

Impactos de um modelo de coleta e compostagem de resíduos orgânicos apoiado pela inteligência artificial

RESUMO

Este trabalho objetiva avaliar um modelo de negócios, apoiado por tecnologias inovadoras e Inteligência Artificial (IA), que fomente a compostagem de resíduos orgânicos produzidos em residências e empresas. O estudo concentrou foco na empresa Organokits, localizada na cidade de Nova Friburgo-RJ, que realiza a coleta e compostagem de resíduos orgânicos. Foram avaliados os impactos sociais, considerando-se variáveis como geração de trabalho e renda, e os impactos ambientais, analisando-se a eventual redução dos custos pagos pelo poder público e da emissão de gases de efeito estufa (GEE) e geração de chorume. Os resultados indicaram impactos sociais e ambientais positivos deste tipo de empreendimento, indicando que a IA pode apoiar a educação ambiental e incrementar a eficiência operacional, reduzindo a emissão de GEE. Acredita-se que este trabalho pode contribuir nas análises e reflexões, tanto no meio acadêmico quanto no meio empresarial, relacionadas à gestão de resíduos orgânicos.

PALAVRAS-CHAVE: Gestão de Resíduos. Impactos Ambientais. Impactos Sociais. Sistemas de Informação.

Antônio Claudio Monteiro Nascimento

Universidade Veiga de Almeida (UVA), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil
aclaudion@hotmail.com

Anderson Amendoeira Namen

Universidade Veiga de Almeida (UVA), Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), Nova Friburgo, Rio de Janeiro, Brasil
aanamen@iprj.uerj.br

INTRODUÇÃO

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais – ABRELPE, em 2022 foram geradas 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil. Desse total, 5,7 milhões de toneladas nem foram objeto de coleta, tendo destinação imprópria (ABRELPE, 2022). Das cerca de 76,1 milhões de toneladas de RSU coletadas, apenas 61% foram dispostas em aterros sanitários, sendo o restante direcionado a lixões e aterros controlados, constituindo-se um sério problema ambiental, social e econômico. Quanto à composição dos RSU, a fração orgânica permanece como seu principal componente (45,3%), havendo um descarte médio de 170 kg de matéria orgânica por pessoa a cada ano (ABRELPE, 2022). Concentrando o foco no município de Nova Friburgo, local onde foi realizada a pesquisa, e considerando a estimativa gravimétrica definida pelo Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro (GERJ, 2013), pode-se ponderar que 53,03% dos RSU do município, considerado de médio porte, é composto de matéria orgânica.

Avaliando esse cenário, surge a necessidade de propor iniciativas as quais os resíduos passam a ser novos insumos em processos menos onerosos, sob a perspectiva ambiental, substituindo a simples disposição final em aterros, com aplicação de uma abordagem berço a berço (*cradle-to-cradle*). Nesta nova abordagem, abre-se a oportunidade de revisar radicalmente os desperdícios nos sistemas produtivos existentes e em desenvolvimento, buscando atender as demandas com a menor pegada ambiental possível (KOPNINA, 2018).

Dentro dessa perspectiva, a compostagem torna-se uma alternativa sustentável e econômica para auxiliar os municípios brasileiros a darem uma destinação adequada à fração orgânica dos RSU. Com a redução da massa recolhida (kg) e do volume gerado (m³), é possível reduzir as taxas pagas pelo poder público alocadas para transporte e disposição em aterros sanitários. Outro benefício é a redução do custo de fertilização na produção agrícola (VIAENE et al., 2016). A potencial redução na aplicação de fertilizantes químicos implica também na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE) associadas à sua produção e utilização (FAVOINO; HOGG, 2008). Ainda em relação à redução dos GEE, ressalta-se que esses são produzidos em grande volume nos aterros sanitários, devido à degradação da matéria orgânica sob condições anaeróbicas, problema que pode ser minimizado a partir da compostagem dos resíduos orgânicos (SÁNCHEZ et al., 2015). Deve-se ter em conta que a emissão de GEE está diretamente relacionada com as mudanças climáticas globais, que têm gerado, como consequência, o aumento acentuado da frequência e da intensidade dos desastres naturais, o aumento do nível do mar, a diminuição da produtividade das colheitas e a perda da biodiversidade (SHIVANNA, 2022).

Deve-se considerar também a questão da produção de chorume nos aterros sanitários, em decorrência da percolação das águas de chuva na massa de resíduos. O chorume apresenta, como características gerais, concentração elevada de matéria orgânica, recalcitrância aos processos biológicos de tratamento, presença de nitrogênio amoniacal e sais e toxicidade aos organismos aquáticos. Este efluente causa um grande impacto ambiental, devido à alta concentração de matéria orgânica em decomposição, que demanda uma grande quantidade de oxigênio, retirado do meio que ele atinge, que pode prejudicar a fauna e flora aquática (SOUSA et al., 2015).

Gestão de resíduos sólidos: panorama, fundamentos e tecnologias

A gestão eficiente de resíduos sólidos urbanos (RSU) é um pilar da sustentabilidade urbana. Ela abrange etapas interligadas — geração, segregação, coleta, transporte, tratamento e disposição final — que visam à redução de impacto ambiental e à criação de oportunidades de valorização baseados na economia circular (KAFLE et al., 2025; SASAHARA et al., 2024). Exemplo de êxito nesta questão, a cidade de São Francisco (Califórnia, EUA), possui uma política estruturada de coleta seletiva e compostagem descentralizada, mantendo um contínuo diálogo entre a sociedade civil e o poder público e adoção de tecnologias apropriadas à escala urbana (BRAGA; RIBEIRO, 2023). Outro caso a ser citado é a cidade do Cabo, na África do Sul, referência entre países de renda média, pela sua abrangência na coleta com segregação adequada dos resíduos (BRAGA; RIBEIRO, 2021).

Analisando processos inovadores de gestão de resíduos sólidos de um modo mais amplo, trabalhos como os de Negreiros Gomes et al. (2023), Delgado-Antequera et al. (2020), Pardini et al. (2020), Babae Tirkolae et al. (2019), Bányai et al. (2019), Lozano et al. (2018) e Medvedev et al. (2015) utilizam diversas soluções tecnológicas (sensores, etiquetas de identificação por rádio frequência, GPS), integradas a partir do conceito de Internet das Coisas (IOT), em conjunto com modelos computacionais para otimização de rotas, visando à minimização do custo de operação e o aprimoramento dos indicadores ambientais relacionados à coleta de RSU.

Considerando mais especificamente a gestão de resíduos orgânicos, foco do presente trabalho, a compostagem, eficiente estratégia de gestão a ser aplicada, tem se beneficiado de inovações tecnológicas, como a aplicação de reatores inteligentes, inoculação microbiana e uso de aditivos como biochar, visando aprimorar a eficiência, controlar emissões e elevar a qualidade do composto orgânico produzido. Destacam-se também o uso da modelagem matemática e de reatores automatizados com IA para otimização do processo de compostagem (XU et al., 2023).

Técnicas como compostagem com membrana aeróbica e vermicompostagem emergem como alternativas, reduzindo odores e conservando nutrientes, além de melhorar a biodiversidade do solo (XU et al., 2023). A vermicompostagem, em especial, tem demonstrado eficácia em transformar resíduos domésticos e industriais em produtos de elevada qualidade e baixo custo (RATNASARI et al., 2023). Rodrigues et al. (2022) demonstram a representatividade crescente dessa modalidade no Nordeste brasileiro, associada ao reaproveitamento local de resíduos e à percepção de sustentabilidade. Oliveira da Rosa et al. (2021), por sua vez, mostram como a tecnologia social associada à compostagem em ambiente condominial se tornou um vetor de transferência de saberes, empoderamento comunitário e reconhecimento do resíduo orgânico como recurso valioso na cidade de Pelotas - RS.

