

IRRIGAÇÃO ALTERNADA COMO ESTRATÉGIA CLIMÁTICA INTELIGENTE NO ARROZ IRRIGADO: MECANISMOS, EFICÁCIA GLOBAL E SINERGIAS COM OUTRAS PRÁTICAS DE MANEJO

Quirlene Raquel de Almeida¹;

¹Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, Goiás.

<https://lattes.cnpq.br/7250465217883525>

Renato Miguel Biava²;

²Universidade Estadual de Goiás (UEG), Ipameri, Goiás.

<http://lattes.cnpq.br/4881450711718346>

Hugo César da Silva Araújo Júnior³.

³Universidade Estadual de Goiás (UEG), Ipameri, Goiás.

<http://lattes.cnpq.br/3143261090106248>

RESUMO: O manejo alternado de molhamento e secagem (AWD) tem sido amplamente estudado como estratégia de mitigação de metano (CH_4) em lavouras de arroz irrigado, e as evidências acumuladas nas últimas décadas apontam para sua consolidação como a intervenção de maior impacto nesse contexto. Esta revisão integra estudos sobre os mecanismos biogeoquímicos envolvidos, a eficácia do AWD em diferentes regiões produtoras e as sinergias observadas com outras práticas de manejo. Reduções próximas a 50% nas emissões de CH_4 , sem penalidade sobre a produtividade, foram estimadas a partir de três meta-análises globais independentes, resultado associado à elevação do potencial redox do solo durante os períodos de drenagem, à supressão da atividade metanogênica e à redução do transporte de CH_4 via aerênquima radicular. As emissões de óxido nitroso (N_2O) apresentam aumento relativo com a aeração periódica, mas o balanço líquido em equivalentes de CO_2 permanece favorável. A associação do AWD com biochar, condicionadores de solo à base de ferro, adubação nitrogenada otimizada e cultivares de baixa emissão pode elevar essas reduções a valores entre 60 e 80% na intensidade de gases de efeito estufa, o que reforça o potencial dessa combinação de práticas para sistemas de arroz irrigado climaticamente inteligentes.

PALAVRAS-CHAVE: Metano. Óxido nitroso. Manejo hídrico.

ALTERNATE WETTING AND DRYING AS A CLIMATE-SMART STRATEGY IN IRRIGATED RICE: MECHANISMS, GLOBAL EFFICACY AND SYNERGIES WITH OTHER MANAGEMENT PRACTICES

ABSTRACT: Alternate wetting and drying (AWD) has been widely studied as a methane (CH_4) mitigation strategy in irrigated rice paddies, and the evidence accumulated over recent decades points to its consolidation as the most impactful intervention in this context. This

review integrates studies on the biogeochemical mechanisms involved, the efficacy of AWD across different producing regions, and the synergies observed with other management practices. Reductions of approximately 50% in CH₄ emissions, without yield penalty, were estimated from three independent global meta-analyses, a result associated with the elevation of soil redox potential during drainage periods, the suppression of methanogenic activity, and the reduction of CH₄ transport via root aerenchyma. Nitrous oxide (N₂O) emissions show a relative increase with periodic aeration, but the net balance in CO₂ equivalents remains favorable. The combination of AWD with biochar, iron-based amendments, optimized nitrogen fertilization, and low-emission cultivars can raise these reductions to values between 60 and 80% in greenhouse gas intensity, which reinforces the potential of this combination of practices for climate-smart irrigated rice systems.

KEYWORDS: Methane. Nitrous oxide. Water management.

INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos cereais mais cultivados no mundo e constitui a base alimentar de mais da metade da população global. A maior parte dessa produção depende de sistemas de cultivo irrigado por inundação contínua, que cobrem mais de 80 milhões de hectares. Esse modelo produtivo garante alta produtividade e estabilidade de safra, mas gera condições de anaerobiose no solo que favorecem a emissão de metano (CH₄), gás com potencial de aquecimento global aproximadamente 28 vezes superior ao do dióxido de carbono em um horizonte de 100 anos, sendo que sua produção se intensifica à medida que os aceptores de elétrons disponíveis no solo são progressivamente consumidos pela atividade microbiana. Somado ao óxido nitroso (N₂O), produzido durante os processos de nitrificação e desnitrificação no solo, o cultivo de arroz irrigado representa uma fonte significativa de gases de efeito estufa (GEE) na agricultura global.

