



TR A B A L H O 39

SISTEMA DE MONITORAMENTO DE ODORES: INOVAÇÃO SUSTENTÁVEL, PARA ANÁLISE DE TEMPO REAL, EM USINA DE COMPOSTAGEM

Aida Araújo Ferreira

Ana Paula Souza Silva

Gilmar Gonçalves de Brito

Ioná Maria B. R. Barbosa

José Ruan dos Santos Paiva

Larissa M. do Nascimento Lira

Luciana Caribé F. Cantarelli

Rebeca Beatriz de Luna Oliveira Silva

Romero Barbosa de Assis

Vânia Soares de Carvalho

RESUMO: O crescimento populacional e a má gestão de resíduos sólidos urbanos intensificam os desafios ambientais, especialmente no tratamento de resíduos orgânicos. A compostagem se apresenta como alternativa sustentável, mas enfrenta limitações relacionadas à emissão de gases de efeito estufa e compostos odoríferos, que impactam o meio ambiente e o bem-estar humano. Técnicas mitigadoras, como uso de aditivos, controle de oxigênio e biofiltros, têm sido aplicadas com êxito. Com isso, este trabalho visa descrever o processo de desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento de Odores. Trata-se de um sistema de baixo custo, capaz de detectar e quantificar os principais gases emitidos durante a compostagem, com armazenamento dos dados. A proposta visa integrar o monitoramento contínuo à gestão de emissões, contribuindo para a otimização do processo e maior conformidade ambiental.

INTRODUÇÃO

O crescimento populacional e a geração excessiva de lixo ao longo dos anos tem sido responsável pelo desencadeamento de uma série de problemas relacionados ao descarte e gerenciamento seguro de resíduos sólidos urbanos. Nesse sentido, a maioria dos resíduos produzidos a partir de origens domésticas, de serviços de limpeza pública e da indústria são compostos por resíduos sólidos, semissólidos e líquidos orgânicos, que têm um grande potencial de aproveitamento e podem ser tratados de forma ambientalmente adequada [Soares 2019]. No Brasil, de acordo com a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), em 2022, foram gerados cerca de 81,8 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos.

Segundo [Jana et al, 2024], os resíduos sólidos podem ser caracterizados em quatro tipos, de acordo com sua origem, que são eles: resíduos sólidos urbanos, resíduos sólidos industriais, resíduos sólidos agrícolas, resíduos biológicos ou hospitalares. No que diz respeito aos resíduos sólidos urbanos, tem-se os resíduos orgânicos. Os resíduos orgânicos são constituídos basicamente por restos de animais ou vegetais descartados de atividades humanas. Podem ter diversas origens, como doméstica ou urbana (restos de alimentos e podas), agrícola ou industrial (resíduos de agroindústria alimentícia, indústria madeireira, frigoríficos), de saneamento básico (lodos de estações de tratamento de esgotos), entre outras [Brasil, Ministério do Meio Ambiente 2025].

Nesse sentido, como alternativa para o gerenciamento sustentável dos resíduos orgânicos, surge a compostagem. A Resolução nº 481 de 03 de outubro de 2017, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, define como compostagem o processo de decomposição biológica controlada dos resíduos orgânicos, efetuado por uma população diversificada de organismos, em condições aeróbias e termofílicas, resultando em material estabilizado, com propriedades e características completamente diferentes daqueles que lhe deram origem; sendo denominado composto o produto estabilizado, oriundo do processo de compostagem, podendo ser caracterizado como fertilizante orgânico, condicionador de solo e outros produtos de uso agrícola.

No entanto, apesar da compostagem ser amplamente reconhecida como uma solução sustentável para a gestão de resíduos orgânicos, o processo enfrenta desafios significativos relacionados às emissões de gases e compostos odoríferos, que comprometem tanto o meio ambiente quanto a saúde humana. Agravantes como gases e odores expelidos durante o processo, se destacam como impactos negativos da implementação de estações de compostagem. Dependendo dos valores de concentração, os compostos odorantes não são necessariamente tóxicos

ou perigosos para a saúde humana, entretanto, seus efeitos adversos nos cidadãos podem influenciar negativamente seu bem-estar psicofísico e comportamental. Mal estar, desconforto, irritação, raiva, depressão, náusea, dores de cabeça podem ser gerados pela exposição prolongada ao odor [Capelli *et al*, 2019]. Além disso, segundo [Capelli *et al*, 2019], os odores são hoje, entre os poluentes atmosféricos, a maior causa das reclamações às autoridades locais.