Outra abordagem que pode ser utilizada consiste na digestão anaeróbica, que aplica microrganismos para decompor o resíduo orgânico, gerando biogás (metano) e digestato. Revisões científicas recentes apontam a integração com técnicas termoquímicas (pirólise, carbonização hidrotérmica) como meio eficaz de valorizar o digestato, gerando biofertilizantes, biochar e outros produtos de valor (DUTTA et al., 2021). No Brasil, Amorim (2024) reafirma esta abordagem ao

analisar a viabilidade de geração de biometano a partir de resíduos em um restaurante universitário.

Abordando especificamente o uso de tecnologias para aprimoramento do processo de compostagem, Guo et al. (2020) fazem uma revisão ampla de trabalhos que aplicam métodos de aprendizagem de máquina para aprimoramento de processos de tratamento e reciclagem desse tipo de resíduo. Sendo ainda mais específico, e abordando apenas soluções relacionadas a dispositivos inteligentes para compostagem (composteiras ou leiras inteligentes), podem ser citados os trabalhos de Bhoir et al. (2020), Pansari et al. (2018), Jordão et al. (2017) e Casas et al. (2014).

Dentro desse cenário, acredita-se na oportunidade de desenvolvimento de tecnologias inovadoras e soluções baseadas em Inteligência Artificial (IA), que podem servir de alicerce para a criação de um modelo que estimule o processo de compostagem de resíduos orgânicos. Esse modelo pode permitir que os geradores envolvidos (famílias ou empresas geradoras de resíduos orgânicos) se integrem a uma rede de coletores e receptores do subproduto produzido (composto orgânico) a partir do processo de compostagem. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho consiste na avaliação dos impactos sociais e ambientais de um modelo de coleta e compostagem de resíduos orgânicos produzidos em residências e empresas, apoiado por tecnologias inovadoras e IA.

Modelo proposto

O modelo proposto previu a interação dos diversos elementos e/ou atores da rede de compostagem, tais como as Unidades Geradoras de Resíduos Orgânicos (UGROs), Veículos Coletores (VCs), Ponto de Compostagem (PC), Unidades Consumidoras de Composto Orgânico (UCCOs) e os sistemas computacionais projetados para seus devidos fins específicos. Entre esses sistemas, foi desenvolvido um modelo inteligente de coleta de resíduos orgânicos em residências e empresas (UGROs) localizadas na região central e bairros adjacentes no município de Nova Friburgo/RJ. A coleta destes resíduos pode ser realizada por meio de diferentes modais de transporte – triciclos de tração humana e veículos automotores – tendo como destino um PC central. O PC central é equipado com uma leira inteligente responsável pela transformação do resíduo em composto orgânico. O produto resultante deste processo pode ser vendido pela empresa que realiza a coleta dos resíduos ou encaminhado para UCCOs, tais como unidades de agricultura familiar e hortos públicos.

Do ponto de vista operacional, um sistema de coleta é responsável por estimar rotas ótimas entre UGROs, via VCs, tendo como ponto de disposição final o PC. Este processo consiste na criação de um cronograma otimizado de coletas baseado nos aspectos temporais envolvidos na disponibilização dos resíduos orgânicos, nas limitações de oferta e demanda da rede, nas diferentes capacidades dos modais envolvidos e suas respectivas localizações, bem como questões relacionadas à distância entre UGROs e VCs, dadas as características topográficas da região. O objetivo principal consiste na minimização das distâncias percorridas pelos veículos, com consequente redução dos custos envolvidos e da emissão de GEE.

Diversas pesquisas abordam questões relacionadas à otimização de rotas na coleta de resíduos, como Huang e Lin (2015), Babae Tirkolae et al. (2019), Delgado-Antequera et al. (2020), Yu et al. (2020), Liang et al. (2022) e Gomes et al. (2023). No caso do modelo aqui proposto, considerando que os VCs devem visitar pontos em intervalos de tempo pré-determinados, o módulo de planejamento de rotas utiliza técnicas para a resolução de problemas de roteirização, mais especificamente uma subcategoria dessa classe de problemas, denominada roteirização de veículos com janelas de tempo. Salienta-se que o sistema de otimização de rotas se encontra em fase final de desenvolvimento (em março de 2024), sendo que o modelo computacional para a otimização das rotas de coleta dos resíduos já foi desenvolvido, faltando a conclusão do aplicativo que permitirá a visualização das rotas otimizadas em um dispositivo móvel (Figura 1).

Figura 1 - App de Rotas Otimizadas para Coleta de Resíduos - Tela principal do aplicativo móvel para apresentação das rotas otimizadas de coleta de resíduos – versão em desenvolvimento – março/2024.



Fonte: Os autores.

Outra solução tecnológica, a leira inteligente de compostagem, tem como função principal automatizar e compartilhar dados sensíveis no processo de compostagem, podendo auxiliar na melhoria do processo, a partir da identificação das condições mais adequadas para umidificação ou reviramento dos resíduos existentes na leira. O monitoramento do processo de compostagem em tempo real é realizado por um microcontrolador Arduino de baixo custo, no qual são acoplados sensores de temperatura e umidade da leira e sensores de umidade e temperatura do ambiente (Figuras 2 e 3). Cabe ressaltar que os processos de compostagem são controlados para atender às normativas que regulam o processo de compostagem e a qualidade dos compostos orgânicos: Resolução 481 do

Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA (CONAMA, 2017) e Instruções Normativas 27 e 61 do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento – MAPA (MAPA, 2006; MAPA, 2020). A leira inteligente de compostagem já foi desenvolvida, sendo que está sendo iniciada (março de 2024) a coleta dos dados para avaliação do processo de compostagem.

Figura 2 – Leira de compostagem inteligente com sensores de temperatura e umidade.



Fonte: Os autores.

Figura 3 – Equipamento que registra os dados coletados pelos sensores e os envia para armazenamento na nuvem.

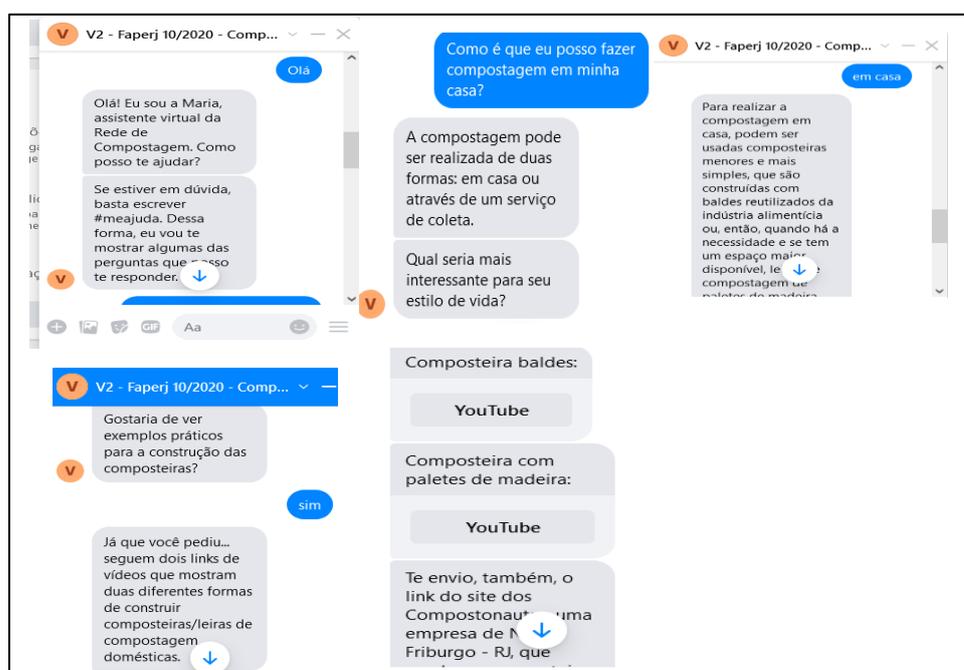


Fonte: Os autores.

