



Adubação com digestato bovino e ureia e seu efeito na volatilização de N-NH₃ do Solo

Fertilization with bovine digestate and urea and its effect on the volatilization of N-NH₃ in soil

Fertilización con digestato bovino y urea y su efecto sobre la volatilización de N-NH₃ del suelo

DOI: 10.55905/revconv.18n.6-271

Originals received: 5/23/2025

Acceptance for publication: 6/13/2025

Camila Ferreira Matos

Doutoranda em Agronomia - Ciências do solo

Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

Endereço: Seropédica – Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: camilamatos1@yahoo.com.br

Arthur Pontes Fonseca

Graduado em Engenharia Mecânica

Instituição: Centro Universitário UDF

Endereço: Brasília – Distrito Federal, Brasil

E-mail: eng.arthurpontes@gmail.com

Orlando Carlos Huertas Tavares

Doutor em Fitotecnia

Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

Endereço: Seropédica – Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: ochtavares@gmail.com

Maria Eduarda Tinoco Xistuli

Graduanda em Agronomia

Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

Endereço: Seropédica – Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: dudaxistuli@ufrj.br

Rosimar de Souza Goulart

Doutor em Agronomia – Ciências do Solo

Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

Endereço: Seropédica – Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: rosimargoulart@gmail.com



Nélia Daluvia Rafael Cambanhane

Mestre em Engenharia Agrícola e Ambiental

Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

Endereço: Seropédica – Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: neliadaluvia@ufrj.br

David Vilas Boas de Campos

Doutor em Agronomia – Ciências do solo

Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

Endereço: Seropédica – Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: david.campos@embrapa.br

Érika Flávia Machado Pinheiro

Doutora em Agronomia - Ciência do solo

Instituição: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ)

Endereço: Seropédica – Rio de Janeiro, Brasil

E-mail: erika@ufrj.br

RESUMO

O cultivo do milho possui exigência de uma quantidade maior de nitrogênio para obter boa produtividade. Esse macronutriente é suprido por meio da adubação nitrogenada com a ureia, porém, a sua aplicação proporciona elevadas perdas de N, principalmente, por volatilização de amônia (N-NH₃). Com isso, fortalece demanda por fontes alternativas de N que possam atender à demanda das culturas, levando em consideração a sustentabilidade do sistema dentro do contexto da economia circular. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o efeito de diferentes doses de digestato bovino sobre as perdas de nitrogênio por volatilização de amônia (N-NH₃). O experimento foi realizado em casa de vegetação, com o cultivo de milho em vasos, avaliando a resposta à aplicação de quatro doses de nitrogênio (20, 40, 80 e 120 kg de N ha⁻¹) de digestato bovino e ureia. Foram mensuradas as perdas diárias, acumuladas e totais por volatilização de N-NH₃. As maiores perdas de N-NH₃ foram observadas para as doses de 80 e 120 kg de N ha⁻¹ para o digestato e ureia, respectivamente, com picos aos 18 dias após a aplicação do digestato e no primeiro dia de aplicação de ureia. As perdas acumuladas, resultantes da aplicação de ureia, foram 70% superiores em comparação às do digestato bovino para todas as doses. A adubação com digestato bovino contribuiu para a mitigação das perdas de N amoniacal quando comparado à ureia.

Palavras-chave: digestato bovino, volatilização de amônia, uréia, mitigação, adubação orgânica.

ABSTRACT

Corn cultivation requires a higher amount of nitrogen to obtain good productivity. This macronutrient is supplied through nitrogen fertilization with urea, however, its application causes high N losses, mainly due to ammonia volatilization (N-NH₃). This strengthens the demand for alternative sources of N that can meet crop demand, taking into account the sustainability of the system within the context of the circular economy. The objective of this study was to evaluate the effect of different doses of bovine digestate on nitrogen losses due to ammonia volatilization (N-NH₃). The experiment was carried out in a greenhouse, with corn grown in pots, evaluating the response to the application of four nitrogen doses (20, 40, 80 and 120 kg of N ha⁻¹) of bovine



digestate and urea. Daily, accumulated and total losses due to N-NH₃ volatilization were measured. The highest NH₃-N losses were observed for doses of 80 and 120 kg of N ha⁻¹ for digestate and urea, respectively, with peaks at 18 days after digestate application and on the first day of urea application. The accumulated losses resulting from urea application were 70% higher compared to those of bovine digestate for all doses. Fertilization with bovine digestate contributed to the mitigation of ammoniacal N losses when compared to urea.