Nesse viés, entre os principais gases emitidos durante o processo de compostagem estão os gases de efeito estufa, como dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), que contribuem diretamente para o aquecimento global, com emissões mais intensas nas fases mesofílica e de resfriamento [Tran e Geng *et al*, 2024]. Além disso, compostos como amônia (NH_3) e compostos sulfurados voláteis (VSCs), incluindo o sulfeto de hidrogênio (H_2S), são os principais responsáveis pelos odores desagradáveis, predominantemente liberados durante a fase termofílica, representando mais de 70% das emissões totais. Mesmo em locais de compostagem comunitária, onde as operações são menores, emissões de compostos orgânicos voláteis (VOCs), como terpenos, continuam sendo uma preocupação relevante ao longo de todo o processo [Tran e Geng *et al*, 2024].

Como alternativa para diminuição da emissão de gases odoríferos, técnicas de mitigação foram avançando significativamente no cenário ambiental, com destaque para o uso de aditivos inovadores e a otimização das condições do processo. Por exemplo, aplicação de lignina modificada, derivada de resíduos agrícolas, mostrou-se eficaz na redução de emissões de amônia e gases de efeito estufa, enquanto a cobertura com nanofilmes biológicos e o controle de oxigênio durante a compostagem demonstraram potencial para reduzir emissões de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), além de melhorar o teor de carbono orgânico dissolvido [Li e Wang *et al*, 2024]. Estratégias complementares, como o uso de biocarvão e carbonato de cálcio, também contribuem para a diminuição de óxido nitroso (N_2O), atuando na redução da atividade de microrganismos produtores de gases nocivos [Yang *et al*, 2023].

De acordo com [CONAMA 2017], as unidades de compostagem devem adotar medidas de controle ambiental necessárias para minimizar a emissão de odores. Com o propósito de adotar medidas de mitigação eficientes e se adequar às normas estabelecidas pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), a empresa parceira Lógica Ambiental¹ considerou a implantação de um biofiltro feito de palha. O biofiltro em questão tem como principal atuação a diminuição da emissão de gases odoríferos provenientes do processo de compostagem de resíduos orgânicos da Estação.

Apesar da eficácia da implantação do biofiltro, existe uma lacuna tecnológica significativa no que diz respeito ao monitoramento em tempo real das emissões de gases odoríferos durante o processo de compostagem que, de maneira eficiente, valide a medida adotada. Essa limitação dificulta a implementação de medidas otimizadoras e evidencia a necessidade de desenvolvimento de dispositivos ou sistemas tecnológicos capazes de integrar o monitoramento de emissões e a aplicação de técnicas de controle de forma automatizada.

A partir da identificação deste desafio a idealização do Projeto descrito neste artigo tornou-se palpável. Com isso, tem-se como objetivo o desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento de Odores - SMO, capaz de detectar os principais gases expelidos durante a compostagem de resíduos orgânicos por meio de componentes eletrônicos de baixo custo e fácil manutenção. Ademais, propõe-se que o Sistema seja capaz de monitorar, em tempo real, a quantidade, em partes por milhão (ppm), dos gases expelidos no ar durante o processo de compostagem e realizar o armazenamento dos dados coletados, para análise e interpretação, a fim de desenvolver modelos de predição que auxiliem empresas na tomada de decisões para um melhor gerenciamento de seus recursos de contenção, contribuindo, desse modo, para a preservação do meio ambiente.