Segundo HAMMES (2004), as atividades de educação ambiental precisam ser diferenciadas da metodologia tradicional de ensino, devendo aplicar práticas motivadoras de aprendizado. Nesse sentido, sob a ótica educacional, a difusão e promoção de práticas para a educação ambiental relacionadas com o tratamento de resíduos e técnicas de compostagem são realizadas com apoio de um Assistente Virtual, criado especificamente para o projeto, em conjunto com estratégias de Gamificação.

Com apoio de técnicas de Processamento de Linguagem Natural e de algoritmos de aprendizagem de máquina (SHEVAT, 2017), o Assistente Virtual propicia para os indivíduos que fazem parte das UGRs, habitantes das residências e funcionários das empresas onde efetua-se a coleta, um canal de comunicação interativo e personalizado para obtenção de informações sobre assuntos relacionados à gestão de resíduos. Caracterizada como uma tecnologia assistiva, a aplicação audível eleva a comunicação entre os atores ao suportar comandos de voz. Com relação às integrações e mensageiros suportados, a versão do assistente possui interfaces de comunicação disponíveis ao usuário via *Web* (acessível através de uma página na internet) e Facebook Messenger (através de mensagens para uma página do Facebook em que a assistente estará conectada – ver Figura 4). Desta forma, é mantido um histórico de conversa que permite que o assistente seja integrado em outras páginas web através do *plug-in* do Facebook Messenger. Ressalta-se que o Assistente Virtual já foi desenvolvido e se encontra em fase final de testes e validação (em março de 2024).

Figura 4 – Exemplos de interação com o Assistente Virtual desenvolvido.

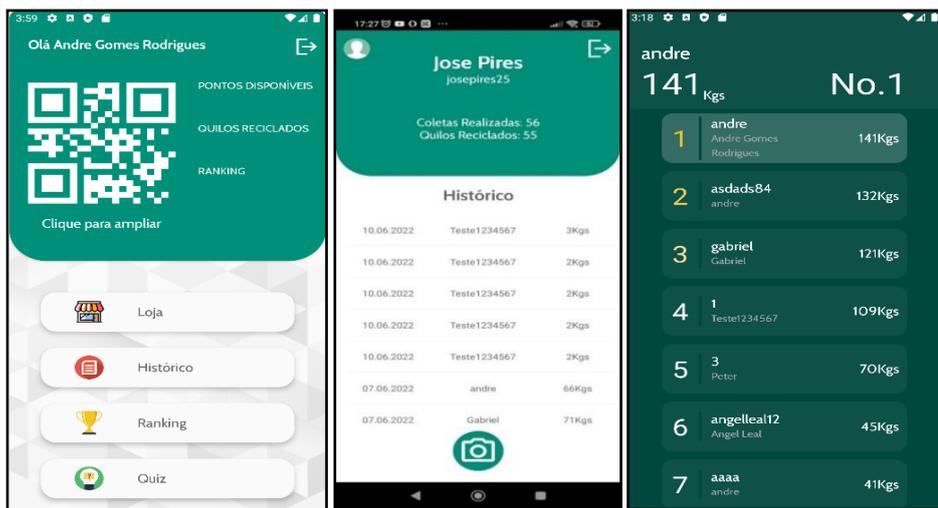


Fonte: Os autores.

A gamificação, por sua vez, é aplicada como método de aprendizagem e engajamento, sendo esta pautada por metas educacionais e ambientais atreladas a um modelo de recompensa envolvendo as UGRs e empresas parceiras do projeto. A estratégia de gamificação é apoiada nos princípios delineados por Busarello (2016). A estruturação do jogo, sob a ótica ambiental, envolve princípios relacionados à aprendizagem, definição das narrativas, elementos e mecânica do jogo. Em relação à motivação e engajamento, é utilizado um sistema de recompensas com uso de moedas virtuais, que podem ser acumuladas ao explorar as narrativas e mecânicas elaboradas do jogo. A atribuição de pontos a usuários - clientes que separam e destinam seus resíduos orgânicos para a empresa de coleta e compostagem - considera tanto o nível de engajamento do usuário no jogo (ex.:

participação e acertos em quizzes) quanto a massa de resíduos orgânicos separados para posterior compostagem. Estas pontuações poderão ser convertidas em descontos em serviços e/ou produtos oferecidos pelos parceiros do projeto. A aplicação encontra-se em fase final de desenvolvimento, com previsão de ser concluída em julho de 2024 (Figura 5).

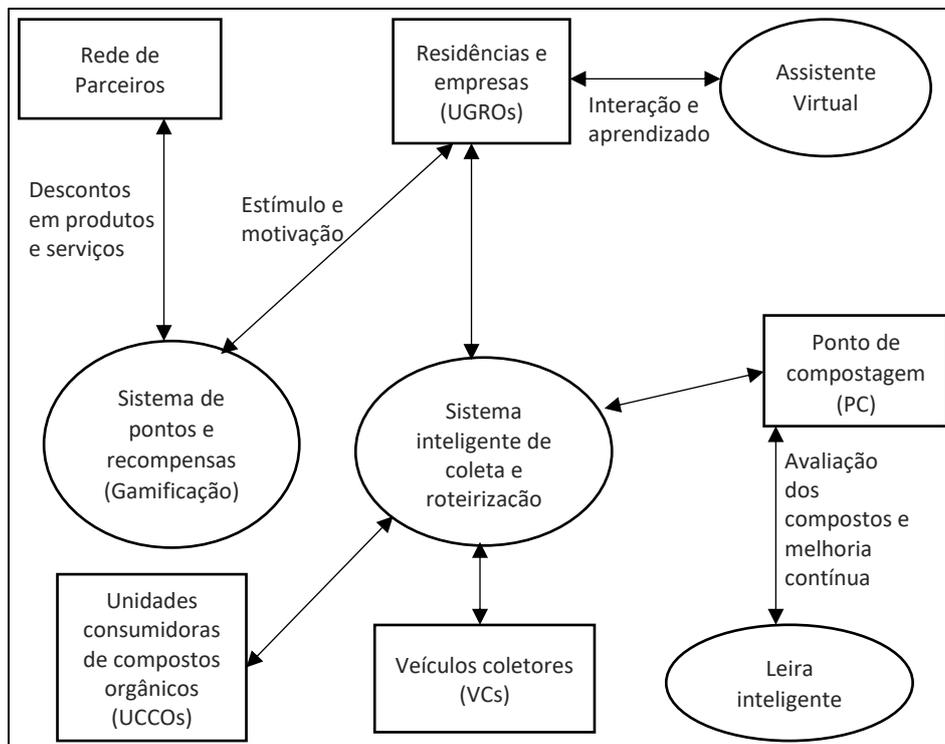
Figura 5 – Sistema de recompensas desenvolvido (telas do app para *smartphone*).



