ReGeo
ISSN: 2177-3246

O PAPEL DA INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL NA GESTÃO DE RESÍDUOS DE SERVIÇOS DE SAÚDE: UMA REVISÃO DE ESCOPO

THE ROLE OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE IN HEALTHCARE WASTE MANAGEMENT: A SCOPING REVIEW

EL PAPEL DE LA INTELIGENCIA ARTIFICIAL EN LA GESTIÓN DE RESIDUOS DE SERVICIOS DE SALUD: UNA REVISIÓN DE ALCANCE

https://doi.org/10.56238/revgeov17n6-142

Data de submissão: 16/05/2026 **Data de publicação:** 30/06/2026

Débora da Silveira Siqueira
Doutoranda em Promoção da Saúde
Instituição: Universidade de Santa Cruz do Sul
E-mail: deborasiqueira@mx2.unisc.br
Ocird: https://orcid.org/0000-0002-4530-9808

Alexandre Rieger
Doutor em Promoção da Saúde
Instituição: Universidade de Santa Cruz do Sul
E-mail: rieger@unisc.br
Ocird: https://orcid.org/0000-0001-7523-7211

Janine Koepp
Doutora em Promoção da Saúde
Instituição: Universidade de Santa Cruz do Sul
E-mail: janinek@unisc.br
Ocird: https://orcid.org/0000-0003-4873-7696

Guilherme Ferreira
Mestre em Sistemas e Processos Industriais
Instituição: Universidade de Santa Cruz do Sul
E-mail: guilherme27set@gmail.com
Ocird: https://orcid.org/0009-0002-0523-2364

Rejane Frozza
Doutora em Sistemas e Processos Industriais
Instituição: Universidade de Santa Cruz do Sul
E-mail: frozza@unisc.br
Ocird: https://orcid.org/0000-0002-3415-0870

Indiara Schaefer da Silva
Mestra em Promoção da Saúde
Instituição: Universidade de Santa Cruz do Sul
E-mail: indiarasilva@mx2.unic.br
Ocird: https://orcid.org/0009-0005-3780-3725

ReGeo
ISSN: 2177-3246

Amanda Quadros de Souza
Doutoranda em Promoção da Saúde
Instituição: Universidade de Santa Cruz do Sul
E-mail: aquadrosdesouza@gmail.com
Ocird: https://orcid.org/0000-0002-1436-8733

Suzeline Ferreira
Enfermeira
Instituição: Universidade de Santa Cruz do Sul
E-mail: suzelinef@yahoo.com.br
Ocird: https://orcid.org/0009-0001-1280-2380

RESUMO
Introdução: A ampliação da geração de Resíduos de Serviços de Saúde (RSS) e falhas em seu gerenciamento intensificam riscos ambientais e à saúde pública, demandando estratégias inovadoras. Nesse contexto, a Inteligência Artificial (IA) surge como alternativa promissora para qualificar processos de manejo, tratamento e destinação de RSS, ampliando eficiência, segurança e sustentabilidade. Objetivo: Mapear evidências científicas sobre a aplicação da IA na gestão de resíduos de serviços de saúde, destacando suas principais aplicações, benefícios e desafios. Método: Revisão de escopo conduzida conforme o PRISMA-ScR e o modelo de Cooper, com apoio de análise bibliométrica para identificação e seleção de estudos em bases científicas. Resultados e Discussão: Foram analisados 12 estudos, evidenciando predominância do uso de redes neurais e aprendizado profundo (40%), sobretudo na previsão da geração de resíduos, otimização de rotas de coleta e automação da triagem. Destacam-se modelos com baixo erro preditivo e sistemas automatizados que ampliaram taxas de reciclagem. Parte dos estudos abordou ainda o descarte adequado de medicamentos, com impactos positivos na saúde pública. Persistem desafios relacionados à qualidade dos dados, custos e resistência institucional e a escassez de estudos sobre a educação ambiental em relação aos RSS. Conclusão: A IA apresenta elevado potencial transformador para a gestão de RSS, porém sua efetiva incorporação requer investimentos em infraestrutura, capacitação profissional, políticas públicas integradas e estudos voltados para estratégias educacionais sobre os RSS.

Palavras-chave: Inteligência Artificial. Gestão de Resíduos de Saúde. Tecnologias e Inovação. Resíduos de Serviços de Saúde.

ABSTRACT
Introduction: The increasing generation of Healthcare Waste (HCW) and shortcomings in its management intensify environmental and public health risks, demanding innovative strategies. In this context, Artificial Intelligence (AI) emerges as a promising alternative to enhance HCW handling, treatment, and disposal processes, improving efficiency, safety, and sustainability. Objective: To map scientific evidence on the application of AI in healthcare waste management, highlighting its main applications, benefits, and challenges. Method: A scoping review conducted in accordance with the PRISMA-ScR guidelines and Cooper's five-stage model, supported by bibliometric analysis for the identification and selection of studies in scientific databases. Results and Discussion: Twelve studies were analyzed, highlighting the predominance of the use of neural networks and deep learning (40%), especially in predicting waste generation, optimizing collection routes, and automating sorting. Models with low predictive error and automated systems that increased recycling rates stand out. Some studies also addressed the proper disposal of medications, with positive impacts on public health. Challenges related to data quality, costs, institutional resistance, and the scarcity of studies on environmental education regarding healthcare waste persist. Conclusion: AI presents high transformative potential for

healthcare waste management, but its effective incorporation requires investments in infrastructure, professional training, integrated public policies, and studies focused on educational strategies regarding healthcare waste.

Keywords: Artificial Intelligence. Healthcare Waste Management. Technologies and Innovation. Healthcare Waste.

RESUMEN
Introducción: El creciente aumento de la generación de Residuos de Servicios de Salud (RSS) y las deficiencias en su gestión intensifican los riesgos ambientales y para la salud pública, demandando estrategias innovadoras. En este contexto, la Inteligencia Artificial (IA) surge como una alternativa prometedora para mejorar los procesos de manejo, tratamiento y disposición de RSS, ampliando la eficiencia, seguridad y sostenibilidad. Objetivo: Mapear evidencias científicas sobre la aplicación de la IA en la gestión de residuos de servicios de salud, destacando sus principales aplicaciones, beneficios y desafíos. Método: Revisión de alcance realizada de acuerdo con las directrices PRISMA-ScR y el modelo de Cooper, apoyada por análisis bibliométrico para la identificación y selección de estudios en bases de datos científicas. Resultados y Discusión: Se analizaron 12 estudios, evidenciando el predominio del uso de redes neuronales y aprendizaje profundo (40%), especialmente en la predicción de la generación de residuos, la optimización de rutas de recolección y la automatización de la clasificación. Se destacan modelos con bajo error predictivo y sistemas automatizados que aumentaron las tasas de reciclaje. Algunos estudios también abordaron la disposición adecuada de medicamentos, con impactos positivos en la salud pública. Persisten desafíos relacionados con la calidad de los datos, los costos, la resistencia institucional y la escasez de estudios sobre educación ambiental con respecto a los RSS. Conclusión: La IA presenta un alto potencial transformador para la gestión de RSS, pero su incorporación efectiva requiere inversiones en infraestructura, capacitación profesional, políticas públicas integradas y estudios enfocados en estrategias educativas sobre los RSS.