A busca por estratégias de manejo que conciliem alta produtividade com menor impacto climático tem se intensificado nas últimas décadas, é onde o manejo alternado de molhamento e secagem, internacionalmente conhecido como Alternate Wetting and Drying (AWD), tem se destacado como uma das intervenções mais estudadas nesse sentido. Este manejo consiste na interrupção periódica da lâmina d'água durante o ciclo da cultura, permitindo que o solo drene e recupere condições aeróbias antes de uma nova inundação, sem que isso comprometa o desenvolvimento e a produtividade da lavoura.

Além da redução de emissões, o AWD demanda menor volume de água de irrigação, o que o torna uma alternativa relevante em regiões onde a escassez hídrica já representa um desafio concreto para os produtores, configurando-se como uma estratégia duplamente vantajosa sob a perspectiva da agricultura climática inteligente. Ainda assim, sua adoção em larga escala esbarra em questões como a variação de eficácia entre regiões, o trade-off com as emissões de N₂O e a necessidade de integração com outras práticas para que os benefícios sejam plenamente aproveitados.

OBJETIVO

Sintetizar as evidências científicas sobre a irrigação alternada Alternate Wetting and Drying (AWD) como estratégia de mitigação de gases de efeito estufa em lavouras de arroz irrigado, discutindo seus mecanismos biogeoquímicos de ação, eficácia na redução de CH_4 e N_2O em diferentes regiões produtoras, o trade-off entre esses dois gases e as sinergias com outras práticas de manejo do solo e da cultura.

METODOLOGIA

O presente trabalho consiste em uma revisão de literatura de natureza qualitativa, de caráter descritivo, com procedimento bibliográfico. Foram selecionados estudos publicados entre 2018 e 2025, indexados nas bases de dados Web of Science, Scopus, PubMed e OpenAlex, utilizando os termos: alternate wetting and drying, AWD, intermittent irrigation, mid-season drainage, methane, nitrous oxide, rice paddy e greenhouse gas.

Foram priorizados artigos que abordassem pelo menos dois dos seguintes aspectos: dinâmica de emissão de CH_4 , dinâmica de emissão de N_2O e estratégias de manejo hídrico em lavouras de arroz irrigado. O conjunto final utilizado nesta revisão é composto por estudos de campo, meta-análises e revisões sistemáticas, abrangendo as principais regiões produtoras de arroz no mundo, como Ásia Oriental, Sudeste Asiático, América do Norte, América do Sul, Europa Mediterrânea e África Subsaariana. A síntese foi organizada em torno de eixos temáticos: mecanismos biogeoquímicos do AWD, eficácia global na redução de emissões, variação regional, trade-off CH_4 - N_2O e sinergias com outras práticas de manejo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Mecanismos biogeoquímicos do AWD na redução de emissões

O funcionamento do AWD como estratégia de mitigação de gases de efeito estufa está diretamente relacionado ao potencial redox do solo (Eh), variável que controla a produção de CH_4 e N_2O em solos alagados (Qin et al., 2018), sendo que em condições de inundação contínua o Eh reduz progressivamente à medida que os aceptores de elétrons de maior energia, a saber, oxigênio, nitrato, manganês, ferro e sulfato, são consumidos sequencialmente pela atividade microbiana. Quando o Eh cai abaixo de aproximadamente -150 a -200 mV, a metanogênese torna-se termodinamicamente favorável, e as arqueas metanogênicas, quantificadas pelo gene funcional *mcrA*, passam a produzir CH_4 em larga escala a partir da decomposição anaeróbia da matéria orgânica do solo (Islam et al., 2018).