Keywords: bovine digestate, ammonia volatilization, urea, mitigation, organic fertilization.

RESUMEN

El cultivo de maíz requiere una mayor cantidad de nitrógeno para obtener una buena productividad. Este macronutriente se suministra mediante la fertilización nitrogenada con urea; sin embargo, su aplicación ocasiona altas pérdidas de N, principalmente por volatilización de amoníaco (N-NH₃). Esto fortalece la demanda de fuentes alternativas de N que puedan satisfacer la demanda del cultivo, teniendo en cuenta la sostenibilidad del sistema en el contexto de la economía circular. El objetivo de este estudio fue evaluar el efecto de diferentes dosis de digestato bovino sobre las pérdidas de nitrógeno por volatilización de amoníaco (N-NH₃). El experimento se llevó a cabo en invernadero, con maíz cultivado en macetas, evaluándose la respuesta a la aplicación de cuatro dosis de nitrógeno (20, 40, 80 y 120 kg de N ha⁻¹) de digestato bovino y urea. Se midieron las pérdidas diarias, acumuladas y totales por volatilización de N-NH₃. Las mayores pérdidas de NH₃-N se observaron con dosis de 80 y 120 kg de N ha⁻¹ para digestato y urea, respectivamente, con picos a los 18 días de la aplicación del digestato y el primer día de la aplicación de la urea. Las pérdidas acumuladas resultantes de la aplicación de urea fueron un 70 % superiores a las del digestato bovino para todas las dosis. La fertilización con digestato bovino contribuyó a mitigar las pérdidas de N amoniacal en comparación con la urea.

Palabras clave: digestado bovino, volatilización de amoníaco, urea, mitigación, fertilización orgánica.

1 INTRODUÇÃO

O cultivo do milho se destaca dentro do cenário brasileiro, sendo uma das principais culturas produzidas no país. A estimativa nacional do plantio do milho na temporada 2024/25 deverá apresentar crescimento de 7,8% em comparação à temporada anterior, resultando em uma produção de 128,30 milhões de toneladas (Conab, 2025).

O nitrogênio é o nutriente exigido em maior quantidade pela cultura do milho, exercendo maior influência na produtividade de grãos (Abreu, 2022). Para que a necessidade nutricional da cultura seja suprida, muitos estudos são realizados com objetivo de avaliar a eficiência de diferentes adubos minerais no desenvolvimento do milho (Dugalic et al., 2025, Pacifico *et al.*, 2024, Szulc *et al.*, 2021). A adubação nitrogenada, através da ureia, é a forma mais utilizada no



Brasil, isso se deve ao alto teor de nitrogênio, aproximadamente 46%. No entanto, apresenta alto grau de perdas por volatilização de NH_3 , entre 159 e 168 g por quilograma de ureia (Skorupka e Nosalewicz, 2021).

Diante do aumento dos custos dos fertilizantes nitrogenados, tem-se um crescimento na demanda por fontes de N alternativas que possam atender à demanda das culturas, levando em consideração a sustentabilidade do sistema dentro do contexto da economia circular. Assim, o tratamento de resíduos orgânicos sólidos e efluentes gerados na produção agropecuária e a possibilidade de uso dos produtos gerados como fertilizantes orgânicos surge como alternativa capaz de atender às necessidades nutricionais de diferentes culturas (Martins *et al.*, 2016). Adicionalmente, num contexto maior atende aos seguintes alvos dos “Objetivos do Desenvolvimento Sustentável”: 1) ‘Fome Zero e Agricultura Sustentável’ e 2) ‘Água Potável e Saneamento’, proposto pela Organização das Nações Unidas.

Dessa maneira, a digestão anaeróbia é uma forma de tratamento de resíduos orgânicos que vem crescendo no país, haja vista que entre os anos de 2015 e 2024, cerca de 1.633 plantas com biodigestores foram instaladas, sendo que dessas, 1.268 foram utilizadas para tratar resíduos agropecuários, produzindo 872 milhões de Nm^3/ano de biogás no ano de 2024 (Cibiogás, 2025). Esse tratamento é um processo bioquímico complexo que ocorre em meio anaeróbio, dependente da atividade conjunta de uma associação de microrganismos (Kunz *et al.*, 2019), obtendo como produto final biogás e digestato.