Palabras clave: Inteligencia Artificial. Gestión de Residuos de Salud. Tecnologías e Innovación. Residuos de Servicios de Salud.

1 INTRODUÇÃO

A poluição ambiental é um dos maiores desafios que a saúde pública enfrenta para equacionar o impacto na saúde humana. Muitos fatores ambientais são responsáveis pela qualidade de vida e também por causarem doenças e agravos, sendo que, por muito tempo, essas questões receberam atenção limitada nas agendas globais. Neste senário, é relevante destacar o papel das instituições de saúde que podem ser fontes geradoras de poluição ambiental, especialmente devido à geração de Resíduo de Serviço de Saúde (RSS) mediante as atividades assistenciais e operacionais. (Lloyd, 2019).

Os RSS são classificados de acordo com o seu potencial contaminante ao meio ambiente e apresentam características específicas que exigem manipulação adequado, desde a segregação até a destinação final. Quando existe qualquer inconformidade no manejo dos RSS, como o descarte incorreto, pode acarretar riscos significativos ao meio ambiente e à saúde coletiva. Os impactos negativos causados pelo gerenciamento inadequados dos RSS sobre os recursos naturais, como solo, água e ar, agravando os problemas ambientais, especialmente em decorrência do crescimento populacional e do aumento do consumo carece de atenção, monitoramento e ações que reduzam as falhas e consequentemente a poluição ambiental. No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) estabelece diretrizes para a redução da geração de resíduos, incentivando práticas como reutilização, reciclagem e tratamento adequado, com atenção especial aos RSS, que demandam processos específicos antes da disposição final, mesmo sendo uma política com mais de 15 anos existência, ainda decreta estratégia fundamental para promoção da saúde ambiental e humana (Barbosa *et al.*, 2022).

A geração de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) no Brasil, em 2023, foi de aproximadamente 81,8 milhões de toneladas, o que corresponde a uma média de 1,04 kg por habitante ao dia. Na Região Sul do país, a produção média situa-se em torno de 1 kg por habitante/dia, evidenciando a magnitude dos desafios relacionados ao manejo adequado desses resíduos. Apesar dos avanços e tecnologias voltadas para tratamentos dos resíduos, ainda persistem dificuldades significativas quanto à destinação final. Estima-se que cerca de 69,7 milhões de toneladas de RSU tenham sido destinadas de forma adequada, segundo projeções do Panorama 2025. Nesse contexto, observa-se que aproximadamente 30% dos resíduos urbanos ainda apresentam destinação inadequada, evidenciando limitações na efetividade das políticas públicas e nos sistemas de gestão de resíduos (Agerst, 2025).

Embora os RSS representam em menor volume quando comparados aos resíduos sólidos urbanos, cerca de 1 à 3 %, eles apresentam maior complexidade de manejo devido à sua periculosidade e elevado potencial de contaminação, implicando riscos à saúde humana e ao meio ambiente. Soma-se a isso a necessidade de processos específicos, como esterilização, descontaminação e descarte

diferenciado, que tornam sua gestão mais onerosa e reforçam a importância da implementação de planos de gerenciamento eficazes e adequados (Abrema, 2025).

Em 2024, estima-se que a geração de RSS no Brasil tenha alcançado aproximadamente 1,3 milhão de toneladas, evidenciando a relevância desse tipo de resíduo no contexto sanitário e ambiental. (Abrema, 2025). Nesse cenário, o setor de saúde tem incorporado, de forma crescente, inovações tecnológicas voltadas à qualificação da assistência e à otimização de processos. Essas tecnologias possuem potencial para contribuir também com práticas mais sustentáveis, incluindo a gestão de resíduos. No entanto, sua implementação ainda enfrenta desafios relacionados à padronização, adesão dos profissionais e sustentabilidade das ações ao longo do tempo (Scarbrough; Kyratsis, 2022).

A Inteligência Artificial (IA) é uma ferramenta tecnológica promissora, inovadora e que proporciona otimização de processos em diferentes áreas, incluindo a saúde. Já no contexto da gestão de resíduos, sua aplicação tem se concentrado principalmente em atividades operacionais, como triagem e monitoramento. No entanto, sua utilização como estratégia educacional ainda é limitada, especialmente no que se refere à treinamento de profissionais da saúde para o manejo e gerenciamento adequado dos RSS. A escassez de soluções educativas utilizando tecnologias com a IA, aliada à falta de abordagens adaptativas e contextualizadas à realidade dos serviços, evidencia uma importante lacuna no campo (Abrelpe, 2022; Chew *et al.*, 2023).

Corroborando, neste mesmo contexto, a IA apresenta-se como uma ferramenta estratégica educacional com potencial para transformar não apenas a gestão operacional dos resíduos, mas também os processos de ensino e aprendizagem no âmbito da saúde e contribuir em indicadores positivos na gestão dos resíduos de saúde, reduzindo a geração e descartes inadequados. Assim, torna-se fundamental mapear o conhecimento existente e explorar o potencial da IA na construção de modelos mais eficazes e sustentáveis para adequar a gestão de RSS (Levac; Colquhoun; O'brien, 2010).

Assim sendo, o presente estudo justifica-se a necessidade de aprofundar o conhecimento sobre o uso da IA na gestão de RSS, considerando não apenas suas aplicações operacionais, mas também seu potencial como ferramenta educativa e de gestão para o manejo adequado dos RSS. A compreensão das evidências disponíveis pode subsidiar o desenvolvimento de soluções mais eficazes, alinhadas às demandas reais dos serviços de saúde e aos princípios da sustentabilidade. Portanto, este estudo tem como objetivo mapear evidências científicas sobre a aplicação da IA na gestão de RSS, destacando suas principais aplicações, benefícios e desafios.