METODOLOGIA

Para o desenvolvimento da tecnologia proposta, realizou-se um estudo aprofundado sobre a aplicabilidade e o potencial de contribuição do SMO (Sistema de Monitoramento de Odores) para empresas de tratamento de efluentes, resíduos sólidos, saneamento, sistema de aterro sanitário, agroindústrias e também para o meio ambiente. Questões como requisitos do sistema, que dita o que ele deve ser capaz ou não de realizar; desenvolvimento de hardware; estratégias de implementação de software; implementação de protocolos; comunicação com o banco de dados e implantação da tecnologia em Usinas de Compostagem foram analisadas com cautela, a fim de desenvolver um produto simples e que apresente eficiência dentro do seu escopo. Este processo pode ser observado abaixo, na **Figura 1**. Com isso, alguns pontos podem ser evidenciados:

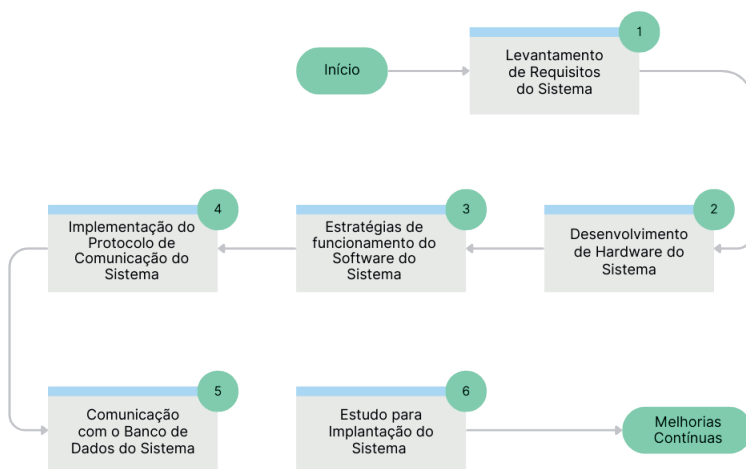


Figura 1. Metodologia adotada para o desenvolvimento da tecnologia proposta.

Fonte. Próprios autores.

Quanto ao Hardware do Sistema de Monitoramento

Componentes eletrônicos e conexão na PCB (Printed Circuit Board)

O *hardware* do Sistema, no que diz respeito à sua composição eletrônica, apresenta atualizações para melhor atender as necessidades de monitoramento do processo de compostagem. A escolha dos componentes para o desenvolvimento do sistema considerou a utilização de uma placa ESP32, devido ao módulo de conexão *WiFi* integrado; os sensores MQ-4 e MQ-135, para a detecção dos gases dióxido de carbono, metano e COVs e o sensor DHT22, para monitoramento de temperatura e umidade. Além dos sensores citados, para aumentar a abrangência de detecção gasosa, adicionaram-se os sensores MQ-7 e MQ-136 para detecção de óxido nitroso (N₂O) e sulfeto de hidrogênio (H₂S), respectivamente, como pode ser observado na **Figura 2**.

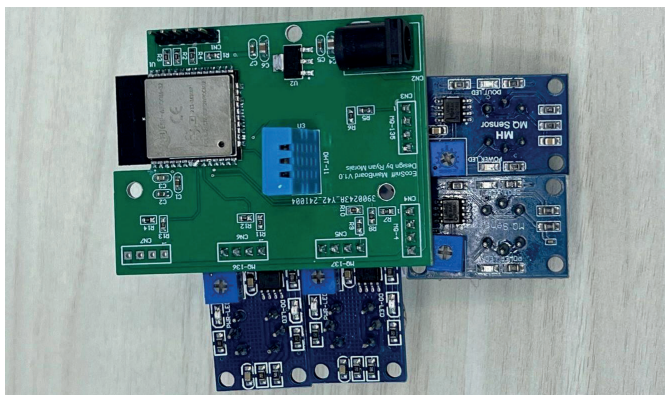


Figura 2. Estado atual do protótipo.

Fonte. Próprios autores.

Quanto ao Software do Sistema de Monitoramento

Protocolo de Comunicação

As tecnologias *IoT* (*Internet of Things* - Internet das Coisas), por natureza, exigem conexão com a internet para o compartilhamento de dados em plataformas de visualização. No entanto, para reduzir a dependência dessas plataformas, que costumam ter custos elevados e oferecer mais e/ou menos funcionalidades do que o necessário, desenvolveu-se uma conexão direta com o Broker Mosquitto.

Segundo [Borsali 2024], o Broker Mosquitto é um intermediário de mensagens que implementa o protocolo MQTT (*Message Queuing Telemetry Transport*), facilitando a comunicação eficiente entre dispositivos *IoT*. Ele permite o gerenciamento de nós de medição na camada de aplicação da rede, aprimorando o processamento de dados para soluções de monitoramento de baixo custo, **Figura 3**.