A drenagem periódica promovida pelo AWD permite a entrada de oxigênio no solo, criando condições menos propícias à produção de CH_4 e mais favoráveis à sua oxidação (Xiao et al., 2025; Islam et al., 2018), uma vez que esse processo reduz a atividade dos microrganismos produtores de CH_4 e estimula os que o consomem. Xiao et al. (2025) descrevem como o AWD atua tanto no solo quanto na planta, no solo o gene associado à produção de CH_4 (*mcrA*) tem sua abundância reduzida em 21,9%, enquanto o gene associado

ao consumo (*pmoA*) aumenta 16,1%, elevando a razão *pmoA/mcrA* em 51,3%, razão que quanto maior, menor tende a ser o fluxo de CH₄ para a atmosfera, tornando-a um indicador confiável do potencial de mitigação (Wang et al., 2024; Zhao et al., 2024b). Na planta, a proporção de aerênquima, tecido que conduz o CH₄ do solo para a atmosfera, é reduzida em 74,8%, a produção de etileno pelas raízes cai 42,3% e a capacidade oxidativa radicular aumenta de 30 a 48% nos estádios reprodutivos, desta forma, esses efeitos combinados, no solo e na planta, explicam por que o AWD frequentemente alcança reduções de CH₄ superiores ao que seria previsto apenas pelas alterações microbianas (Xiao et al., 2025).

O momento da drenagem também é determinante para a eficácia do manejo, a drenagem realizada antes do estabelecimento pleno da inundação promove a decomposição aeróbia da palha incorporada ao solo, eliminando o segundo pico de emissão de CH₄ característico de sistemas com alto aporte de resíduos orgânicos (Islam et al., 2018). Esses autores demonstram que a drenagem precoce combinada com a drenagem de meio de ciclo eleva o Eh em 110 a 167 mV, interrompendo a produção de CH₄ e reduzindo o potencial de aquecimento global escalonado pela produtividade em 85 a 87% em relação ao sistema de inundação contínua.

Eficácia global na redução de CH₄: evidências de meta-análises

A eficácia do AWD na redução das emissões de CH₄ em lavouras de arroz irrigado está entre as mais robustamente documentadas na literatura agronômica recente, dentre os estudos disponíveis, três meta-análises globais independentes convergem para uma mesma conclusão de que o manejo hídrico intermitente representa a intervenção mais eficaz para a mitigação de CH₄, superando práticas como adubação orgânica, seleção de cultivares e aplicação de biochar, quando essas são avaliadas isoladamente (Zhao et al., 2019; Wu et al., 2022; Zhao et al., 2024a). Zhao et al. (2019), sintetizando 2.616 comparações pareadas provenientes de 230 publicações, classificaram a irrigação não contínua como a prática de maior impacto entre doze categorias de manejo avaliadas, com redução de 51,5% nas emissões de CH₄ por área e de 47,9% nas emissões escalonadas pela produtividade, resultado que foi posteriormente corroborado por Wu et al. (2022), os quais, analisando 519 observações, confirmaram reduções de 57,8% no CH₄, 44,9% no potencial de aquecimento global (GWP) e 57,7% na intensidade de emissões de GEE, sem efeito significativo sobre a produtividade.

Zhao et al. (2024a), em análise mais recente, reafirmaram o AWD como a única prática capaz de reduzir consistentemente as emissões de CH₄ em aproximadamente 51,6% em ambientes diversificados, porém, a magnitude dessa redução varia conforme o contexto regional e o tipo de manejo hídrico adotado, o que fica evidenciado nos resultados de Zhang et al. (2024), que identificaram reduções menores no Sudeste Asiático, entre 23,3 e 25,4%, atribuídas às restrições práticas de drenagem impostas pelo regime de chuvas monçônicas. A ausência de penalidade produtiva associada ao AWD quando implementado corretamente representa outro ponto de consenso entre as meta-análises, esse resultado

tem sido um dos fatores determinantes para a aceitação da prática pelos produtores em diferentes contextos (Wu et al., 2022; Zhao et al., 2024a).

Variação regional da eficácia do AWD

Embora as meta-análises globais confirmem a eficácia do AWD, a maioria das evidências ainda se concentra em países asiáticos, o que mostra a necessidade de mais estudos em sistemas subtropicais da América do Sul, pois os estudos de campo realizados nas principais regiões produtoras demonstram que a magnitude das reduções varia consideravelmente em função das condições hidrológicas, do tipo de solo, do calendário agrícola e do sistema de cultivo adotado (Tran et al., 2018; Chidthaisong et al., 2018).