2 MÉTODO

Este estudo trata-se de uma revisão de escopo da literatura, desenvolvida com base no framework metodológico proposto por Arksey e O'Malley (2005), posteriormente aprimorado por Levac, Colquhoun e O'Brien (2010) e de acordo com as diretrizes atualizadas do Joanna Briggs Institute (Peters *et al.*, 2020). A escolha por essa abordagem justifica-se pela necessidade de mapear o estado atual do conhecimento sobre a utilização da IA na gestão de RSS em instituições de saúde, identificando conceitos-chave, tipos de evidências e lacunas existentes na literatura. A revisão seguiu as seis etapas preconizadas para revisões de escopo:

2.1 IDENTIFICAÇÃO DA PERGUNTA DE PESQUISA

A pergunta norteadora foi definida a partir da estrutura PiCo, proposta por Mendes, Silveira e Galvão (2019), amplamente utilizada em revisões qualitativas: Qual é a aplicação da inteligência artificial na gestão de resíduos de serviço de saúde em instituições de saúde?

- P (População): Instituições de saúde / Gerenciamento de RSS
- I (Fenômeno de interesse): Utilização de tecnologias como IA na gestão de RSS
- Co (Contexto): Ambientes institucionais voltados à gestão de RSS

Tabela 1. Estratégia PICo qualitativo

População/Paciente/Problema	Instituições de saúde/Gerenciamento de RSS	DECS “medical waste” AND “waste management”
I Fenômeno de interesse	Utilização de tecnologias como a inteligência artificial no gerenciamento de resíduos de saúde	DECS “artificial intelligence” AND “waste management”
Co contexto	Ambientes institucionais de saúde	DECS Medical waste” AND “artificial intelligence” AND “waste management”

Fonte: Baseado em Mendes; Silveira e Galvão, 2019.

2.2 IDENTIFICAÇÃO DOS ESTUDOS RELEVANTES

A busca bibliográfica foi realizada nas bases de dados PubMed Central (PMC), Scopus, Web of Science e IEEE Xplore. A estratégia de busca foi estruturada a partir da combinação de descritores

controlados (DeCS/MeSH) e termos livres, incluindo sinônimos e variações terminológicas, combinados por operadores booleanos (AND/OR), conforme recomendações do Joanna Briggs Institute, visando maximizar a sensibilidade e especificidade da busca. Foram utilizados os seguintes descritores: “medical waste”, “waste management”, “artificial intelligence”, “technologies and innovation” e “waste of health service”. A busca ocorreu no mês de fevereiro de 2025 e considerou publicações entre os anos de 2020 a 2025.

Tabela 2. Bibliometria quantitativa

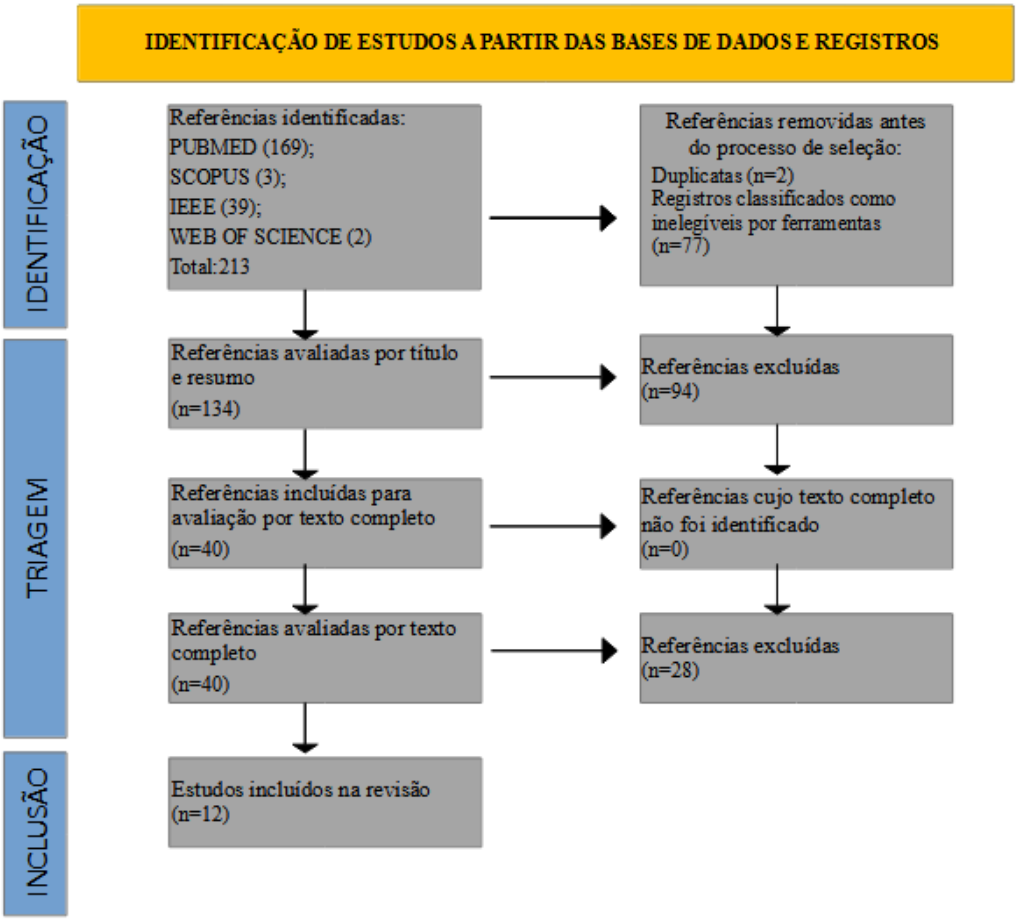
DESCRITORES/ BASE DE DADOS	**“Medical Waste”**	**“artificial intelligence”**	**“waste management”**	**Medical Waste” and “artificial intelligence”**	**“Medical Waste” and “waste management”**	**Waste management AND artificial intelligence**	**“Medical waste” AND “artificial intelligence” AND “waste management”**
Pubmed	3097	120315	15578	0	922	772	169
Scopus	864	256,069	15,510	0	0	0	3
Web of Science	579	90,778	9,947	0	0	0	2
IEEE	626	132.359	4.780	0	0	0	39
Total							213

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

2.3 SELEÇÃO DOS ESTUDOS

Foram incluídos artigos e revisões publicados no período delimitado, com texto completo disponíveis e que respondessem à pergunta norteadora. Foram excluídos trabalhos como TCCs, dissertações, teses, anais de eventos, bem como duplicatas. A seleção foi conduzida conforme o fluxograma PRISMA 2020 (Page *et al.*, 2021), garantindo transparência e rastreabilidade do processo.

Figura 1. Fluxograma de apresentação da estratégia de busca metodológica dos artigos científicos



Fonte: Elaborado pela autora, adaptado e traduzido de PRISMA 2020.