O digestato é um subproduto rico em nutrientes da digestão anaeróbica, podendo conter abundantes elementos essenciais como nitrogênio, fósforo e potássio (Guan *et al.*, 2024), sendo sua composição variável e dependente, principalmente, da matéria-prima utilizada no processo de digestão anaeróbia (Mikusińska *et al.*, 2025).

Uma vez que as características do material digestato relacionam-se diretamente à matéria-prima que o compõe, sua aplicação como adubo orgânico pode resultar em diferentes efeitos, não apenas sobre a fertilidade do solo, mas também sobre aspectos ambientais relacionados às perdas de nutrientes.

Nesse contexto, destaca-se que a perda de nitrogênio proveniente de fertilizantes orgânicos tem implicações econômicas e ambientais relevantes, sendo que a volatilização de amônia (NH_3) representa a principal via de perda de nitrogênio em solos agrícolas (Bouwmeester *et al.*, 1985). Além disso, fatores abióticos, como temperatura e umidade do solo, influenciam



diretamente os processos de transformação do nitrogênio, como nitrificação e desnitrificação, os quais são também modulados pelos sistemas de manejo do solo (Giacomini *et al.*, 2006).

Diante disso, torna-se fundamental compreender como a aplicação do digestato, em comparação com fontes minerais como a ureia, impacta na dinâmica do nitrogênio no solo, especialmente no que se refere às perdas por volatilização de NH_3 . Entretanto, os estudos relacionados às emissões de gases associadas ao uso de digestato ainda são limitados, o que reforça a necessidade de pesquisas que aprofundem esse tema. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da adubação com digestato bovino e ureia sobre a volatilização de amônia (N-NH_3) em solo agrícola, contribuindo para uma melhor compreensão dos impactos ambientais e da eficiência do uso do nitrogênio nessas práticas de manejo.

2 METODOLOGIA

Para produção do digestato bovino, utilizou-se protótipos de biodigestores instalados nas dependências do Departamento de Solos, do Instituto de Agronomia da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ), campus Seropédica (coordenadas geográficas: 22° 45' 33" S e 43° 41' 51"). Os protótipos de biodigestores de bancada foram abastecidos com dejetos bovinos obtidos do Sistema Orgânico de Produção de Leite, provenientes da Fazendinha Agroecológica km 47, localizada no município de Seropédica, no estado do Rio de Janeiro.

O sistema de abastecimento dos biodigestores utilizado foi o do tipo batelada, onde os dejetos permaneceram dentro do biodigestor por 90 dias. Após retirado do biodigestor, o digestato foi seco em estufa à 40°C. Em seguida foi macerado, passado em peneira de 100 mesh para posterior caracterização química, quanto ao pH, relação C/N e a concentração de macro e micronutrientes, segundo a Resolução Conama nº 498/20 (CONAMA, 2020). Uma fração do digestato seco foi destinado à aplicação no solo para o experimento em casa de vegetação.

A Tabela 1 apresenta a caracterização do digestato de dejetos de bovinos, em base seca, utilizado como fertilizante no experimento em casa de vegetação.



Tabela 1. Caracterização química do digestato de dejetos bovinos.

Cálcio	Magnésio	Sódio	Potássio	Fósforo	Alumínio	Carbono	Nitrogênio	C/N	pH
-----mg kg ⁻¹ -----						-----%-----			
14.434,14	19.033,04	181,25	5.104,62	5.189,81	292,71	36,74	1,52	24	7,17

Fonte: Elaborado pelos autores.

Os ensaios do digestato em relação ao seu efeito na volatilização de N-NH₃ foram conduzidos em casa-de-vegetação climatizada (temperatura e umidade), localizada em área experimental no Departamento de Solos, do Instituto de Agronomia da UFRRJ, Campus Seropédica.