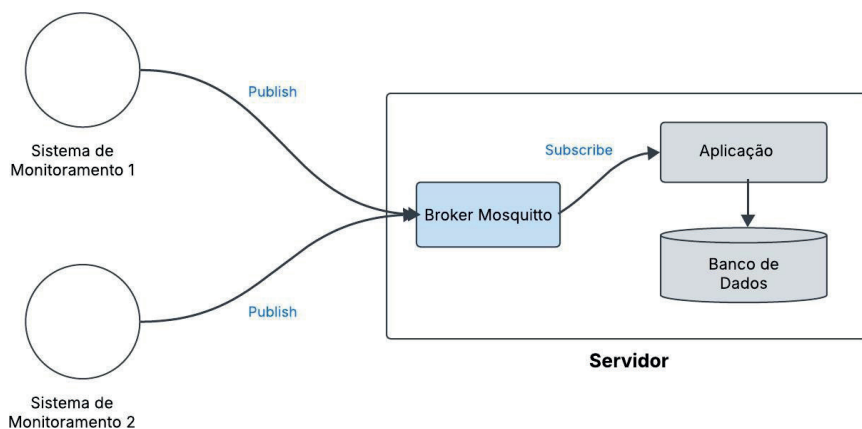


Figura 3: Diagrama de comunicação entre o SMO e a Aplicação

Fonte: Próprios autores.

Estudo de Implantação do SMO na Usina de Compostagem

Durante a fase de estudo para a implantação do protótipo, foi elaborado um fluxograma, evidenciado na **Figura 4**, com base na análise das necessidades essenciais para seu funcionamento adequado. O desenvolvimento considerou suas limitações e os possíveis riscos de oxidação dos componentes, garantindo uma abordagem mais eficiente e segura.

Nesta etapa, a válvula de controle e a peneira molecular desempenham uma função primordial, a fim de garantir o bom funcionamento do protótipo. Nesse sentido, as peneiras moleculares são materiais com propriedades de sorção seletiva, utilizados para separar ou armazenar misturas de compostos com base no formato e tamanho molecular.

Com isso, a peneira molecular, bem como a válvula de controle, neste modelo de implantação, cumprem o papel de evitar o acúmulo excessivo de água proveniente das leiras de compostagem. Esta medida foi apontada para evitar a oxidação dos componentes eletroquímicos do modelo, garantindo uma vida útil mais extensa e o bom funcionamento dos equipamentos.

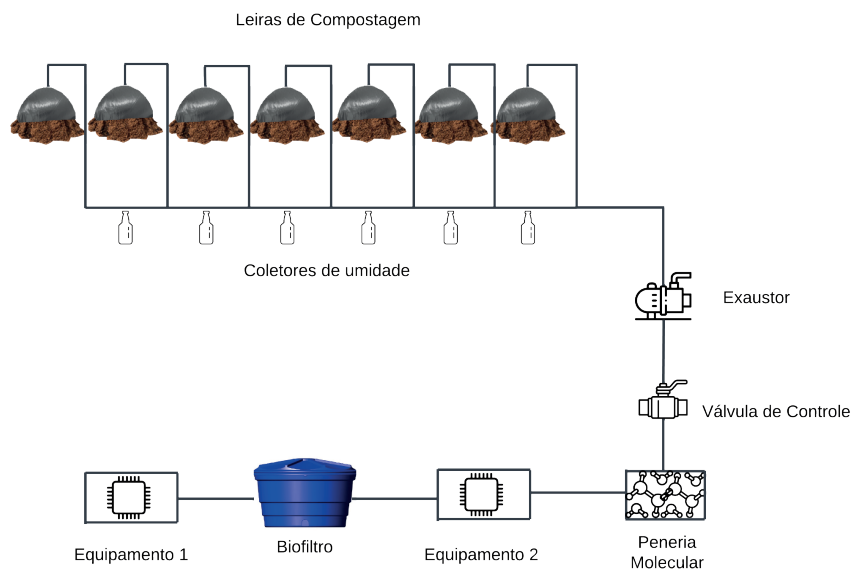


Figura 4: Diagrama de implementação do SMO na Estação de Tratamento utilizada para estudo.