Na Ásia, os resultados são heterogêneos, no Vietnã Central Hoang et al. (2023) registraram reduções de 26 a 49% nas emissões de CH_4 sob AWD sem penalidade produtiva, enquanto na Tailândia, em solos ácidos sulfatados, Chidthaisong et al. (2018) observaram reduções expressivas, porém com maior variabilidade entre estações. Nas Filipinas, Sibayan et al. (2018) reportaram reduções marginais de apenas 1,7% em Luzon Central durante a estação chuvosa, evidenciando que condições de alta umidade do solo limitam severamente a eficácia do AWD, ao passo que no Japão, Nishimura et al. (2020) documentaram reduções de 46 a 90% no GWP líquido em Hokkaido, sem perda de produtividade.

Na América do Norte, Karki et al. (2023) acompanharam lavouras no Arkansas ao longo de cinco safras consecutivas e registraram redução de 73% nas emissões de CH_4 sob AWD sem efeito negativo sobre a produtividade enquanto Camargo et al. (2018) fizeram um estudo intercontinental comparando Brasil e Japão simultaneamente e verificaram que na América do Sul, a irrigação intermitente reduziu as emissões de CH_4 em até 62% no Rio Grande do Sul e 71% no Japão, com redução do GWP escalonado pela produtividade de 47 a 80%. Também no sul do Brasil, Timm et al. (2025) avaliaram um sistema inovador de irrigação por sulco em camalhões, obtendo redução de 34% nas emissões de CH_4 com manutenção de altas produtividades. Na Europa, Vitali et al. (2024) e Martínez-Eixarch et al. (2021) confirmaram os benefícios do AWD no Delta do Ebro, Espanha, e na África Subsaariana Tuyishime et al. (2022) reportaram resultados positivos em Ruanda, indicando que mesmo em contextos com menor infraestrutura a prática pode ser adaptada com benefícios significativos.

O trade-off CH_4 - N_2O e como minimizá-lo

Um dos principais pontos de atenção associados ao AWD é o aumento das emissões de N_2O decorrente da aeração periódica do solo, onde sob inundação contínua as condições anaeróbias favorecem a redução completa do N_2O a N_2 pela enzima N_2O redutase, codificada pelo gene *nosZ*, mantendo as emissões desse gás em níveis geralmente baixos, ao passo que com a drenagem intermitente a alternância entre condições aeróbias e anaeróbias estimula os processos de nitrificação e desnitrificação, elevando as emissões de N_2O em

termos relativos (Qin et al., 2018; Wu et al., 2022).

Ameta-análise de Wu et al. (2022) quantificou esse efeito em escala global, registrando aumento médio de 149,9% nas emissões de N_2O sob AWD, os autores demonstraram que esse aumento é quantitativamente pequeno em relação ao CO_2 quando comparado à redução de CH_4 , resultando em diminuição líquida do GWP de 44,9%, resultado que encontra respaldo nos dados de Liu et al. (2023), os quais reportaram resultados ainda mais favoráveis no nordeste da China, os estudos demonstraram que o AWD reduziu o CH_4 em 63,0 a 78,9% e o Global Warming Potential (GWP) que quantifica o potencial de aquecimento global, em 62,0 a 75,2%, mesmo com aumento de 100 a 123% nas emissões de N_2O , pois este aumento ainda permanece relativamente baixo se comparado as emissões de CH_4 .

Diversas estratégias complementares permitem minimizar esse trade-off, a exemplo, a aplicação de nitrogênio durante as fases de inundação reduz a disponibilidade de substrato para a nitrificação nos períodos de maior aeração do solo (Dong et al., 2018), enquanto a combinação do AWD com fertilizantes de liberação controlada demonstrou efeito sinérgico na redução das perdas gasosas de nitrogênio (Ji et al., 2025; Li et al., 2024), e os condicionadores de solo à base de ferro suprimem simultaneamente CH_4 e N_2O por meio do ciclo redox do Fe (Galgo et al., 2024), e a combinação de AWD com biochar, que também se mostrou eficaz, reduzindo com o GWP combinado em 78,0% e a intensidade de emissões em 79,0% em relação à inundação contínua sem emenda (Liu et al., 2023).