2.4 EXTRAÇÃO E ORGANIZAÇÃO DOS DADOS

Os dados dos estudos incluídos foram extraídos por meio de um instrumento estruturado contendo: autor, ano, país, objetivo, tipo de estudo, tipo de IA utilizada, aplicação na instituição de saúde, tipo de resíduo abordado, principais achados e lacunas apontadas.

2.5 ANÁLISE E SÍNTESE DOS DADOS

Os dados foram analisados por meio de análise de conteúdo temática, conforme proposta por Bardin (2011), permitindo a identificação de categorias analíticas emergentes. A síntese dos achados foi realizada de forma descritiva e interpretativa, organizando os resultados de acordo com os elementos da estratégia PiCo e com os eixos temáticos identificados ao longo da análise. A leitura dos estudos ocorreu em três etapas sequenciais: títulos, resumos e textos completos, respeitando rigorosamente os critérios de elegibilidade estabelecidos.

3 RESULTADOS

Foram selecionados doze estudos para a análise e discussão. Observa-se que o período com maior predomínio de estudos foi no ano de 2022 e 2023, seguindo como critério o período de busca estabelecido. No quadro a seguir é apresentado a caracterização dos artigos selecionados quanto: à ordem numérica, autores e ano de publicação, objetivo, resultados e a conclusão conforme o (Quadro 2).

Tabela 3. Síntese da amostra dos artigos selecionados

Autor/Ano	Título	Objetivo	Metodologia	Resultados	Conclusão
Fang et al.,2023.	"Inteligência Artificial para Gestão de Resíduos em Cidades Inteligentes: uma Revisão"	Explorar como a inteligência artificial (IA) pode aprimorar a gestão de resíduos urbanos	Análise sistemática	A integração da IA na gestão de resíduos pode aumentar a eficiência dos processos, reduzir custos e melhorar a saúde pública em cidades inteligentes.	A inteligência artificial pode melhorar a eficiência do tratamento, reduzir danos ambientais e fornecer soluções computacionais para um gerenciamento de resíduos mais inteligente.
Chew et al., 2023.	"Circular economy of medical waste: novel intelligent medical waste management framework based on extension linear Diophantine fuzzy FDOSM and neural network approach"	Propor um framework inteligente para a gestão de resíduos médicos, integrando métodos de decisão multicritério (MCDM) com técnicas avançadas de inteligência artificial.	Quantitativo, utilizando os métodos Multicritério de Apoio à Decisão (MCDA/MCDM) e Inteligência Computacional / Artificial	Os resultados indicaram que métodos como incineração, micro-ondas, pirólise, autoclave química, peróxido de hidrogênio vaporizado, calor seco, ozônio e luz ultravioleta são os mais eficazes para o descarte de resíduos médicos durante a pandemia. Além disso, o ozônio foi identificado como a técnica mais alinhada com os princípios da economia circular para o descarte de resíduos médicos.	O estudo destaca a importância de políticas públicas e práticas sustentáveis na gestão de resíduos médicos
Navia, 2024.	"Waste management and artificial intelligence: Is it happening already?"	Explorar a integração da inteligência artificial (IA) na gestão de resíduos sólidos urbanos	Uma análise qualitativa e interpretativa, fundamentada na experiência e conhecimento dos autores	A IA pode melhorar a eficiência na coleta, triagem e reciclagem de resíduos, além de otimizar rotas de coleta e prever	Ainda não foi explorado todo potencial da tecnologia avançada da inteligência artificial para colaborar na

				padrões de geração de resíduos	gestão dos resíduos.
Andeobu; Wibowo, 2022.	"Artificial intelligence applications for sustainable solid waste management practices in Australia: A systematic review"	Os autores analisaram estudos que investigaram o uso de IA em diversas áreas da gestão de resíduos	Revisão sistemática da literatura	Otimização de rotas de coleta; Triagem automatizada de materiais recicláveis; Previsão de geração de resíduos; Monitoramento de infrações ambientais	Embora a aplicação de IA na gestão de resíduos sólidos na Austrália tenha mostrado resultados promissores, ainda existem desafios a serem superados, como a necessidade de dados de alta qualidade, integração de sistemas e aceitação por parte dos stakeholders. Eles concluem que a IA tem o potencial de transformar a gestão de resíduos sólidos na Austrália, contribuindo para práticas mais sustentáveis e eficientes.
Kshirsagar et al., 2022.	"Artificial Intelligence-Based Robotic Technique for Reusable Waste Materials"	Avaliar o desempenho do sistema (robótica) por meio das taxas de sucesso na captura e no tempo de processamento, destacando a eficácia da abordagem proposta na automação da gestão de resíduos recicláveis.	Metodologia prática e experimental que integra robótica industrial com técnicas de inteligência artificial para otimizar a triagem e o reaproveitamento de resíduos sólidos.	A pesquisa mostrou que o sistema robótico pode ser uma solução promissora para melhorar a eficiência na separação de materiais recicláveis, aumentando a taxa de reciclagem e reduzindo o desperdício	A conclusão principal é que a tecnologia proposta tem o potencial de transformar a gestão de resíduos recicláveis, oferecendo uma solução eficaz, automatizada e econômica para a triagem e reutilização de materiais.
Banjar; Alrowithi; Alhadrami, 2022.	– "An Intelligent System for Proper Management and Disposal of Unused and Expired	Propor um sistema inteligente para a gestão e descarte adequado de medicamentos vencidos e não	É classificada como aplicada e experimental.	A implementação de um sistema inteligente para o gerenciamento e descarte adequado de medicamentos vencidos e não	A conclusão principal dos autores é que o sistema desenvolvido não só melhora a gestão de medicamentos,