Fonte: Próprios autores.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Viabilidade do Sistema de Monitoramento de Odores

O desenvolvimento do Sistema de Monitoramento de Gases Odoríferos evidencia a integração de conhecimentos, combinando estudos nas áreas ambiental, tecnológica e social para criar uma solução multidisciplinar. Além disso, a escolha por componentes de baixo custo e de fácil manuseio e manutenção favorece a democratização do acesso ao desenvolvimento tecnológico, oferecendo uma alternativa viável e mais acessível em comparação aos equipamentos similares disponíveis.

Dessa forma, a viabilidade técnica e econômica do sistema proposto evidencia seu potencial para suprir a lacuna tecnológica no monitoramento das emissões gasosas da compostagem. A adoção de tecnologias acessíveis e de fácil manutenção amplia sua aplicabilidade em locais com recursos limitados, micro e pequenas empresas, permitindo maior acesso a ferramentas de controle ambiental. Além de auxiliar no monitoramento dos impactos ambientais da compostagem, a tecnologia proposta impulsiona a melhoria da gestão de resíduos orgânicos, apresentando-se como uma solução sustentável para os desafios relacionados aos resíduos sólidos.

SMO e Análise dos Dados Coletados

Com a instalação bem-sucedida do Sistema de Monitoramento de Odores (SMO), foi possível iniciar a coleta de dados referentes à emissão de gases durante o processo de compostagem. A operacionalização do equipamento possibilitou a aquisição de informações relevantes para análise e validação da eficiência do biofiltro implantado, além de abrir caminho para o aperfeiçoamento das estratégias de mitigação adotadas. Observou-se que, à medida que se aumenta o tempo de exposição dos sensores à presença dos gases, os dados coletados tornam-se mais representativos da realidade, evidenciando maior fidedignidade na medição das concentrações dos compostos odoríferos. Esses dados iniciais demonstram o potencial do SMO como ferramenta de suporte à tomada de decisões e servirão de base para futuras melhorias no equipamento,

tanto em termos de precisão quanto na capacidade de resposta em tempo real às variações nas emissões gasosas.

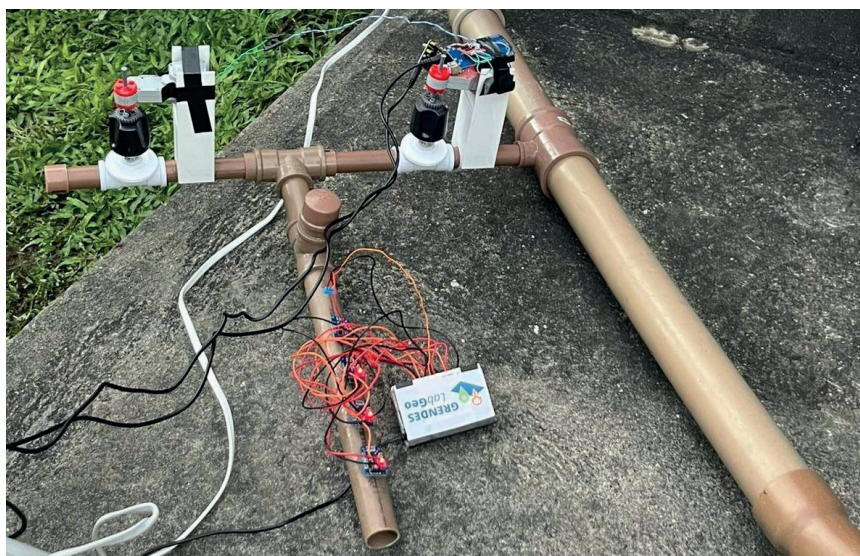


Figura 5: Hardware do SMO instalado na Estação de Compostagem de estudo.

Fonte: Próprios autores.