Fonte: Os autores.

A Figura 6 apresenta um diagrama esquemático do modelo proposto.

Figura 6 - Esquema diagramático do modelo proposto.



Fonte: Os autores.

METODOLOGIA

Objeto de estudo

O estudo concentrou foco nas atividades desenvolvidas pela empresa Organokits, principal participante do projeto desenvolvido. A Organokits, fundada em 2019 para coleta e compostagem de resíduos orgânicos, possui sua sede na cidade de Nova Friburgo no estado do Rio de Janeiro. A empresa contava no mês de abril de 2023 com 112 clientes cadastrados e efetuava em torno de 300 atendimentos mensais, sendo aproximadamente 220 residenciais e 80 empresariais, compostando uma massa mensal de 3,0 toneladas de resíduos orgânicos coletados nas UGROs. Na Figura 7 é apresentado o pátio de compostagem da empresa.

Figura 7 - Pátio de Compostagem da empresa Organokits.



Fonte: Os autores.

Coleta e análise de dados

Os dados foram coletados junto à empresa Organokits, ator central presente em todas as atividades desenvolvidas dentro do modelo de coleta e compostagem de resíduos estudado. Foram coletados e analisados dados referentes aos impactos sociais e ambientais relacionados ao modelo proposto.

Sob o ponto de vista dos impactos sociais relacionados à geração de trabalho e renda, foram coletados, junto à empresa Organokits, os dados referentes ao número de funções geradas e profissionais demandados, considerando as demandas relacionadas à coleta de resíduos orgânicos (ROs) nas residências e empresas atendidas, assim como as atividades relacionadas ao processo de compostagem e à comercialização do composto orgânico produzido.

No que tange à redução dos impactos ambientais, um primeiro indicador se referiu à redução das despesas do poder público. Nesse aspecto, foi coletado o

dado do valor anual pago pela Prefeitura Municipal de Nova Friburgo para a concessionária EBMA (Empresa Brasileira de Meio Ambiente), que administra o aterro sanitário. Apesar do contrato de concessão com a EBMA não ser feito diretamente com base nesta lógica, os cálculos assumiram a hipótese de o pagamento dos serviços de concessão ser proporcional à massa e ao volume de resíduos descartados no aterro sanitário. Assim, para o cálculo de uma eventual redução das despesas aplicou-se, sobre o valor anual pago à EBMA, o percentual de redução de envio da massa de resíduos ao aterro devido à atuação da Organokits no processo de coleta e compostagem de resíduos. Devido à imprecisão da volumetria gerada pelos RSU Orgânicos, ela não será considerada para efeito de cálculo.

Outro impacto ambiental analisado foi a redução na emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE), uma vez que o processo de decomposição dos ROs gera subprodutos que podem causar impactos ambientais. O aumento acentuado da concentração de GEE na atmosfera, especialmente dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), tem sido associado às fontes antropogênicas. Nesse sentido, ao se destinar ROs aos Aterros Sanitários (ASs) há uma geração de GEEs ocasionada pela emissão de CH₄ para a atmosfera (NORDAHL et al., 2020).

O volume de Gás Metano (CH₄) gerado em um Aterro Sanitário correspondente a cada tonelada de resíduos orgânicos recebida, chega a 0,85 t CO₂-eq em um período de 10 anos (INÁCIO et al., 2010). Mesmo para os ASs que aplicam métodos de queima do metano ou produção de biogás, ainda ocorre uma fuga estimada entre 30% e 40% deste gás para a atmosfera, segundo a metodologia AMS III (*Avoidance of methane emissions through controlled biological treatment of biomass*), utilizada por Unnikrishnan et al. (2010).

Considerando os números apresentados, verifica-se então que cada tonelada de RO destinada a um aterro sanitário implica em uma emissão de 0,255 t CO₂-eq, ou seja, 30% das 0,85 t CO₂-eq mencionadas. Ao se considerar o processo de compostagem de ROs, a massa de CH₄ liberado no mesmo período de 10 anos para uma tonelada de RO é de 0,084 t CO₂-eq (INÁCIO et al., 2010). Pode-se dizer então que a compostagem de cada tonelada de ROs reduz em 0,171 t CO₂-eq a massa de gás metano perdido para a atmosfera. Assim, esse último valor foi multiplicado pela quantidade de toneladas de resíduos orgânicos coletados pela empresa Organokits, no intuito de avaliar a redução da massa de Gás Metano emitido.

Finalmente, o cálculo da redução de CO₂ emitido, considerando a utilização do modelo analisado, foi estimado pela diferença entre o que era gerado pela Organokits (emissão de CO₂ por km e distância percorrida) antes da implementação do sistema de roteirização e a emissão posterior à implantação do sistema. Assim, foi possível avaliar o ganho obtido pela otimização das rotas e redução do consumo de combustível. Salienta-se que essas informações foram obtidas a partir dos resultados da pesquisa desenvolvida pelos pesquisadores que elaboraram o sistema de otimização de rotas (detalhes em Libotte et al., 2023).

Outra análise se referiu à redução da geração de chorume no aterro sanitário, devido à degradação biológica dos ROs, tendo alto poder poluente e de contaminação do solo, corpos aquáticos e lençóis freáticos. Segundo Soares et al. (2022), considerando um tratamento de 120 m³ de chorume por dia, evita-se a eliminação na natureza de 107,84 Kg por ano de Nitrogênio ao meio ambiente,

além de 110,95 Kg por ano de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), que é a quantidade de oxigênio necessária para que os organismos biológicos presentes nas águas residuais possam fazer seu processo de quebra de matéria orgânica em água. Além disso, é evitado o descarte de 211,70 Kg por ano de DQO (Demanda Química de Oxigênio), indicando que quanto maior a solubilidade do lixiviado, menor será a emissão de gases de efeito estufa.

Para avaliação do impacto na redução da geração e tratamento de chorume, inicialmente foi levantada a quantidade de chorume tratada anualmente no Aterro Sanitário de Nova Friburgo, a partir do acesso a relatório de vistoria do INEA junto à concessionária que o administra (INEA, 2019). Em seguida, foi calculado o percentual de redução no envio de resíduos sólidos orgânicos ao aterro, considerando a população estimada do município, a estimativa de geração anual de resíduos sólidos orgânicos por esta população e a massa de resíduos orgânicos coletada anualmente pela empresa Organokits. Desse modo, a redução na geração e tratamento de chorume no aterro foi obtida a partir da multiplicação da quantidade de chorume anualmente tratada no aterro sanitário pelo fator de redução mencionado.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Impactos sociais

Considerando a perspectiva de geração de trabalho e renda propiciada pela empresa Organokits, esta contava no mês de abril de 2023 com 112 clientes cadastrados que eram atendidos por quatro profissionais, sendo três prestadores de serviços e o proprietário, que se dividiam nas funções de motorista, coletor, operador de compostagem e administrativo. Para remuneração desses profissionais fazia-se uso do valor de R\$ 11.979,20 de despesas com profissionais fixos e eventuais, a um custo médio de R\$ 2.994,80 por profissional.