Para o experimento da volatilização de amônia, foram utilizados vasos plásticos preenchidos com o solo de textura arenosa (Planossolo Háptico), oriundo da camada superficial (0-20 cm). Sequencialmente à coleta, o solo foi seco ao ar, destorroado e peneirado (2 mm) para a caracterização química (Tabela 2), no Laboratório de Estudos das Relações Solo-Planta do Departamento de Solos /UFRRJ, de acordo com a metodologia da Embrapa (1997).

Visando a neutralização do alumínio tóxico (Al³⁺) e a elevação do pH próximo a 6,5, foi efetuado a calagem do solo de acordo com a curva de neutralização e o período de incubação proposto por Stafanato (2009).

Tabela 2. Caracterização química do Planossolo Háptico após a calagem.

Solo	Na	Ca	M _g	H+Al	Al	Sb	T	V	m	n	N	C	pH	P	K
	-----cmolc/dm ³ -----						-----%-----		-----g kg ⁻¹ -----		1:2,5	mg/dm ³			
Planossolo Háptico	0,02	2,3	1,1	1,3	0,0	3,5	4,8	73,3	0,0	0,42	0,10	10,0	6,2	2,7	13,7

Onde: Sb - soma de bases; T - capacidade efetiva de troca de cátions a pH 7,0; V - saturação por bases; m - saturação por Al; n - saturação por sódio.

Fonte: Elaborado pelos autores.

O experimento visando a análise das perdas por volatilização de amônia foi conduzido por 27 dias, de 02 de abril a 29 de abril do ano de 2020. As unidades experimentais consistiram em vasos de polietileno (5 kg) preenchidos com terra (4 kg), onde foi cultivada a variedade de milho Sol da Manhã (BRS 4157).

Os tratamentos avaliados foram: controle (sem N), ureia e digestato bovino. Adotou-se o delineamento experimental inteiramente casualizado, em esquema fatorial 4 x 2, onde os fatores estudados foram duas fontes de N (digestato bovino e ureia), quatro doses (20, 40, 80 e 120 kg ha⁻¹), um controle absoluto e três repetições, resultando em 27 unidades experimentais. Para



ambos os tratamentos, os fertilizantes foram aplicados superficialmente, sem incorporação. As doses do digestato bovino e da ureia foram aplicadas no momento do plantio.

Diariamente, as plantas foram irrigadas visando manter o teor de umidade do solo entre 50 e 70% da capacidade de campo. Foi realizado um desbaste sete dias após a semeadura, mantendo-se duas plantas por vaso.

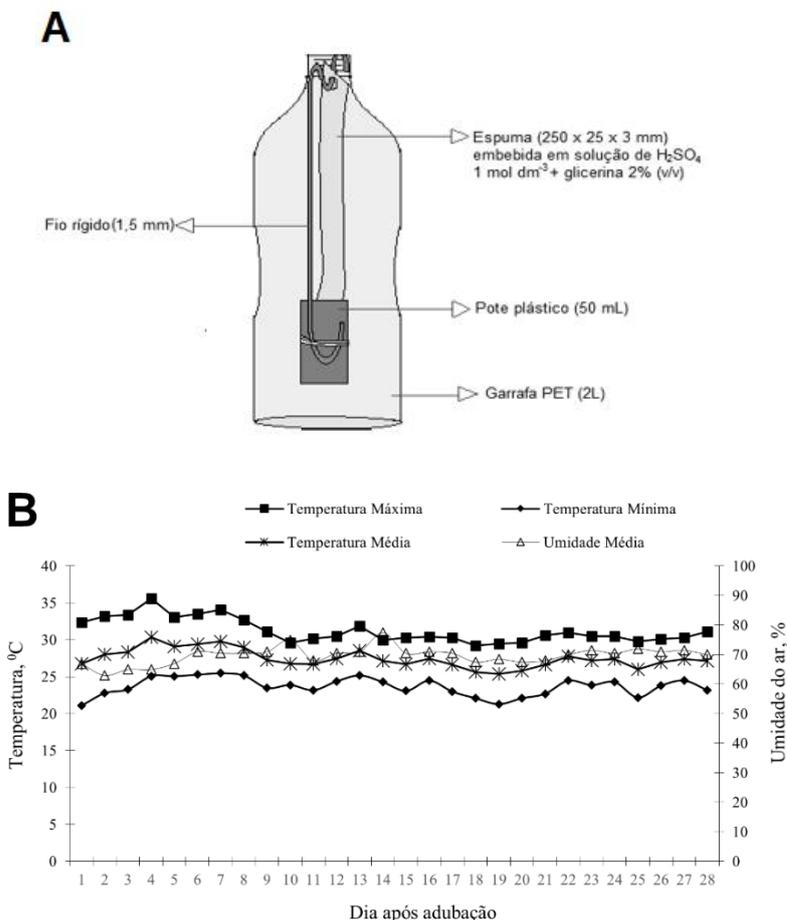
Para o estudo da dinâmica da liberação de N-NH₃, foi adicionada uma lâmina de água, um dia antes da aplicação dos fertilizantes, a fim de elevar a umidade do solo próximo a 70 % da capacidade de campo, objetivando estimular a urease do solo e dessa forma, a volatilização de amônia proveniente do N orgânico do solo. No dia posterior, imediatamente após a aplicação dos fertilizantes, instalou-se uma câmara coletora na superfície do solo em cada vaso. As primeiras coletas da amônia volatilizada foram efetuadas com intervalos de 24 horas até o 7º dia, e após esse período, com intervalos de 72 horas até o 27º dia após a aplicação dos fertilizantes.