	Medications"	utilizados.		utilizados é uma solução eficaz para reduzir os riscos ambientais e de saúde associados ao descarte inadequado desses produtos.	mas também ajuda a educar e orientar a população sobre a eliminação adequada, promovendo práticas de descarte mais seguras e reduzindo os impactos negativos para a saúde pública e o meio ambiente.
Xu et al., 2021.	"Applying artificial neural networks (ANNs) to solve solid waste-related issues: A critical review"	Realizar uma análise abrangente da aplicação de redes neurais artificiais (ANNs) na gestão de resíduos sólidos.	Revisão crítica sistemática.	Os autores destacam que as ANNs têm sido amplamente utilizadas para prever a geração de resíduos e parâmetros tecnológicos, mostrando eficácia na resolução de questões em escalas meso e microscópicas, como conversão de resíduos, emissões e processos dinâmicos.	Os autores concluíram que as Redes Neurais Artificiais (ANNs) têm um grande potencial para melhorar a gestão de resíduos sólidos, especialmente em áreas como previsão de geração de resíduos, controle de processos de conversão de resíduos, monitoramento de emissões e modelagem de processos dinâmicos.
Ahmed et al., 2022	"Forecasting the Status of Municipal Waste in Smart Bins Using Deep Learning"	Propor modelos de previsão para monitorar o status de resíduos municipais em lixeiras inteligentes utilizando técnicas de aprendizado profundo	Metodologia experimental aplicada	Indicam que o modelo LSTM apresentou o melhor desempenho, com um valor de MAPE de 1,855, sugerindo sua eficácia na previsão do nível de preenchimento das lixeiras	Os autores concluem que a aplicação de modelos de aprendizado profundo, especialmente o LSTM, pode melhorar significativamente o planejamento e a gestão da coleta de resíduos
Alshehri, 2022.	"Increasing Awareness of Proper Disposal of Unused and Expired Medication Using a Knowledge-Based Disposal	É compreender o comportamento da sociedade saudita em relação ao descarte de medicamentos não utilizados e vencidos e	Metodologia aplicada e experimental	Os resultados indicam que a implementação de sistemas informativos como este pode aumentar a conscientização e promover práticas adequadas de	O sistema apresenta informações de forma acessível, facilitando a compreensão e a aplicação prática no cotidiano.

	Management System"	desenvolver um protótipo de sistema baseado em conhecimento que auxilie na conscientização sobre métodos adequados de descarte desses medicamentos.		descarte de medicamentos, contribuindo para a proteção ambiental e a saúde pública.	
Ihsanullah;Alam; Jamal, 2022.	"Recent advances in applications of artificial intelligence in solid waste management: A review"	Realizar uma análise crítica dos avanços recentes na aplicação de técnicas de Inteligência Artificial (IA) na gestão de resíduos sólidos.	Revisão sistemática	IA tenha sido aplicada com sucesso em diversas áreas, sua implementação na gestão de resíduos enfrenta desafios significativos, como a disponibilidade e seleção de dados adequados, baixa reprodutibilidade e falta de evidências em cenários reais de gestão de resíduos.	Os autores sugerem direções para pesquisas futuras, visando aprimorar a aplicação da IA na gestão de resíduos sólidos. Eles enfatizam a importância de políticas públicas, colaboração entre governos, organizações de gestão de resíduos, municípios e pesquisadores para enfrentar os desafios atuais e promover práticas mais sustentáveis na gestão de resíduos.
Abdallah et al., 2020.	"Artificial Intelligence Applications in Solid Waste Management: A Systematic Research Review"	Oferecer uma análise abrangente das diversas técnicas de Inteligência Artificial (IA) aplicadas na gestão de resíduos sólidos (SWM).	Revisão sistemática	Este estudo fornece insights valiosos para pesquisadores, profissionais e formuladores de políticas interessados em melhorar a gestão de resíduos sólidos por meio da aplicação de tecnologias de IA.	Destaca os desafios enfrentados na implementação de IA na SWM, como a necessidade de grandes volumes de dados de alta qualidade, a complexidade dos sistemas de gestão de resíduos e a integração de diferentes tecnologias

Sinthiya,et al., 2022.	"Artificial Intelligence Based Smart Waste Management—A Systematic Review"	Identificar as aplicações de Inteligência Artificial (IA) na gestão inteligente de resíduos.	Revisão sistemática	A pesquisa destaca que a gestão eficiente de resíduos sólidos é essencial para minimizar impactos ambientais e à saúde pública. A revisão aborda como diferentes modelos e técnicas de IA têm sido empregados em várias áreas da gestão inteligente de resíduos.	Ressaltam o potencial da inteligência artificial em aprimorar a gestão de resíduos, oferecendo soluções mais inteligentes e sustentáveis para os desafios ambientais atuais.

Fonte: Elaborado pela autora, 2025.

A análise dos doze artigos revela que, apesar do potencial significativo da IA para transformar o gerenciamento dos resíduos e a educação em saúde ambiental, sua aplicação prática ainda está aquém do esperado nessas áreas. Muitos estudos que abordam o uso de IA para a gestão de resíduos focam em aspectos específicos, como a classificação automatizada ou a otimização de processos de coleta e reciclagem. No entanto, esses modelos não estão suficientemente integrados em sistemas e em instituições de saúde, o que limita seu impacto. Além disso, a IA poderia ser utilizada e explorada de maneira mais robusta na criação de plataformas de monitoramento de todo gerenciamento dos resíduos, utilizando algoritmos mais avançados que podem adaptar-se e responder de forma mais eficiente às limitações e desafios desde a geração até o descarte e destinação final (Andeobu; Wibowski, 2022).

Observou-se também a carência de estudos e projetos que explorem o uso da IA em instituições de saúde, especialmente no que diz respeito à educação e conscientização de profissionais da área. Tal cenário evidencia o quanto o gerenciamento de resíduos de serviços de saúde (RSS) é subestimado, sendo frequentemente negligenciado por gestores e, consequentemente, pelos próprios profissionais, o que compromete sua relevância e pode acarretar sérios danos à saúde coletiva.

Portanto, embora a inteligência artificial tenha o potencial de transformar significativamente o manejo de resíduos sólidos e de saúde, sua implementação ainda enfrenta barreiras consideráveis. Há uma necessidade urgente de mais estudos que explorem a integração da IA aos sistemas de gestão de resíduos de forma holística, buscando alternativas criativas e acessíveis para utilizar essa tecnologia na educação em saúde ambiental. Isso contribuiria para ampliar a conscientização e o engajamento da população em práticas sustentáveis e na proteção do meio ambiente.

4 DISCUSSÃO

A aplicação de IA no campo da gestão de resíduos tem ganhado crescente relevância, com o potencial de transformar tanto os processos operacionais quanto a conscientização pública. Uma análise dos quatorze artigos selecionados permite traçar uma linha do tempo e identificar diferentes abordagens e soluções propostas, além de destacar lacunas no desenvolvimento e nas práticas atuais. A partir da análise dos principais resultados encontrados no presente estudo, emergiram três eixos temáticos que abordam as tecnologias de acordo com seu tipo, alcance, praticidade e eficiência.