É importante salientar que o caso aqui analisado se refere a uma empresa de pequeno porte, que atende apenas pouco mais de 100 clientes. No entanto, cumpre ressaltar o papel desse tipo de empreendimento para a sociedade. Conforme De Jesus et al. (2019), as microempresas cumprem um importante papel na sociedade, auxiliando, a partir da geração de empregos, na diminuição da desigualdade entre classes. Ainda segundo esses últimos autores, somente em julho de 2018, as micro e pequenas empresas foram responsáveis por 72 por cento dos empregos originados no Brasil. Nesse sentido, fomentar a criação de novos empreendimentos focados na coleta e compostagem de resíduos, pode ser uma política importante para a geração de renda e trabalho.

Outro importante impacto do modelo proposto se refere à criação de ferramentas de apoio à educação e conscientização ambiental, como o Assistente Virtual e o app de recompensas (gamificação). Deve-se ter em mente o potencial desses tipos de ferramentas. No entanto, devido às limitações de tempo, não foi realizada a análise comparativa em termos da evolução da conscientização dos indivíduos quanto à gestão de ROs antes e depois do uso das aplicações mencionadas, uma vez que as aplicações ainda estão em fase final de implantação. Essa análise poderá ser efetuada em futuros trabalhos.

Mesmo não tendo sido realizada essa avaliação, cabe ressaltar que diversos trabalhos mostram os resultados positivos das ferramentas de gamificação para a educação ambiental (SANTOS, 2023; VAZ, 2022; DE LIMA BEZERRA; DE JESUS LIMA, 2020; DUARTE et al., 2020; DE JESUS COSTA; TORRES, 2019), sendo suas peculiaridades apresentadas na Figura 8. Ademais, considerando as características relacionadas aos Assistentes Virtuais (Figura 9), um conjunto de resultados positivos relacionados ao seu uso, não especificamente na área ambiental, também são descritos em Ota et al. (2019) e Teixeira et al. (2020).

Figura 8 – Gamificação - Características.

Características da Gamificação
Uso de premiações e placares
Regras e passos a serem seguidos
Alto nível de interação
Motiva a mudança de postura dos participantes
Apresenta regras bem definidas
Níveis progressivos de dificuldade
Conflito/competição/cooperação
Pontuação, recompensa e feedback
Desenvolve habilidades inovativas

Fonte: Os autores. Adaptado de Santos (2023); Vaz (2022); De Lima Bezerra e De Jesus Lima (2020); Duarte et al. (2020); De Jesus Costa e Torres (2019).

Figura 9 - Assistentes Virtuais - Características.

Características dos Assistentes Virtuais
Simplificam e auxiliam a comunicação
Respondem às dúvidas mais frequentes
Melhoram a experiência do usuário
Disseminam informações relevantes
Apoiam a educação do usuário
Disponibilizam informação em tempo integral

Fonte: Os autores. Adaptado de Ota et al. (2019) e Teixeira et al. (2020).

Considerando que as ferramentas citadas serão disponibilizadas gratuitamente para outras empresas de perfil semelhante à Organokits, a já mencionada sugestão de fomento à criação de novos empreendimentos focados na coleta e compostagem de resíduos, que poderiam utilizar essas ferramentas, também representaria uma política importante no que tange ao aprimoramento do processo de educação ambiental dos cidadãos.

Impactos ambientais - Redução de envio de ROs para o Aterro Sanitário e das despesas do poder público

A empresa Organokits recolhe mensalmente uma massa aproximada de três toneladas de resíduos sólidos orgânicos. Assim, anualmente são retiradas 36 toneladas da coleta pública urbana no município de Nova Friburgo, onde a empresa atua. De acordo com o Relatório de Estudos Socioeconômicos de 2021 que aborda os municípios do Rio de Janeiro (TCE RJ, 2021), em Nova Friburgo foram coletadas 78.535,2 t/ano de resíduos sólidos em 2020. Desse modo, as 36 toneladas anuais de Resíduos Orgânicos destinados para compostagem através da Organokits reduzem em 0,046% a quantidade de resíduos sólidos enviados para o Aterro Sanitário do município.

Segundo dados obtidos no portal de transparência do município de Nova Friburgo (disponíveis em <http://novafriburgo-rj.portalttp.com.br/consultas/despesas/empenhos.aspx>), no ano de 2023 foi empenhado um valor de R\$ 23.720.331,06 para pagamentos dos serviços prestados pela EBMA. Cabe ressaltar que o contribuinte é o agente que acaba arcando com esses custos, uma vez que é responsável pelo pagamento anual da taxa de coleta domiciliar de lixo. Considerando a hipótese de que o pagamento dos serviços seria proporcional à massa de resíduos descartada no aterro sanitário, se for aplicado o percentual de redução de envio de resíduos devido à atuação da Organokits (0,046%), se chegaria a uma economia de R\$ 10.911,35 por ano. Esse número poderia ser considerado irrelevante; no entanto, tratando-se de uma iniciativa isolada, realizada por uma pequena empresa, poderia se vislumbrar um potencial de aumento significativo desses números, no caso do modelo ser replicado para outras empresas com atuação similar.

Impactos ambientais - Redução a emissão de GEE

Conforme mencionado anteriormente, a compostagem de cada tonelada de ROs reduz em 0,171 t CO₂-eq a massa de gás metano emitido para a atmosfera. Multiplicando-se esse valor pela quantidade de toneladas de resíduos orgânicos coletados anualmente pela empresa Organokits (igual a 36 t), evita-se a emissão de 6,156 t CO₂-eq de gás metano para a atmosfera.

Outro benefício diretamente ligado a uma das tecnologias aplicadas no presente projeto, o sistema de otimização de rotas de coleta de resíduos, foi a redução de 17,16 % na distância percorrida pelo veículo responsável pelas coletas, a partir da comparação das rotas originalmente utilizadas pela empresa Organokits e as rotas otimizadas pelo sistema (LIBOTTE et al., 2023). Ainda segundo esses últimos autores citados, considerando apenas a redução das distâncias percorridas quinzenalmente (englobando os clientes com contratos de coletas semanais e quinzenais), caso tratado pelo modelo de otimização, haveria uma redução de 345 quilômetros percorridos no período de um ano. Considerando que o carro utilizado pela empresa, um Fiat Siena 2008/2009, possui o mesmo motor do fiat UNO 1.0 e emite o equivalente a 0,05230Kg de CO₂/Km, segundo Personal CO2 zero.com (2012), a redução anual na emissão de CO₂ totalizaria 18,043 Kg.

Ressalta-se que esses cálculos não consideram a possibilidade de utilização de veículos não poluentes, como triciclos de tração humana, para a realização das coletas, uma vez que a comparação realizada considerou apenas rotas percorridas

por um automóvel. Nesse sentido, há oportunidade de incremento nesses números, a partir da criação de modelos de rotas otimizadas que considerem o uso de outros tipos de veículos, tarefa futura prevista dentro do âmbito do projeto.

Impactos ambientais - Redução da geração de chorume no aterro sanitário

Segundo relatório de vistoria do INEA (2019), o volume de chorume tratado no Aterro Sanitário de Nova Friburgo é de 7 m³ por dia, o que representa 2.555 m³ por ano, considerando-se 365 dias. A população estimada de Nova Friburgo é de 189.937 mil habitantes (IBGE, 2022). Além disso, estima-se a geração de cerca de 170 kg de resíduos orgânicos por pessoa por ano (GERJ, 2013). Desse modo, poderia se estimar um envio aproximado de 32.289 toneladas de resíduos sólidos orgânicos por ano para o aterro sanitário. Nesse sentido, as 36 toneladas de resíduos orgânicos coletadas pela Organokits representariam uma redução de 0,11% na quantidade de resíduos orgânicos enviados para o Aterro Sanitário. Multiplicando-se esse percentual pelo volume de chorume tratado anualmente (2.555 m³), chega-se ao valor de redução de 2,81 m³ de chorume a serem tratados anualmente. Comparando-se com os resultados obtidos por Soares et al. (2022), o volume desse chorume representaria, se não tratado, a emissão anual de 0,007 Kg de N, de 0,007 Kg de BOD e de 0,014 Kg de COD.