A coleta da amônia volatilizada foi realizada através do sistema semiaberto livre estático “SALE” (Araújo *et al.*, 2009), instalando-se câmaras coletoras nos vasos cultivados com milho. Neste sistema, as câmaras coletoras são constituídas por uma garrafa plástica transparente (PET) de 2 litros sem a base, possuindo diâmetro de 10 cm, resultando em área de 0,008 m² (Figura 1A). A estrutura de captação de NH₃ fica no interior da garrafa, composta por um pote contendo uma lâmina de espuma de polietileno embebida em solução de H₂SO₄ 1 mol.dm³ + glicerina 2% (v/v) suspensa por um fio rígido de 1,5 mm. A determinação da amônia volatilizada foi realizada de acordo com metodologia proposta por Araújo *et al.* (2009).

Após o cálculo dos teores de N nas amostras do volatilizado, o valor obtido referente à área ocupada pela base dos coletores foi extrapolado para perda de NH₃ por hectare. Para calcular as perdas de N-NH₃ acumulada durante os dias de avaliação, as perdas do 1º dia e 2º foram somadas e adicionadas às perdas do 3º dia, que continuou até o último dia de coleta.



Figura 1. (A) Esquema da câmara utilizada para amostragem da volatilização de amônia (Adaptado de Araújo *et al.*, 2009). (B) Monitoramento da temperatura e umidade do ar nos diferentes dias de coleta de N-NH₃.



Fonte: Elaborado pelos autores.

A temperatura e a umidade relativa do ar foram monitoradas diariamente com os dados da estação meteorológica instalada na casa de vegetação (Figura 1B).

Para os resultados das perdas diárias de amônia por volatilização foram utilizados modelos de superfície de resposta (Eq.1), em que Y é a variável dependente, X₁ e X₂ são as variáveis independentes, η é a resposta predita; β_0 é uma constante que corrige a resposta no ponto central do experimento; β_1 e β_2 são os coeficientes de regressão para os termos de efeito linear; β_{11} e β_{22} são os termos do efeito quadrático; e β_{12} é o termo do efeito da interação (Myers *et al.*, 2016). O modelo de superfície de resposta generalizado é dado abaixo:

$$\eta = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{11} x_1^2 + \beta_{22} x_2^2 + \beta_{12} x_1 x_2 \quad (1)$$



A adequação dos modelos para inferência, foi verificada por meio da análise gráfica dos resíduos e do teste de *Shapiro-Wilk*. A qualidade do ajuste foi verificada pelo coeficiente de determinação (R^2) e da ANOVA ($p < 0,05$) para a regressão. A significância dos coeficientes de regressão foi analisada através do teste t ($p < 0,05$). A relação entre as variáveis independentes (X_1 e X_2) e as variáveis resposta (Y) foi apresentada pelos gráficos de superfície de resposta através do pacote “*rsm*” (Lenth, 2009).