Sinergias do AWD com outras práticas de manejo

A integração do AWD com outras práticas de manejo configura-se como o caminho mais promissor para maximizar a mitigação de GEE sem comprometer a produtividade, isso é verificado através dos dados disponíveis que indicam que nenhuma prática isolada é capaz de atingir o potencial máximo de redução de emissões e que as combinações entre intervenções complementares produzem efeitos sinérgicos superiores à soma das partes (Zhao et al., 2019; Wu et al., 2022; Rajbonshi et al., 2024).

A associação entre AWD e biochar é uma das sinergias mais bem documentadas, Liu et al. (2023) demonstraram que a combinação de biochar de palha de arroz a 20 t ha^{-1} com AWD reduziu o GWP em 78,0% e a intensidade de emissões em 79,0%, com aumento de produtividade de 11,0% na terceira safra, resultado que encontra respaldo no experimento de seis anos conduzido por Wu et al. (2019), os quais confirmaram que o biochar reduziu CH_4 em 11,2 a 17,5% e N_2O em 19,5 a 26,3%, com efeito progressivamente maior ao longo do tempo.

A integração do AWD com o manejo da adubação nitrogenada também produz ganhos expressivos, os estudos de Bhuiyan et al. (2021) demonstraram que doses baixas de N ($1\text{--}120 \text{ kg N ha}^{-1}$) reduziram as emissões de CH_4 em 23% em relação ao controle sem fertilização, enquanto a combinação de fertilizante de liberação controlada com AWD reduziu sinergicamente as perdas gasosas de nitrogênio. Ji et al. (2025) e Li et al. (2024) confirmam que o manejo integrado de água e nitrogênio reduz consistentemente o GWP

ao longo de múltiplas safras. Outro insumo que potencializa os efeitos do AWD é a zeólita, que retém NH_4^+ no solo, reduz perdas de nitrogênio e mitiga emissões de N_2O , com ganhos adicionais de produtividade (Sha et al., 2022).

A escolha do cultivar também influencia a eficácia do AWD, Loaiza et al. (2024) identificaram que o cultivar foi determinante para a magnitude da mitigação sob irrigação intermitente, com o mesmo genótipo apresentando desempenhos distintos entre zonas hidrológicas, enquanto Zhang et al. (2023) demonstraram que cultivares resistentes à seca exibiram consistentemente menor intensidade de emissões sob irrigação alternada, e Figueiredo Moura da Silva et al. (2025) confirmaram por modelagem que a escolha do cultivar interage com o manejo hídrico para determinar a magnitude da redução de CH_4 em sistemas subtropicais brasileiros.

Em relação ao sistema de cultivo, Mezzari et al. (2023) documentaram em experimento de 20 anos no sul do Brasil que o plantio direto reduziu as emissões líquidas de GEE em 25%, com acúmulo de carbono orgânico no solo de 0,45 a 0,65 $\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, sendo que a substituição parcial de fertilizantes sintéticos por orgânicos em taxas moderadas, combinada ao AWD, reduziu o GWP em 58,0% e o GWP escalonado pela produtividade em 52,5% (Liao et al., 2023), enquanto Wang et al. (2022) demonstraram que a incorporação de esterco suíno a 50% do N total aumentou o sequestro de carbono orgânico no solo em 192 a 224%, contribuindo para redução das emissões líquidas de GEE em 41 a 52%.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O conjunto de evidências revisado neste capítulo demonstra que a irrigação alternada (AWD) é a estratégia de manejo mais eficaz e amplamente validada para a mitigação de gases de efeito estufa em lavouras de arroz irrigado, os resultados dos estudos analisados demonstraram que as reduções consistentes nas emissões de CH_4 , sem penalidade sobre a produtividade, estão fundamentadas em mecanismos biogeoquímicos bem estabelecidos, que envolvem a elevação do potencial redox do solo, a supressão da atividade metanogênica, o estímulo à metanotrofia e a redução do transporte de CH_4 via aerênquima radicular.

A variação regional da eficácia do AWD reforça que sua implementação exige adaptação às condições locais de solo, clima e infraestrutura hídrica. Constata-se que o trade-off entre CH_4 e N_2O , embora real, é quantitativamente pequeno em termos de equivalentes de CO_2 e pode ser minimizado por meio da integração do AWD com manejo adequado da adubação nitrogenada, condicionadores de solo à base de ferro e biochar.