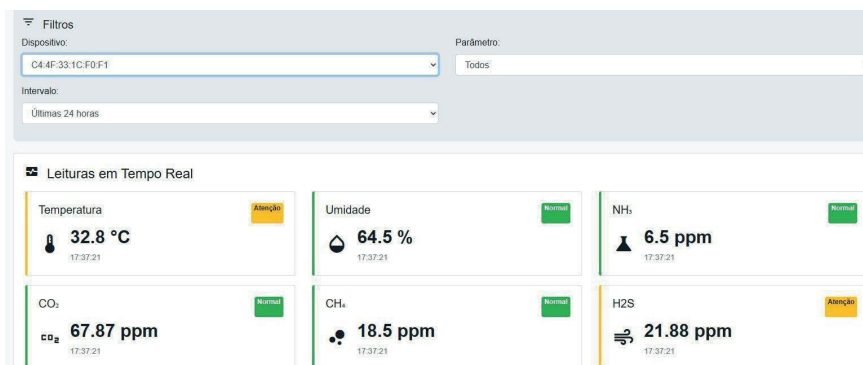


Figura 5: Captura de tela do Software do Sistema (Plataforma de análise) no momento do teste.

Fonte: Próprios autores.

CONCLUSÃO

Diante do exposto, conclui-se que a compostagem, embora seja uma alternativa viável e sustentável para o manejo de resíduos orgânicos, ainda enfrenta desafios significativos relacionados à emissão de gases odoríferos e de efeito estufa. Tais emissões comprometem não apenas a qualidade ambiental, mas também o bem-estar das populações circunvizinhas às unidades de compostagem. Nesse contexto, torna-se evidente a necessidade de ferramentas que não apenas mitiguem os impactos negativos, mas que também viabilizem o monitoramento eficaz e em tempo real dessas emissões, de forma economicamente acessível e tecnicamente robusta.

O desenvolvimento do Sistema de Monitoramento de Odores (SMO) representa um avanço significativo nesse cenário, ao propor uma solução inovadora, de baixo custo e de fácil implantação, capaz de detectar os principais gases emitidos durante o processo de compostagem. Ao integrar sensores específicos, protocolos de comunicação eficientes e uma interface web funcional, o SMO contribui não apenas para a validação das técnicas de mitigação utilizadas, como o biofiltro de palha, mas também para a geração de dados relevantes que subsidiam a tomada de decisões e o aprimoramento contínuo dos processos. Assim, a proposta reafirma o papel da tecnologia como aliada estratégica na construção de sistemas de gestão de resíduos mais sustentáveis e socialmente responsáveis.

REFERÊNCIAS

SOARES, Silvia Aparecida, et al. A relevância da reciclagem de resíduos sólidos para a sustentabilidade. 2019.

JANA, T.; SAHOO, S.; RAMESH, K.; GHOSH, S.; RAGHAVAN, V.; RAYAN, R. A.; NALLURI, A.; BHARDWAJ, P.; SANA, S. S. Solid Wastes. , p. 62–83, 3 Jul. 2024.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Gestão de resíduos orgânicos. Disponível em: <https://antigo.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/gest%C3%A3o-de-res%C3%AD-duos-org%C3%A2nicos.html>. Acesso em: 22 abr. 2025.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 481, de 03 de outubro de 2017. Estabelece critérios e procedimentos para garantir o controle e a qualidade ambiental do processo de compostagem de resíduos orgânicos, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, edição 194, p. 93, 09 out. 2017.

CAPELLI, L. et al. Revisão sobre poluição por odor, medição de odor, técnicas de redução, D-NOSES, H2020-SwafS-23-2017-789315. 2019.

TRAN, Huu-Tuan et al. A critical review on characterization, human health risk assessment and mitigation of malodorous gaseous emission during the composting process. Environmental Pollution, p. 124115, 2024.

GENG, Xinyu et al. Greenhouse gas emission characteristics during kitchen waste composting with biochar and zeolite addition. Bioresource Technology, v. 399, p. 130575, 2024.

LI, Guanyi et al. Effects of a nanobiofilm-covered echelon oxygen-controlled composting process on carbon and nitrogen conversion and emission reduction efficiency. Environmental Technology & Innovation, v. 35, p. 103669, 2024.

WANG, Weishuai et al. Modified lignin can achieve mitigation of ammonia and greenhouse gas emissions simultaneously in composting. Bioresource Technology, v. 402, p. 130840, 2024.

YANG, Xinyi et al. Mechanisms of mitigating nitrous oxide emission during composting by biochar and calcium carbonate addition. Bioresource Technology, v. 388, p. 129772, 2023