4.1 IA E A GESTÃO DE RESÍDUOS DE SERVIÇO DE SAÚDE: AVANÇOS E DESAFIOS

A gestão de RSS demanda soluções mais eficazes, especialmente diante do aumento inesperado de resíduos biológicos, como ocorreu durante a pandemia de Covid-19. Desta maneira, o uso de redes neurais sistemas computacionais inspirados no funcionamento do cérebro humano aliado a abordagens de economia circular, pode transformar significativamente a gestão desses resíduos. Tais soluções oferecem alternativas mais inteligentes para minimizar os impactos ambientais e aprimorar o processo de descarte. A pandemia evidenciou a fragilidade dos sistemas tradicionais de gestão de resíduos de saúde e reforçou a urgência de inovação por meio de tecnologias como a IA (Chew *et al.*, 2023).

Atualmente, muitas instituições de saúde ainda demonstram fragilidades consideráveis no gerenciamento de resíduos provenientes de serviços de saúde, muitas vezes deixando de realizar etapas fundamentais, como a implementação de um Plano de Gerenciamento de Resíduos de Saúde (PGRSS) e a análise de suas próprias deficiências com vistas à definição de metas de melhoria. Quando se fala em inovação nesse contexto, pensa-se em métodos que possam corrigir essas lacunas de forma prática e aplicável à rotina dos profissionais da área. Nesse sentido, sistemas ou plataformas baseadas em redes neurais, desenvolvidos de acordo com as especificidades e fragilidades de cada instituição, podem representar um avanço promissor.

A IA, ainda, pode ser uma ferramenta utilizada para promover práticas mais sustentáveis na gestão de resíduos sólidos nas instituições de saúde. Estudos realizados na Austrália revelam que a aplicação da IA pode otimizar processos como a coleta e separação de resíduos, bem como o monitoramento de pontos de descarte. No entanto, os artigos também destacam que as soluções baseadas em IA ainda enfrentam obstáculos importantes, como a escassez de infraestrutura tecnológica adequada especialmente em regiões menos desenvolvidas e a necessidade de integração entre diferentes tecnologias emergente (Andeobu *et al.*, 2022; Ihsanullah *et al.*, 2022).

A análise desta pesquisa revela a vulnerabilidade global em relação ao gerenciamento de resíduos, evidenciando a carência de tecnologias eficazes capazes de reduzir os impactos ambientais e

proteger a saúde pública. Ainda, observa-se que, embora a gestão de resíduos sólidos já enfrente desafios significativos, a situação é ainda mais crítica no caso dos RSS, o que representa um risco elevado para a população mundial.

4.2 IA E OUTRAS TECNOLOGIAS: ROBÓTICA E REDES NEURAIS NO GERENCIAMENTO DE RESÍDUOS

A utilização de tecnologias inovadoras, particularmente, o uso de técnicas robóticas baseadas em IA pode identificar e separar materiais reutilizáveis facilitando e otimizando o tempo gasto para essa atividade. A robótica tem se mostrado uma solução eficaz para automatizar a triagem de resíduos, mas sua implementação prática enfrenta desafios relacionados aos custos, à complexidade e à necessidade de formação especializada (Kshirsagar *et al.*, 2022).

A utilização do *deep learning* para prever a quantidade de resíduos em lixeiras inteligentes, mostrando como a IA pode melhorar a eficiência do gerenciamento de resíduos urbanos. Essa abordagem preditiva, juntamente com sensores e Internet das Coisas (IoT), tem grande potencial para otimizar a coleta de resíduos e minimizar a superlotação das lixeiras, mas depende de dados em tempo real e infraestrutura avançada para ser implementada eficazmente. No entanto promove um ambiente mais limpo e organiza as rotas de coleta além de reduzir o risco de infestações de insetos e pragas (Ahmed *et al.*, 2022).

A utilizações de tecnologias para auxiliar e facilitar a gestão de resíduo é de suma importância para promoção de cidades mais limpas, melhorar a organização das coletas e destinações corretas dos resíduos e o mais importante contribuir para saúde do meio ambiente. Fang, *et al.* (2023) exploram diversas aplicações da inteligência artificial voltadas para a otimização da gestão de resíduos sólidos em cidades inteligentes, abrangendo etapas que vão desde a coleta até a reciclagem. Os autores destacam que, apesar da existência de múltiplos experimentos e testes na área, a implementação prática e integrada desses sistemas ainda se encontra em estágios iniciais. Dessa forma, apontam a IA como uma tecnologia promissora para a gestão de resíduos, embora ainda apresente um grande potencial de desenvolvimento.

Desta maneira, observa-se que a inteligência artificial e outras tecnologias são amplamente empregadas para otimizar o processo de manejo de resíduos sólidos. No entanto, há uma lacuna no uso dessas inovações voltadas para o aprimoramento da gestão de RSS e para o fortalecimento do aprendizado dos profissionais da área por meio da educação em saúde ambiental.

4.3 EDUCAÇÃO E CONSCIENTIZAÇÃO EM SAÚDE AMBIENTAL COM A UTILIZAÇÃO DA IA

A aplicação de sistemas de IA pode promover grandes benefícios à conscientização pública sobre o descarte correto de RSS e principalmente para os profissionais da saúde que estão envolvidos neste cenário constantemente durante sua jornada de trabalho. A integração de IA para educar e informar a população sobre práticas adequadas de descarte é um passo importante para melhorar a gestão de resíduos e reduzir os impactos ambientais, já que é identificado a fragilidade do conhecimento da população em relação ao correto descarte de medicamentos, por exemplo, e outros resíduos de origem hospitalar (Alshehri, 2022).

A utilização de tecnologias é importante para ampliar o conhecimento da população sobre a segregação correta de resíduos. Foi desenvolvido, em um estudo, uma análise sobre as barreiras sociais e tecnológicas para a adoção de soluções sustentáveis, como IA, na gestão de resíduos. O estudo propõe métodos híbridos que combinam IA e análise de incertezas, sugerindo que a transição para uma gestão de resíduos mais inteligente e sustentável exige superar desafios culturais e técnicos, como a resistência da população à mudança e a falta de políticas públicas eficazes (Bui, 2022).

A utilização da IA é uma ferramenta estratégica do presente e futuro para a gestão de RSS, proporcionando grandes melhorias nesta temática tão relevante para a saúde do meio ambiente e que ainda enfrente muitas problemáticas. A IA pode ser integrada em sistemas de descarte de medicamentos para evitar a poluição ambiental, uma vez que medicamentos inadequadamente descartados podem contaminar solos e águas. Além disso, a IA poderia ser usada para educar os consumidores sobre como devolver ou descartar corretamente esses produtos. Além da conscientização da população sobre o descarte de medicamentos e resíduos de saúde nas residências de cada indivíduo, pode aprimorar os processos de gestão de resíduos em ambientes urbanos, através de métodos como análise preditiva, otimização e automação. A análise de sistemas inteligentes de gestão de resíduos, embora promissora, ainda enfrenta desafios relacionados ao custo, ao treinamento e à escassez de dados estruturados que possam alimentar esses sistemas de forma eficaz (Sinthiya; Chowdhury; Haque., 2022).