O AWD se consolida, assim, como uma ferramenta acessível, tecnicamente viável e economicamente interessante para produtores de arroz em diferentes contextos produtivos, num cenário em que as mudanças climáticas e a crescente demanda por sistemas agrícolas mais sustentáveis tornam cada vez mais urgente a adoção de práticas com eficácia comprovada, para o contexto brasileiro, especialmente nas regiões produtoras do Sul, ainda são necessários estudos de longo prazo que integrem mitigação climática, produtividade e viabilidade econômica como critérios simultâneos de avaliação.

REFERÊNCIAS

- BHUIYAN, Md Shahinul Islam et al. **Eco-friendly yield-scaled global warming potential assists to determine the right rate of nitrogen in rice system: A systematic literature review.** Environmental Pollution, v. 271, p. 116386, 2021.
- CAMARGO, Estefânia Silva et al. **Intercontinental comparison of greenhouse gas emissions from irrigated rice fields under feasible water management practices: Brazil and Japan.** Soil Science and Plant Nutrition, v. 64, n. 3, p. 332-342, 2018.
- CHIDTHAISONG, Amnat et al. **Evaluating the effects of alternate wetting and drying (AWD) on methane and nitrous oxide emissions from a paddy field in Thailand.** Soil Science and Plant Nutrition, v. 64, n. 1, p. 47-58, 2018.
- DONG, Wenjun et al. **Water regime-nitrogen fertilizer incorporation interaction: field study on methane and nitrous oxide emissions from a rice agroecosystem in Harbin, China.** Journal of Environmental Sciences, v. 66, p. 125-135, 2018.
- FIGUEIREDO MOURA DA SILVA, Evandro H. et al. **Assessing methane and nitrous oxide emissions in lowland rice-soybean cropping systems through crop modeling.** Agricultural Systems, v. 225, p. 104478, 2025.
- GALGO, Sherlyn Jane C. et al. **A potential of iron slag-based soil amendment as a suppressor of greenhouse gas (CH₄ and N₂O) emissions in rice paddy.** Frontiers in Environmental Science, v. 12, p. 1290969, 2024.
- HOANG, Thi Nhan et al. **Higher rice grain yield and lower methane emission achieved by alternate wetting and drying in central Vietnam.** European Journal of Agronomy, v. 151, p. 126992, 2023.
- ISLAM, S. F.-U. et al. **The effective mitigation of greenhouse gas emissions from rice paddies without compromising yield by early-season drainage.** Science of the Total Environment, v. 612, p. 1329-1339, 2018.
- Jl, Yue et al. **Combination of water-saving irrigation and controlled-release fertilizer application reduced gaseous nitrogen loss in single-crop paddy soil.** Journal of Environmental Management, v. 377, p. 124695, 2025.
- KARKI, Sudarshan et al. **Multiyear methane and nitrous oxide emissions in different irrigation management under long-term continuous rice rotation in Arkansas.** Journal of Environmental Quality, v. 52, n. 3, p. 558-572, 2023.
- LI, Jianchang et al. **Annual greenhouse gas emissions from a rice paddy with different water-nitrogen management strategies in Central China.** Soil and Tillage Research, v. 235, p. 105906, 2024.
- LIAO, Bing et al. **A combination of organic fertilizers partially substitution with alternate wet and dry irrigation could further reduce greenhouse gases emission in rice field.** Journal of Environmental Management, v. 342, p. 118372, 2023.
- LIU, Chi et al. **Effects of rice straw biochar on CH₄ and N₂O emissions in alternating wetting and drying rice fields.** Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, v. 39, p. 219-228, 2023.

LOAIZA, Sandra et al. **Identifying rice varieties for mitigating methane and nitrous oxide emissions under intermittent irrigation.** Journal of Environmental Management, v. 370, p. 123376, 2024.

MARTÍNEZ-EIXARCH, Maite et al. **Multiple environmental benefits of alternate wetting and drying irrigation system with limited yield impact on European rice cultivation: the Ebre Delta case.** Agricultural Water Management, v. 255, p. 107164, 2021.

MEZZARI, Mário Felipe et al. **Mitigation of greenhouse gases emission affected by no-tillage and winter cover crops in a subtropical paddy rice ecosystem.** Revista Brasileira de Ciência do Solo, v. 47, p. e0220137, 2023.