Cabe ressaltar a questão dos altos custos envolvidos na criação de plantas para o tratamento do chorume nos aterros sanitários. Detalhes relacionados a estes custos podem ser encontrados em Lima et al. (2022). Apesar dos resultados aqui obtidos representarem um pequeno montante na redução da geração de chorume, devido ao pequeno raio de ação da empresa Organokits, deve-se considerar que uma ampla replicação do modelo proposto para outras empresas com atuação similar, poderia representar economia significativa em relação a esta questão.

Consolidação dos resultados

No intuito de facilitar a visualização dos resultados da análise realizada, na Figura 10 são apresentadas, de forma consolidada e resumida, informações sobre os impactos sociais e ambientais relacionados ao modelo de coleta e compostagem de resíduos proposto. Reforça-se aqui, conforme já mencionado, que a ampla replicação deste modelo para outras empresas com atuação similar, representaria a possibilidade de aumento da escala dos impactos sociais e ambientais obtidos.

Figura 10 - Impactos Sociais/Ambientais relacionados ao modelo de coleta e compostagem de resíduos orgânicos apoiado pela IA.

Impactos Sociais		Impactos Ambientais	36 ton não direcionadas ao Aterro Sanitário (AS)
	Geração de trabalho/renda: 4 profissionais, salário médio R\$ 2.994,80		Aumento de vida útil no AS: inferior a 1 dia, para cada ano de operação da Organokits
	Apoio à educação e conscientização ambiental propiciado pelas ferramentas: app de pontos e recompensas e Assistente Virtual.		Redução nos custos de operação do AS: R\$ 10.911,35 por ano
	Redução de emissão de de 6,156 t CO ₂ -eq de gás metano para a atmosfera: redução anual na emissão de 18,043 Kg de CO ₂		
	Redução de geração de 2,81 m ³ de chorume por ano no AS.		

Fonte: Os autores.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo avaliar um modelo de negócios, apoiado por tecnologias inovadoras e IA, para fomentar a compostagem de resíduos orgânicos produzidos em unidades domiciliares e empresas. Em relação aos impactos sociais do modelo estudado, pode-se citar a geração de trabalho e renda nas empresas de coleta e compostagem dos resíduos orgânicos. Além disso, a separação dos resíduos orgânicos na origem e seu direcionamento adequado para a compostagem, traz benefícios amplos e concretos para toda a cadeia da gestão de resíduos, com destaque especial para os catadores e as cooperativas que atuam na coleta seletiva. Essa prática simples e cotidiana, quando feita de forma correta, é um ato que contribui diretamente para a promoção da dignidade do trabalho dos catadores e para a melhoria das condições sanitárias e operacionais das atividades desenvolvidas por esses profissionais. Ainda em relação aos impactos sociais, no que tange à questão da conscientização e educação ambiental, a tecnologia pode ser uma grande aliada, por intermédio do uso de aplicativos baseados no conceito de gamificação, que distribuam recompensas de acordo com o engajamento dos usuários.

Focando na questão econômica, a utilização de sistemas para otimização das rotas para a coleta de resíduos pode reduzir substancialmente os custos das empresas, sendo identificada, no presente trabalho, uma redução comprovada de 17,16% nas distâncias percorridas pelos veículos. Contudo, a dimensão ambiental também deve ser considerada, uma vez que essa otimização gera redução na emissão de gases poluentes e GEE feita pelos veículos. Adicionalmente, devem ser considerados os benefícios gerados pelo não envio dos resíduos orgânicos para os aterros sanitários. O aumento da vida útil desses aterros, a redução na produção de chorume e da emissão de gás metano resultante da decomposição desses resíduos são aspectos relevantes a serem considerados.

Cabe ressaltar que os impactos positivos relacionados à leira de compostagem inteligente, tecnologia pertencente ao modelo de negócios proposto, não foram aqui analisados. A justificativa se dá pelo fato de a leira inteligente ainda estar em processo de avaliação pelas equipes de pesquisadores envolvidas no projeto, não sendo obtidos, até o momento, resultados relacionados a uma eventual redução

no tempo de geração do composto orgânico produzido pela leira e/ou melhoria de sua qualidade em termos de presença de macronutrientes. Desse modo, futuras pesquisas poderiam identificar novos impactos positivos relacionados ao aprimoramento do processo de compostagem, implicando na melhoria dos resultados, inclusive econômicos, das empresas que fizerem uso dessa tecnologia. Salienta-se também que, devido às limitações de tempo e escopo da pesquisa, não foi realizada a análise comparativa em termos da evolução da conscientização dos indivíduos atingidos pelo projeto quanto à gestão de ROs antes e depois do uso da ferramenta de concessão de pontos e recompensas e do Assistente Virtual. Essa análise poderá ser efetuada em futuros trabalhos.

Apesar das limitações apresentadas, acredita-se que este trabalho pode contribuir de forma relevante nas análises e reflexões, tanto no meio acadêmico quanto no meio empresarial, relacionadas ao modelo estudado e ao uso de tecnologias de apoio para uma melhor gestão dos resíduos orgânicos no Brasil e em todo o mundo.

Impacts of an organic waste collection and composting model supported by artificial intelligence

ABSTRACT

The aim of this work is to evaluate a business model, supported by innovative technologies and Artificial Intelligence (AI), which encourages the composting of organic waste produced in homes and companies. The study focused on the company Organokits, located in the city of Nova Friburgo-RJ, Brazil, which collects and composts organic waste. The social impacts were assessed, considering variables such as job and income generation, and the environmental impacts, analysing the possible reduction in costs paid by the public authorities and the emission of greenhouse gases (GHG) and leachate generation. The results showed positive social and environmental impacts of this type of enterprise, indicating that AI can support environmental education and increase operational efficiency, reducing GHG emissions. It is believed that this work can contribute to analysis and reflection, both in academic and business circles, related to organic waste management.

KEYWORDS: Waste Management. Environmental Impacts. Social Impacts. Information Systems.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ) e à Fundação Nacional de Desenvolvimento do Ensino Superior Particular (FUNADESP) pelo suporte financeiro dado à pesquisa.

REFERÊNCIAS

AMORIM, Miriam Cleide Cavalcante De. Potencial de geração de biometano de resíduos alimentares de restaurante universitário. **Rev. Tecnol. Soc.**, Curitiba, v. 20, n. 61, p. 159-179, jul./set., 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022**. São Paulo: ABRELPE, 2022. 52 f.

BABAE TIRKOLAE, E.; GOLI, A.; PAHLEVAN, M.; MALEKALIPOUR KORDESTANIZADEH, R. A robust bi-objective multi-trip periodic capacitated arc routing problem for urban waste collection using a multi-objective invasive weed optimization. **Waste Management & Research**, 37(11), 1089-1101, 2019.

BÁNYAI, T.; TAMÁS, P.; ILLÉS, B.; STANKEVIČIŪTĒ, Ž.; BÁNYAI, Á. Optimization of municipal waste collection routing: Impact of industry 4.0 technologies on environmental awareness and sustainability. **International journal of environmental research and public health**, 16(4), 634, 2019.