A educação e conscientização em saúde ambiental com a utilização da IA podem desempenhar um papel transformador no avanço da educação pública e na promoção de práticas sustentáveis e saudáveis. A IA pode ser aplicada de várias maneiras, otimizando processos, oferecendo insights e gerando uma maior interação com a população, colaborando com o aprendizado e melhora da prática sustentável. No entanto, a situação é crítica das instituições de saúde pela escassez de estudos voltados para saúde ambiental aos profissionais e gestores de saúde.

A análise dos estudos revela que a aplicação da IA na gestão de RSS apresenta importantes pontos fortes, mas também limitações significativas. Entre os principais avanços, destaca-se o uso da IA para otimizar processos operacionais por meio de redes neurais, robótica, IoT e deep learning, contribuindo para a automação da triagem, do descarte e do monitoramento em tempo real dos resíduos, o que pode reduzir impactos ambientais e riscos à saúde pública (Ahmed *et al.*, 2022; Chew *et al.*, 2023).

Além disso, a IA tem potencial para promover práticas mais sustentáveis, alinhadas a conceitos de economia circular, e pode ser utilizada como ferramenta de conscientização pública, especialmente no descarte correto de medicamentos e resíduos de serviços de saúde, envolvendo mais ativamente a sociedade (Alshehri, 2022; Bui, 2022). No entanto, há limitações importantes, como a escassez de infraestrutura tecnológica em regiões menos desenvolvidas, os altos custos de implementação e a necessidade de qualificação técnica (Fang *et al.*, 2023).

Outro ponto crítico é a baixa integração da IA na educação em saúde ambiental voltada à capacitação de profissionais da saúde, o que limita a sustentabilidade das práticas no cotidiano dos serviços. Além disso, barreiras culturais, resistência à mudança e a falta de dados estruturados para alimentar os sistemas de IA comprometem sua eficácia e dificultam a adoção em larga escala (Sinthiya; Chowdhury; Haque., 2022). Assim, embora promissora, a aplicação da IA no campo da gestão de RSS e da educação em saúde ainda exige superação de desafios técnicos, estruturais e humanos para alcançar seu pleno potencial.

A análise dos estudos revisados revela uma diversidade significativa nas aplicações da IA voltadas à gestão de RSS, especialmente em ambientes hospitalares. As soluções identificadas abrangem etapas como coleta, segregação, reciclagem e previsão da geração de resíduos, demonstrando o potencial da IA em promover maior eficiência, automação e sustentabilidade nesses processos. Entre os principais benefícios observados, destacam-se a melhoria na tomada de decisão, a redução de riscos ambientais e a otimização de recursos operacionais.

No entanto, grande parte dessas abordagens encontra-se ainda em estágios iniciais ou experimentais, enfrentando barreiras significativas para a sua implementação em larga escala. Dentre os desafios, ressaltam-se a complexidade dos RSS, exigências regulatórias rigorosas, insuficiência de infraestrutura, limitação de recursos financeiros e resistência institucional à adoção de novas tecnologias.

A revisão também evidenciou lacunas importantes, como o uso incipiente da IA na educação continuada em saúde. São escassas as iniciativas que empregam essa tecnologia na capacitação de profissionais e gestores, o que compromete a internalização de práticas sustentáveis e o uso consciente

das inovações. Além disso, permanecem desafios relacionados à ética, transparência algorítmica, proteção de dados e equidade no acesso às tecnologias digitais.

Diante desse cenário, torna-se fundamental investir em pesquisas aplicadas, no desenvolvimento de soluções adaptadas a diferentes contextos e na formulação de políticas públicas que incentivem o uso ético, responsável e sustentável da IA. A consolidação da inteligência artificial como ferramenta estratégica na gestão de resíduos de serviços de saúde dependerá da articulação entre inovação tecnológica, capacitação profissional, infraestrutura adequada e marcos regulatórios eficazes.

5 CONCLUSÃO

A análise dos estudos evidencia que a aplicação da Inteligência Artificial na gestão de resíduos de serviços de saúde configura-se como uma estratégia promissora para a qualificação dos processos operacionais e para a promoção de práticas mais sustentáveis. Tecnologias como redes neurais, robótica, Internet das Coisas e deep learning demonstram potencial para otimizar etapas como triagem, monitoramento e previsão da geração de resíduos, contribuindo para a redução de impactos ambientais e riscos à saúde pública. Além disso, a incorporação da IA em ações educativas e de conscientização amplia as possibilidades de transformação comportamental, tanto entre profissionais de saúde quanto na população, fortalecendo a cultura de sustentabilidade e o manejo adequado dos resíduos.

Entretanto, os achados também revelam que a implementação dessas tecnologias ainda enfrenta desafios significativos, como limitações de infraestrutura, custos elevados, escassez de dados estruturados e necessidade de capacitação técnica. Soma-se a isso a baixa integração da IA em estratégias de educação em saúde ambiental e a resistência institucional à adoção de inovações, o que compromete a efetividade e a sustentabilidade dessas soluções no cotidiano dos serviços. Assim, apesar do seu potencial transformador, a consolidação da IA na gestão de resíduos de serviços de saúde depende de investimentos em pesquisa aplicada, qualificação profissional, desenvolvimento de políticas públicas e fortalecimento de uma abordagem integrada que articule tecnologia, educação e gestão.

6 UTILIZAÇÃO DE IA GENERATIVA

Durante a preparação deste manuscrito, os autores utilizaram o Genspark e o ChatGPT apenas para o auxílio de leitura na etapa da seleção dos resumos dos artigos e artigos na integra e apoio para edição de texto, correção gramatical e tradução. Após a utilização destas ferramentas, os autores revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado. Os autores permanecem totalmente responsáveis pela originalidade, exatidão,

validade e integridade de todo o conteúdo submetido, incluindo dados, análises, citações, interpretações e conclusões.

REFERÊNCIAS

Abdallah, M.; Talib, M.; Feroz, S.; Nasir, Q. Artificial intelligence applications in solid waste management: A systematic research review. Waste Management, [s. l.], v. 109, p. 1-11, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X20302269. Acesso em: 14 abr. 2026.

Abrelpe. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil. In: Centro Universitário de Anápolis (org.). Unievangélica programa de pós-graduação em sociedade, tecnologia e meio ambiente. Ed. Especial. Anápolis: [s. n.], 2022. p. 1–74.