Os dados de perdas acumuladas da ureia foram submetidos à análise de regressão não linear (O modelo logístico com três parâmetros foi selecionado) usando o pacote “*drc*” (Ritz *et al.*, 2015) para ajustar a curva de dados de volatilização de amônia ao tempo (Rocha *et al.*, 2019). Por outro lado, as perdas acumuladas do digestato, foram ajustadas a regressão linear simples. Todas as análises foram realizadas com o software R (R Development Core Team 2019).

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir das análises dos dados, observa-se diferentes comportamentos das perdas diárias de volatilização da NH_3 (Figura 3). A maior dose de aplicação de ureia $120 \text{ kg de N ha}^{-1}$ apresentou maiores perdas de N por volatilização nos primeiros dois dias de monitoramento, levando a maiores perdas acumuladas ao longo de todo o experimento quando comparada às demais doses (Figura 3A e Figura 4A). Stafanato *et al.* (2013) e Gurgel *et al.* (2016), avaliando perdas de $N-NH_3$ por volatilização oriunda da aplicação superficial de ureia, observaram que o pico máximo de perdas ocorreu 48 horas após a aplicação do fertilizante, corroborando com os resultados obtidos neste estudo. Segundo Duarte *et al.* (2007), os picos de volatilização de amônia da ureia aplicada ao solo variam de acordo com o teor de umidade, entretanto se apresentam mais intensos nos três dias após a aplicação.

Ainda para o tratamento ureia, foi observado uma redução das perdas de $N-NH_3$ do 9º ao 16º dia, com picos posteriores a partir do 18º dia. A ocorrência destes novos picos de volatilização podem estar associados a fatores ambientais, como a manutenção da umidade do solo nos vasos, uma vez que o fator umidade exerce forte influência sobre a atividade da urease, resultando em elevação da taxa de hidrólise da ureia, no entanto, com perdas menos expressivas em função da menor concentração do substrato (ureia) na ocasião da ocorrência destes eventos. Para esta mesma ocasião (18º dia), observa-se nos tratamentos com doses de digestato uma elevação na