BHOIR, R.; THAKUR, R.; TAMBE, P.; BORASE, R.; PAWAR, S. Design and Implementation of Smart Compost System Using IOT. **Anais [...]**. 2020 IEEE International Conference for Innovation in Technology (INOCON) (pp. 1-5). IEEE, 2020.

BRAGA, A. F.; RIBEIRO, H. Coleta seletiva na Cidade do Cabo: que lições podemos tirar? **Rev. Tecnol. Soc.**, Curitiba, v. 17, n. 48, p. 163-184, jul./set. 2021.

BRAGA, A. F.; Ribeiro, H. Como São Francisco se tornou paradigma na gestão de resíduos sólidos urbanos. **Rev. Tecnol. Soc.**, Curitiba, v. 19, n. 58, p. 18-40, out./dez., 2023.

BUSARELLO, R. I. **Gamification: princípios e estratégias**. São Paulo: Pimenta Cultural, 2016.

CASAS, O.; LÓPEZ, M.; QUÍLEZ, M.; MARTINEZ-FARRE, X.; HORNERO, G.; ROVIRA, C.; ... & GIRÃO, P. S. Wireless sensor network for smart composting monitoring and control. Measurement. **Journal of the International Measurement Confederation**, v. 47, n. 1, p. 483–495, 2014.

CONAMA - Conselho nacional do Meio Ambiente. **Resolução Nº 481, de 3 de outubro de 2017: estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos**. CONAMA, 2017.

DE JESUS, N. D.; MARINHO, G. Microempresas brasileiras: entendendo seu papel socioeconômico. **REMIPE-Revista de Micro e Pequenas Empresas e Empreendedorismo da Fatec Osasco**, v. 5, n. 1, p. 165-177, 2019.

DE JESUS COSTA, M.; TORRES, S. S. M. Ilha da Tartaruga: Gamificação na Educação Ambiental. **Anais [...]**. IV Congresso sobre Tecnologias na Educação. SBC, 2019. p. 511-516.

DE LIMA BEZERRA, C.; DE JESUS LIMA, D. K.: uma ferramenta didático-pedagógica para o ensino de Educação Ambiental. **Revista Encantar**, v. 2, p. 01-12, 2020.

DELGADO-ANTEQUERA, L.; CABALLERO, R.; SÁNCHEZ-ORO, J.; COLMENAR, J. M.; MARTÍ, R. Iterated greedy with variable neighborhood search for a multiobjective waste collection problem. **Expert Systems with Applications**, 145, 113101, 2020.

DUARTE, A. D., DA SILVA, D. C. S., DOS SANTOS, J. C. C., SINESIO, E. P., & DE ANDRADE FILHO, F. J. C. Gamificação como ferramenta de apoio no ensino de práticas na Educação Ambiental. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 5, n. 4, p. 398-404, 2020.

DUTTA, S., HE, M., XIONG, X., TSANG, D. C. Sustainable management and recycling of food waste anaerobic digestate: a review. **Bioresource technology**, 341, 125915, 2021.

FAVOINO, E.; HOGG, D. The potential role of compost in reducing greenhouse gases. **Waste Management & Research**, vol. 26, no.1, pp. 61-69, 2008. doi: <https://doi.org/10.1177/0734242X08088584>

GERJ – Governo do Estado do Rio de Janeiro. **PLANO ESTADUAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO – Relatório Síntese, 2013**. Disponível em: <https://observatoriopnrs.files.wordpress.com/2014/11/rio-de-janeiro-plano-estadual-de-resc3adduos-sc3b3lidos.pdf>. Acesso em 04/12/2023.

GOMES, M. J. N.; PALHANO, A. W. D. C.; REIS, E.C.R. Sector arc routing-based spatial decision support system for waste collection in Brazil. **Waste Management & Research**, 41(1), 214-221, 2023.

GUO, H. N., WU, S. B., TIAN, Y. J., ZHANG, J., LIU, H. T. Application of machine learning methods for the prediction of organic solid waste treatment and recycling processes: A review. **Bioresource Technology**, 124114, 2020.

HAMMES, V. S. **Construção da proposta pedagógica**. 2.ed. São Paulo: Globo, 2004. v.1 300 p. (Educação Ambiental para o Desenvolvimento Sustentável, v. 1).

HUANG, S. H.; LIN, P. C. Vehicle routing–scheduling for municipal waste collection system under the “Keep Trash off the Ground” policy. **Omega**, 55, 24-37, 2015.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Prévia da população calculada com base nos resultados do Censo Demográfico 2022 até 25 de dezembro de 2022**. Publicado em 2022. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/22827-censo-demografico-2022.html>. Acesso em 05/07/2023.

INÁCIO, C. de T.; BETTIO, D. B.; MILLER, P. R. M. **O papel da compostagem de resíduos orgânicos urbanos na mitigação de emissões de metano**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2010.

INEA – Instituto Estadual do Ambiente. **RELATÓRIO DE VISTORIA Número GELANIRV 2472/19. Acompanhamento de LO e IQDR (2º/2019)**. Emitido em 21/11/2019.

JORDÃO, M. D., PAIVA, K. D., FIRMO, H. T., INÁCIO, C. T., ROTUNNO, O. C., & LIMA, T. D. A. Low-cost automatic station for compost temperature monitoring. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, n. 11, p. 809–813, 1 nov. 2017.

KAFLE, S., KARKI, B. K., SAKHAKARMY, M., ADHIKARI, S. A Review of Global Municipal Solid Waste Management and Valorization Pathways. **Recycling**, 10 (3), 113, 2025.

KOPNINA, H. Circular economy and Cradle to Cradle in educational practice. **Journal of integrative environmental sciences**, v. 15, n. 1, p. 119-134, 2018.

LIANG, Y. C.; MINANDA, V.; GUNAWAN, A. Waste collection routing problem: A mini-review of recent heuristic approaches and applications. **Waste Management & Research**, 40(5): 519-537, 2022.

LIBOTTE, C. N. P.; NAMEN, A. A.; LIBOTTE, G. B. Otimização de rotas para coleta de resíduos orgânicos no município de Nova Friburgo – RJ, Brasil. **Anais [...]. XXVI ENMC - Encontro Nacional de Modelagem Computacional**, Nova Friburgo - RJ, 25 a 27 de outubro de 2023.

LIMA, P. D. M.; OLIVO, F.; FURLAN, M. B.; JUSTI JUNIOR, J.; PAULO, P. L. Análise de custos do planejamento estratégico do sistema integrado de resíduos sólidos urbanos em Campo Grande/MS. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, 27, 749-759, 2022.

LOZANO, A.; CARIDAD, J.; DE PAZ, J.; VILLARRUBIA GONZA´LEZ, G.; BAJO, J. Smart waste collection system with low consumption lorawan nodes and route optimization. **Sensors**, 18(5):1465, 2018.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 27, de 05 de junho de 2006: estabelece as concentrações máximas admitidas para agentes fitotóxicos, patogênicos ao homem, animais e plantas, metais pesados tóxicos, pragas e ervas daninhas em fertilizantes e substratos**. MAPA, 2006.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa nº 61, de 18 de julho de 2020: estabelece as regras sobre definições, exigências, especificações, garantias, tolerâncias, registro, embalagem e rotulagem dos**

fertilizantes orgânicos e dos biofertilizantes, destinados à agricultura. MAPA 2020.