Abrema. Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2025. São Paulo: ABREMA, 2025. Disponível em: https://static.poder360.com.br/2025/12/panorama-2025.pdf.

Agerst. Agência Reguladora de Serviços Públicos de Santa Cruz do Sul. Santa Cruz do Sul, [2025]. Disponível em: https://www.agerst-rs.com.br/.

Ahmed, S.; Mubarak, S.; Du, J. T.; Wibowo, S. Forecasting the Status of Municipal Waste in Smart Bins Using Deep Learning. International Journal of Environmental Research and Public Health, [s. l.], v. 19, n. 24, p. 16798, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/1660-4601/19/24/16798/htm. Acesso em: 14 abr. 2026.

Alshehri, D. Increasing Awareness of Proper Disposal of Unused and Expired Medication Using a Knowledge-Based Disposal Management System. Journal of Environmental and Public Health, [s. l.], v. 2022, 2022. Disponível em https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2022/1797440. Acesso em: 14 abr. 2026.

Andeobu, L.; Wibowo, S. Artificial intelligence applications for sustainable solid waste management practices in Australia: A systematic review. Science of The Total Environment, [s. l.], v. 834, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969722024822. Acesso em: 14 abr. 2026.

Arksey, H.; O'malley, L. Scoping studies: towards a methodological framework. International Journal of Social Research Methodology, [s. l.], v. 8, n. 1, p. 19-32, 2005. Disponível em: https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/1364557032000119616. Acesso em: 21 abr. 2026.

Banjar, H.; Alrowithi, R.; Alhadrami, S. An intelligent system for proper management and disposal of unused and expired medications. International Journal of Environmental Research and Public Health, [s. l.], v. 19, n. 5, p. 2875, 2022. Disponível em: https://www.mdpi.com/1660-4601/19/5/2875. Acesso em: 14 abr. 2026.

Barbosa BCA, Viana AF, Celedonio DB, Barroso DFR, Marinho GM. Avaliação da destinação final dos resíduos de serviço de saúde em um município no norte do estado do Maranhão. Holos, [s. l.], v. 5, 2022. Disponível em: https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/13664. Acesso em: 14 abr. 2026.

Bardin, L. Análise de conteúdo. São Paulo: Edições 70, 2011.

Bui, T. Understanding the barriers to sustainable solid waste management in society 5.0 under uncertainties: a novelty of socials and technical perspectives on performance. Environmental Science and Pollution Research, [s. l.], v. 29, n. 11, p. 16265–16293, 2022. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-021-16962-0. Acesso em: 14 abr. 2026.

Chew XY, Khaw KW, Alnoor A, Ferasso M, Al Halbusi H, Muhsen YR. Circular economy of medical waste: novel intelligent medical waste management framework based on extension linear Diophantine fuzzy FDOSM and neural network approach. Environmental Science and Pollution Research, [s. l.], v. 30, n. 21, p. 60473–60499, 2023. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1007/s11356-023-26677-z. Acesso em: 14 abr. 2026.

Fang B, Yu J, Chen Z, Osman AI, Farghali M, Ihara I, Hamza EH, Rooney DW, Yap PS. Artificial intelligence for waste management in smart cities: a review. Environ Chem Lett. 2023 May 9:1-31. doi: 10.1007/s10311-023-01604-3. Epub ahead of print. PMID: 37362015; PMCID: PMC10169138.

Galvão, T. F. Revisões sistemáticas da literatura: passos para a execução. Brasília: Editora MS, 2019.

Ihsanullah, I.; Alam, G.; Jamal, A. Recent advances in applications of artificial intelligence in solid waste management: A review. Chemosphere, [s. l.], v. 303, 2022. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0045653522031241. Acesso em: 14 abr. 2026.

Kshirsagar, Pravin R., Kumar, Neeraj, Almulihi, Ahmed H., Alassery, Fawaz, Khan, Asif Irshad, , Saiful, Rothe, Jyoti P., Jagannadham, DBV, Dekeba, Kenenisa, Técnica robótica baseada em inteligência artificial para materiais residuais reutilizáveis, Inteligência Computacional e Neurociência, 2022, 2073482, 9 páginas, 2022. https://doi.org/10.1155/2022/2073482.

Levac, D.; Colquhoun, H.; O'brien, K. K. Scoping studies: advancing the methodology. Implementation Science, [s. l.], v. 5, n. 1, 2010. Disponível em: https://link.springer.com/article/10.1186/1748-5908-5-69. Acesso em: 14 abr. 2026.

Lloyd, J. S. Expanding safe waste management to public health systems. The Lancet, [s. l.], v. 393, n. 10168, p. 225, 2019. Disponível em: thelancet.com. Acesso em: 25 jun. 2025.

Navia, R. Waste management and artificial intelligence: Is it happening already? Waste Management & Research, [s. l.], v. 42, n. 4, p. 285–286, 2024. Disponível em: https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0734242X241232570. Acesso em: 14 abr. 2026.

ONU. Organização das Nações Unidas. Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. [S. l.], [20--]. Disponível em: https://brasil.un.org/pt-br/sdgs. Acesso em: 14 abr. 2026.

Page, M.; Mckenzie, J.; Bossuyt, P. The Prisma 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. BMJ, [s. l.], v. 372, 2021. Disponível em: bmj.com. Acesso em: 14 abr. 2026.

Peters, M.; Godfrey, C. Scoping reviews. [S. l.]: JBI Manual for Evidence Synthesis, 2020. Disponível em: jbi.global. Acesso em: 14 abr. 2026.

Scarbrough, H.; Kyratsis, Y. From spreading to embedding innovation in health care: Implications for theory and practice. Health Care Manage Rev., [s. l.], v. 47, n. 3, p. 236–244, 2022. Disponível em: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/34319279/. Acesso em: 14 abr. 2026.

Silva, J.; Oliveira, M.; Souza, C. Aplicações da inteligência artificial na educação em saúde ambiental: desafios e perspectivas. Revista Brasileira de Saúde Ambiental, São Paulo, v. 19, n. n. 2, p. 45–60, 2023.

Sinthiya, N. J.; Chowdhury, T. A.; Haque, A. K. M. B. Artificial intelligence based Smart Waste Management: a systematic review. In: LAHBY, M. *et al.* (org.). Computational Intelligence Techniques for Green Smart Cities. [S. l.]: Springer, 2022. p. 67–92. Disponível em: springer.com. Acesso em: 21 abr. 2026.

Xu, A.; Chang, H.; Xu, Y.; Li, R.; Li, X. Applying artificial neural networks (ANNs) to solve solid waste-related issues: A critical review. Waste Management, [s. l.], v. 124, p. 385-402, 2021. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X21000982