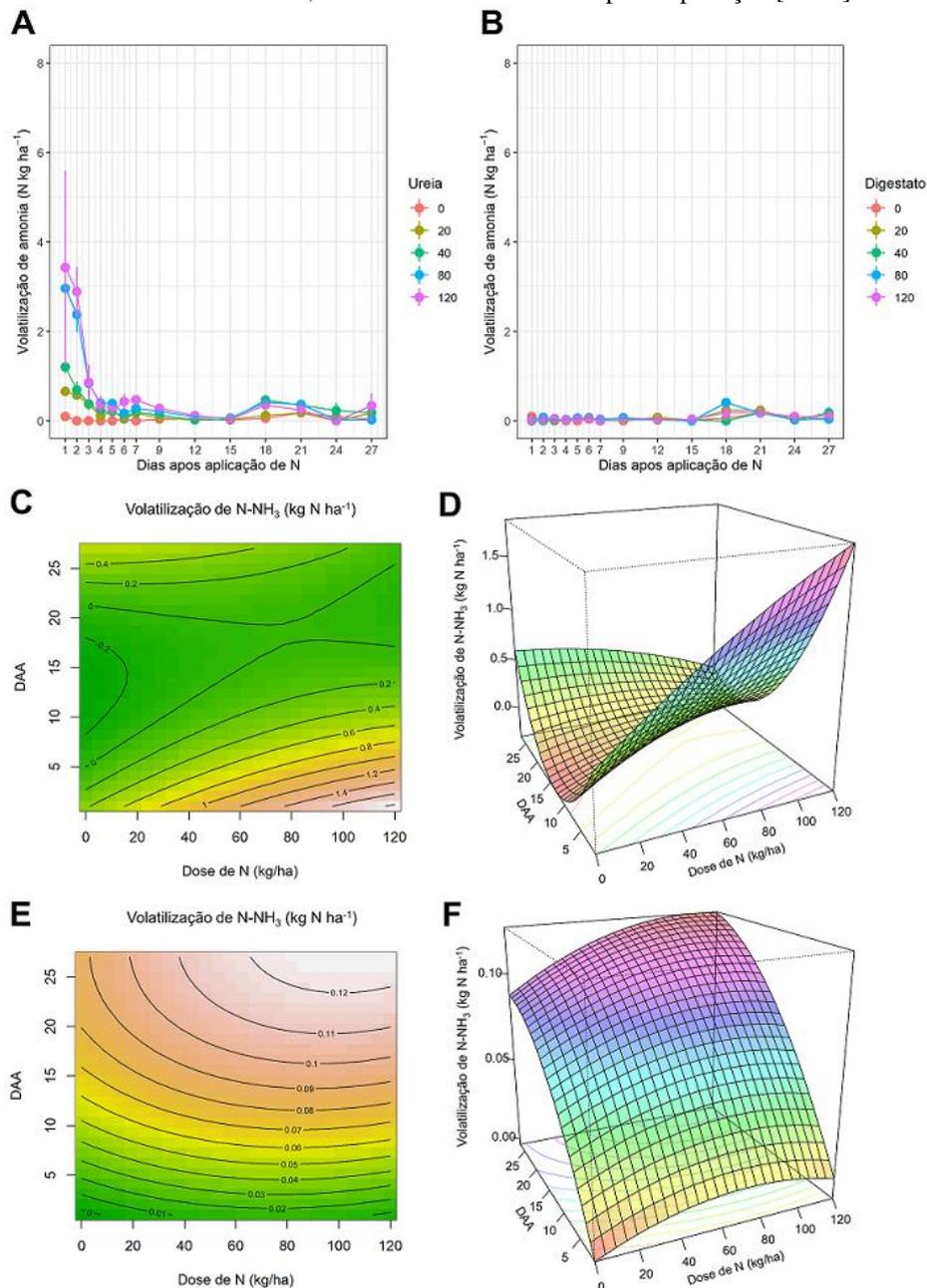


magnitude de perdas, caracterizando o pico máximo de volatilização de N-NH₃ para estes tratamentos. Evidencia-se, portanto, que as perdas ocasionadas no referido período podem estar diretamente relacionadas a fatores do ambiente, com influência direta sobre os diferentes tratamentos avaliados.

Os dados experimentais das perdas diárias de volatilização da NH₃ foram usados em uma análise de regressão múltipla (Figura 3C-F). A análise foi realizada utilizando o modelo de superfície de resposta para ajustar equações de primeira ordem, primeira ordem com interações e polinômios de segunda ordem. As perdas diárias de NH₃ da ureia nas maiores doses já foram altas às 24 h após aplicação do adubo, caindo fortemente até o 16^o dia, voltando a subir até o 27^o dia, especialmente nas doses mais baixas (Figura 3C, 3D). Por outro lado, as perdas diárias de NH₃ em todas as doses do digestato apresentaram um comportamento praticamente linear com uma magnitude muito inferior (menos para as maiores doses, 80 e 120 kg de N ha⁻¹) em relação a ureia (Figura 3E, F).



Figura 2. Perdas diárias por volatilização de amônia em diferentes doses de N até os 27 dias após a aplicação de ureia (A) ou digestato bovino (B). Gráfico de contorno para ureia (C) ou digestato bovino (E), e superfície de resposta para ureia (D) ou digestato bovino (F) a partir das perdas diárias por volatilização de amônia, em diferentes doses de N, medidos do 1º ao 27º dia após a aplicação [DAA].



Fonte: Elaborado pelos autores.

Souza *et al.* (2020) encontraram resultados semelhantes ao presente estudo ao observarem maiores perdas acumuladas até o décimo dia de monitoramento após aplicação de ureia em Latossolo Vermelho. Perdas mais intensas são observadas quando doses elevadas de N são aplicadas, fato que pode ser atribuído à maior quantidade e sobreposição de grânulos da ureia



aplicada quando comparado às menores doses (Lorensini *et al.*, 2012). Tal fato também foi observado por Tasca *et al.*, (2011) que, ao avaliarem o efeito de diferentes doses da ureia convencional ou com inibidor de urease na volatilização de amônia, observaram maiores perdas para doses mais elevadas aplicadas.