MEDVEDEV, A., FEDCHENKOV, P., ZASLAVSKY, A., ANAGNOSTOPOULOS, T., AND KHORUZHNIKOV, S. Waste management as an iot-enabled service in smart cities. In: **Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems: 15th International Conference, NEW2AN 2015, and 8th Conference, ruSMART 2015, St. Petersburg, Russia, August 26-28, 2015, Proceedings 15.** Springer International Publishing, 2015. p. 104-115.

NEGREIROS GOMES, M. J.; PALHANO, A. W. D. C.; REIS, E. C. R. Sector arc routing-based spatial decision support system for waste collection in Brazil. **Waste Management & Research**, 41(1), 214-221, 2023.

NORDAHL, SARAH L., DEVKOTA, J. P., AMIREBRAHIMI, J., SMITH, S. J., BREUNIG, H. M., PREBLE, C. V. Cycle greenhouse gas emissions and human health trade-offs of organic waste management strategies. **Environmental science & technology**, v. 54, n. 15, p. 9200-9209, 2020.

OLIVEIRA DA ROSA, L. et al. Tecnologia social e compostagem na disseminação de saberes na valoração dos resíduos orgânicos de um condomínio de baixo custo na cidade de Pelotas - RS. **Rev. Tecnol. Soc.**, Curitiba, v. 17, n. 49, p. 188-200, out./dez. 2021

OTA, M. A.; DIAS-TRINDADE, S.; JÚNIOR, C. F. A. Combinando trilhas de aprendizagem e chatbot para desenvolver competências básicas de aprendizagem em estudantes ingressantes de cursos superiores. **Challenges 2019**, p. 33, 2019.

PANSARI, N. B.; DEOSARKAR, S. B.; NANDGAONKAR, A. B. "Smart Compost System" **Anais [...]**. 2018 Second International Conference on Intelligent Computing and Control Systems (ICICCS), Madurai, India, 2018, pp. 597-600.

PARDINI, K., RODRIGUES, J. J., DIALLO, O., DAS, A. K., DE ALBUQUERQUE, V. H. C., KOZLOV, S. A. A smart waste management solution geared towards citizens. **Sensors**, 20(8), 2380, 2020.

PERSONAL CO2 ZERO.COM. **Ranking de Veículos em Emissões de CO₂ por KM rodado.** CO2Zero Edição de Informações e Serviços Ltda. São Paulo, 2012. Disponível em: https://www.personalco2zero.com/estudo_emissoes_CO2/EstudoEmissoe sporKM_revisado14nov.pdf. Acesso em 01 de setembro de 2023.

RATNASARI, A., SYAFIUDDIN, A., MEHMOOD, M. A., BOOPATHY, R. A review of the vermicomposting process of organic and inorganic waste in soils: Additives effects, bioconversion process, and recommendations. **Bioresource Technology Reports**, 21, 101332, 2023.

RODRIGUES, A.S.; de Souza, C. R.; Galhardo, C. X.; de Souza, P. T. A representatividade da compostagem na destinação dos resíduos orgânicos no Brasil e nordeste brasileiro. **Rev. Tecnol. Soc.**, Curitiba, v. 18, n. 53, p.167-179, seção temática., 2022

SÁNCHEZ, A.; ARTOLA, A.; FONT, X.; GEA, T.; BARRENA, R.; GABRIEL, D.; SÁNCHEZ MONEDERO, M.A.; ROIG, A.; CAYUELA, M.L.; MONDINI, C. Greenhouse gas emissions from organic waste composting. **Environmental Chemistry Letters**, vol. 13, pp. 223–238, 2015. doi: <https://doi.org/10.1007/s10311-015-0507-5>.

SANTOS, R. P. Gamificação como componente na Educação Ambiental: desenvolvimento e aplicação a partir da Plataforma Genially©. **Revista Brasileira de Educação Ambiental (RevBEA)**, v. 18, n. 1, p. 228-242, 2023.

SASAHARA, C., RODRIGUES, L. S., CETRULO, T. B., GIMENEZ, B. G., ALENCAR, M. V., ELLIFF, C. I., ... TURRA, A. Municipal solid waste governance: development and application of an index embodying the Global South context. **Frontiers in Sustainability**, 5, 1409418, 2024.

SHEVAT, A. **Designing bots: Creating conversational experiences**. O'Reilly Media, Inc., 2017.

SHIVANNA, K. R. Climate change and its impact on biodiversity and human welfare. **Proceedings of the Indian National Science Academy**, 88(2), 160-171, 2022.

SOARES, R.; SOARES, A. C. P.; MAESTÁ, B. C.; LIPPI, M.; DA CUNHA, C. S. C. P.. Evaluation of the Efficiency of Reverse Osmosis in the Treatment of Sanitary Landfill Leachate in the Metropolitan Region of the Rio de Janeiro. **Rev. Virtual Química**, 1-11, 2022.

SOUSA, M. C.; ANJOS, D. A.; SALES, E. M.; ANDRADE, M. R. D. A. Processos de tratamento do chorume e reaproveitamento: Uma revisão. **Blucher Chemistry Proceedings**, 3(1), 655-664, 2015.

TCE RJ. **Estudos Socioeconômicos, Municípios do Estado do Rio de Janeiro, Nova Friburgo**. RJ: TCE, 2021.

TEIXEIRA, A. P. C.; DOS SANTOS, Y. F.; JUNIOR, E. R.; MARAJÓ, P. V.; FERNANDES, P. S.; DA FROTA, V. B.; RIVERO, L. Protótipo de Alta Fidelidade de Assistente Virtual para Instituições de Ensino no Estado do Amazonas. **Anais do Computer on the Beach**, v. 12, p. 493-495, 2021.

UNNIKRISHNAN, Seema; SINGH, Anju. Energy recovery in solid waste management through CDM in India and other countries. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 54, n. 10, p. 630-640, 2010.

VAZ, G. L. **Mapeamento participativo práticas experimentais e gamificação: diferentes estratégias na abordagem da percepção e educação ambiental**. 2022. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo.

VIAENE, J.; VAN LANCKER, J.; VANDECASTEELE, B.; WILLEKENS, K.; BIJTTEBIER, J.; RUYSSCHAERT, G.; DE NEVE, S.; REUBENS, B. Opportunities and barriers to on-farm composting and compost application: A case study from northwestern Europe. **Waste Management**, v. 48, p. 181-192, 2016.

XU, M., SUN, H., CHEN, E., YANG, M., WU, C., SUN, X., WANG, Q. From waste to wealth: Innovations in organic solid waste composting. **Environmental Research**, 229, 115977, 2023.

YU, X.; ZHOU, Y.; LIU, X. F. The two-echelon multi-objective location routing problem inspired by realistic waste collection applications: The composable model and a metaheuristic algorithm. **Applied Soft Computing**, 94, 106477, 2020.

Recebido: 25/03/2024

Aprovado: 30/07/2025

DOI: 10.3895/rts.v21n65.18269

Como citar:

NASCIMENTO, Antônio Claudio Monteiro do; NAMEN, Anderson Amendoeira. Impactos de um modelo de coleta e compostagem de resíduos orgânicos apoiado pela inteligência artificial. **Rev. Technol. Soc.**, Curitiba, v. 21, n. 65, p.230-252, jul./set., 2025. Disponível em:

<https://periodicos.utfpr.edu.br/rts/article/view/18269>

Acesso em: XXX.

Correspondência:

Direito autoral: Este artigo está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição 4.0 Internacional.