NISHIMURA, Seiichi et al. **Effect of intermittent drainage in reduction of methane emission from paddy soils in Hokkaido, northern Japan.** Soil Science and Plant Nutrition, v. 66, n. 1, p. 168-177, 2020.

QIN, Hua et al. **Abundance of transcripts of functional gene reflects the inverse relationship between CH₄ and N₂O emissions during mid-season drainage in acidic paddy soil.** Biology and Fertility of Soils, v. 54, n. 8, p. 885-897, 2018.

RAJBONSHI, Manas Pratim; MITRA, Srabani; BHATTACHARYYA, Pratap. **Agro-technologies for greenhouse gases mitigation in flooded rice fields for promoting climate smart agriculture.** Environmental Pollution, v. 352, p. 123973, 2024.

SHA, Ye et al. **Zeolite application increases grain yield and mitigates greenhouse gas emissions under alternate wetting and drying rice system.** Science of the Total Environment, v. 838, p. 156067, 2022.

SIBAYAN, Evangeline B. et al. **Effects of alternate wetting and drying technique on greenhouse gas emissions from irrigated rice paddy in Central Luzon, Philippines.** Soil Science and Plant Nutrition, v. 64, n. 1, p. 39-46, 2018.

TIMM, Pâmela Andrades et al. **A novel irrigation system to reduce methane emissions in paddy fields.** Nutrient Cycling in Agroecosystems, v. 131, p. 57-72, 2025.

TRAN, Dang Hoa et al. **Impacts of alternate wetting and drying on greenhouse gas emission from paddy field in Central Vietnam.** Soil Science and Plant Nutrition, v. 64, n. 1, p. 24-35, 2018.

TUYISHIME, Olivier et al. **Deep drainage lowers methane and nitrous oxide emissions from rice fields in a semi-arid environment in Rwanda.** Soil Systems, v. 6, n. 4, p. 84, 2022.

VITALI, Andrea et al. **The environmental and agronomic benefits and trade-offs linked with the adoption alternate wetting and drying in temperate rice paddies.** Field Crops Research, v. 317, p. 109550, 2024.

WANG, Chun et al. **Reduction in net greenhouse gas emissions through a combination of pig manure and reduced inorganic fertilizer application in a double-rice cropping system: three-year results.** Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 328, p. 107799, 2022.

WANG, Jin et al. **Straw type and nitrogen-water management balance rice yield**

and methane emissions by regulating rhizosphere microenvironment. Field Crops Research, v. 316, p. 109555, 2024.

WU, Qian et al. **Drainage in paddy systems maintains rice yield and reduces total greenhouse gas emissions on the global scale.** Journal of Cleaner Production, v. 374, p. 133515, 2022.

WU, Zhangming et al. **Biochar amendment reduced greenhouse gas intensities in the rice-wheat rotation system: six-year field observation and meta-analysis.** Agricultural and Forest Meteorology, v. 280, p. 107625, 2019.

XIAO, Zhuangzhuang et al. **Synergistic mechanism of moderate wetting drying irrigation improving rice productivity and environmental sustainability.** Field Crops Research, v. 332, p. 110035, 2025.

ZHANG, Gang et al. **The low greenhouse gas emission intensity in water-saving and drought-resistance rice in a rainfed paddy field in Southwest China.** Field Crops Research, v. 302, p. 109045, 2023.

ZHANG, Zhenglin et al. **Opportunities for mitigating net system greenhouse gas emissions in Southeast Asian rice production: a systematic review.** Agriculture, Ecosystems and Environment, v. 363, p. 108812, 2024.

ZHAO, Chuang et al. **Effects of alternate wetting and drying irrigation on methane and nitrous oxide emissions from rice fields: a meta-analysis.** Global Change Biology, v. 30, p. e17581, 2024a.

ZHAO, Xin et al. **Management-induced greenhouse gases emission mitigation in global rice production.** Science of the Total Environment, v. 654, p. 131-139, 2019.

ZHAO, Yang et al. **Effects of biochar application methods on greenhouse gas emission and nitrogen use efficiency in paddy fields.** Science of the Total Environment, v. 912, p. 169809, 2024b.