEZ-CARAMÉS, Tiago M. Green IoT and edge AI as key technological enablers for a sustainable digital transition towards a smart circular economy: An industry 5.0 use case. **Sensors**, v. 21, n. 17, p. 5745, 2021.

GASIMOV, Faig; WILLIAMS, Richard A.; KRISHANAN, Mittran G. Key pathways towards sustainable processing of critical minerals. **Minerals Engineering**, v. 233, p. 109644, 2025.

GAZZOLA, Patrizia et al. The Circular Economy and the Role of Technology in the Fashion Industry: A Comparison of Empirical Evidence. **Sustainability**, v. 17, n. 7, p. 3104, 2025.

GIORDANO, Vito et al. Identifying technologies in circular economy paradigm through text mining on scientific literature. **PLoS One**, v. 19, n. 12, p. e0312709, 2024.

HAN, Yafeng et al. Exploring how digital technologies enable a circular economy of products. **Sustainability**, v. 15, n. 3, p. 2067, 2023.

HASSAN, Rabia et al. Transitioning the silk industry towards circularity: A thematic analysis of sustainable value chain practices. **Sustainable Production and Consumption**, v. 56, p. 94-111, 2025.

JAN, Saima et al. Biodiesel in circular economy: A perspective study on recent trends and environmental challenges in sustainable energy production. **Renewable Energy**, p. 123840, 2025.

JAP, Kouk Ping. Driving Competitive Edge in Sarawak's Manufacturing Industry: Leveraging Supply Chain Management, Smart Integration, and Circular Economy Practices. **Recoletos Multidisciplinary Research Journal**, v. 12, n. 2, p. 103-118, 2024.

KALABOUKAS, Kostas; KIRITSIS, Dimitris; ARAMPATZIS, George. Governance framework for autonomous and cognitive digital twins in agile supply chains. **Computers in Industry**, v. 146, p. 103857, 2023.

KURNIAWAN, Tonni Agustiono et al. Decarbonization in waste recycling industry using digitalization to promote net-zero emissions and its implications on sustainability. **Journal of environmental management**, v. 338, p. 117765, 2023.

LI, Linzi et al. Beyond one-size-fits-all: Differentiated green development assessment integrating a hybrid approach in China's Yangtze River Economic Belt. **Environmental Impact Assessment Review**, v. 116, p. 108076, 2026.

LIU, Lingdi; SONG, Wenyan; LIU, Yang. Leveraging digital capabilities toward a circular economy: Reinforcing sustainable supply chain management with Industry 4.0 technologies. **Computers & Industrial Engineering**, v. 178, p. 109113, 2023.

MIHAI, Laurențiu-Stelian et al. A Bibliometric Analysis of the Role of Digitalization in Achieving Sustainability-Oriented Innovation. **Sustainability**, v. 17, n. 13, p. 5822, 2025.

MOHAMED, Yomna et al. Quantum machine learning regression optimisation for full-scale sewage sludge anaerobic digestion. **npj Clean Water**, v. 8, n. 1, p. 17, 2025.

NAIK, Bhukya Govardhan et al. Mechanical properties and machine learning analysis of concrete incorporating waste glass as coarse aggregate. **Discover Sustainability**, v. 6, n. 1, p. 517, 2025.

ONYELOWE, Kennedy C. et al. Data-driven framework for prediction of mechanical properties of waste glass aggregates concrete. **Scientific Reports**, v. 15, n. 1, p. 20902, 2025.

ORTNER, F. Peter; TAY, Jing Zhi. Exploring a circular economy solution space A comparative study to develop automated optimisation workflows supported by machine learning for circular design problems. **International Journal of Architectural Computing**, v. 21, n. 3, p. 404-420, 2023.

OLADAPO, Bankole I.; OLAWUMI, Matthew A.; OMIGBODUN, Francis T. AI-Driven Circular Economy of Enhancing Sustainability and Efficiency in Industrial Operations. **Sustainability**, v. 16, n. 23, p. 10358, 2024.

RAMAKRISHNA, Seeram et al. Emerging industrial revolution: symbiosis of industry 4.0 and circular economy: the role of universities. **Science, Technology and Society**, v. 25, n. 3, p. 505-525, 2020.

RAJPUT, Shubhangini; SINGH, Surya Prakash. Connecting circular economy and industry 4.0. **International Journal of Information Management**, v. 49, p. 98-113, 2019.

RANJBARI, Meisam et al. Two decades of research on waste management in the circular economy: Insights from bibliometric, text mining, and content analyses. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, p. 128009, 2021.

REUTER, Markus A. Digitalizing the circular economy: Circular economy engineering defined by the metallurgical internet of things. **Metallurgical and Materials transactions B**, v. 47, n. 6, p. 3194-3220, 2016.

RODRIGUES, Sílvia Patrícia et al. A Framework for Leveraging Digital Technologies in Reverse Logistics Actions: A Systematic Literature Review. **Logistics**, v. 9, n. 2, p. 54, 2025.

RUSCH, Magdalena; SCHÖGGL, Josef-Peter; BAUMGARTNER, Rupert J. Application of digital technologies for sustainable product management in a circular economy: A review. **Business strategy and the environment**, v. 32, n. 3, p. 1159-1174, 2023.

SANCHEZ-GARCIA, Eduardo et al. Revolutionizing the circular economy through new technologies: A new era of sustainable progress. **Environmental Technology & Innovation**, v. 33, p. 103509, 2024.

SÁNCHEZ-RAMÍREZ, Eduardo. Tailored chemical processes: opportunities and challenges in shaping a sustainable future. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 100, n. 5, p. 887-893, 2025.

SCHÖGGL, Josef-Peter et al. Implementation of digital technologies for a circular economy and sustainability management in the manufacturing sector. **Sustainable Production and Consumption**, v. 35, p. 401-420, 2023.

SJÖDIN, David; PARIDA, Vinit; KOHTAMÄKI, Marko. Artificial intelligence enabling circular business model innovation in digital servitization: Conceptualizing dynamic capabilities, AI capacities, business models and effects. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 197, p. 122903, 2023.

SONG, Junhao et al. Exploring public attention in the circular economy through topic modelling with twin hyperparameter optimisation. **Energy and AI**, v. 18, p. 100433, 2024.

STEFAN, Ioana; CHIRUMALLA, Koteswar. Enabling value retention in circular ecosystems for the second life of electric vehicle batteries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 212, p. 107942, 2025.

SUBEDI, Ajaya et al. Leveraging machine learning for sustainable solid waste management: A global perspective. **Sustainable Futures**, v. 10, p. 101098, 2025.

XU, Shanming; WANG, Ying. Do circular innovations and carrying capacity of natural environment enhance circular economy in the European Union? Evidence from simulation and machine learning methods. **Journal of Environmental Management**, v. 373, p. 123863, 2025.

ZHANG, Shuming et al. Co-gasification polygeneration system based on multi-criteria evaluation and machine learning optimization for the synergistic valorization of biomass and plastic waste. **Energy Conversion and Management**, v. 345, p. 120334, 2025.