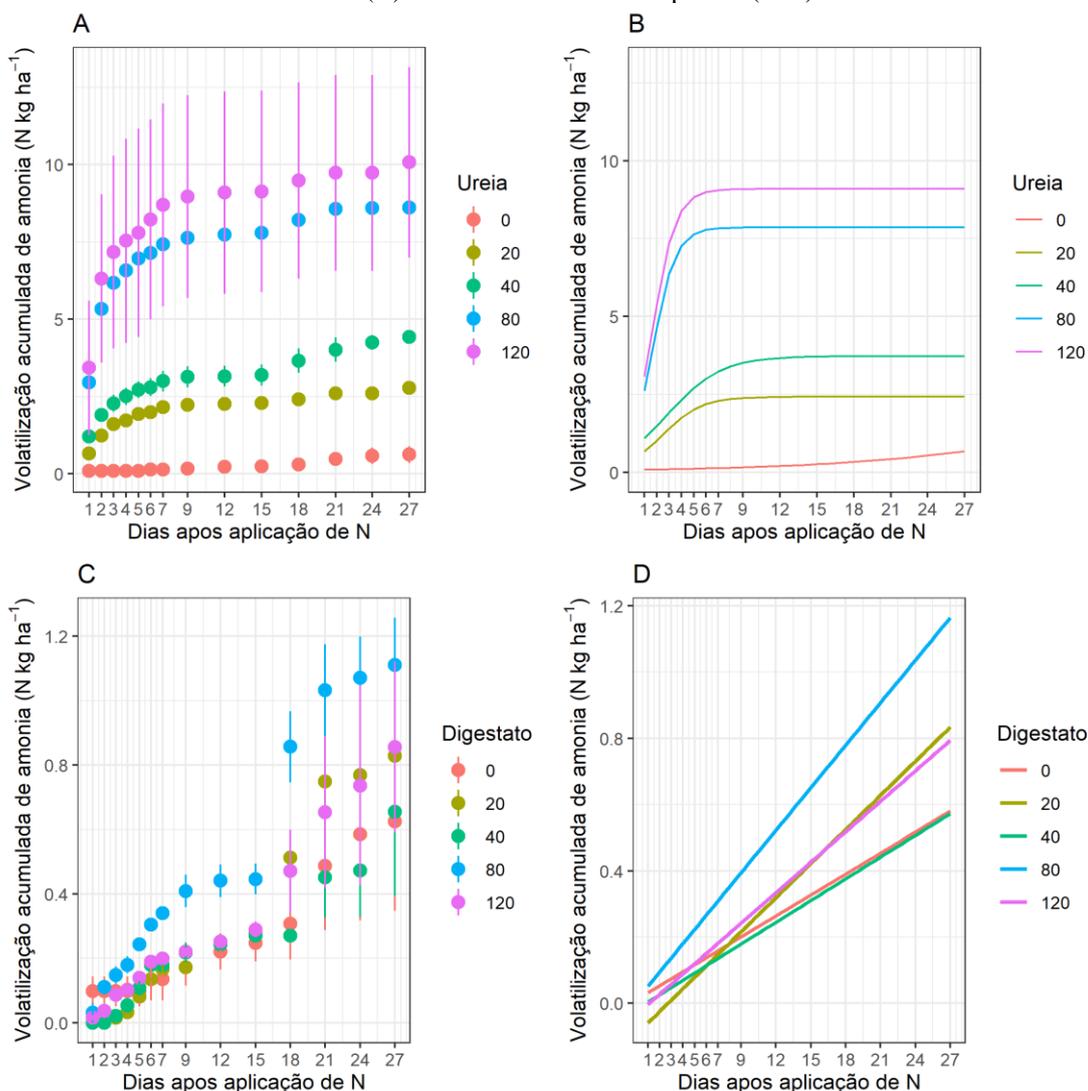
As perdas de N-NH₃ para o tratamento digestato iniciaram-se no segundo dia após fertilização, sendo maiores para a dose de 80 kg de N ha⁻¹ (Figura 2B). Essa mesma dose apresentou maior perda acumulada por volatilização de N-NH₃ ao longo de todo o experimento, seguida pela dose de 120 kg de N ha⁻¹. Pode-se observar picos de volatilização de NH₃ aos dezoito dias de experimento (Figura 2B). Tal fato não se relaciona aos parâmetros de temperatura e umidade do ar medidos nesse mesmo dia. Verdi *et al.* (2019) ao avaliarem o efeito da aplicação da fração líquida de digestato suíno e ureia na cultura do milho nas perdas de N por volatilização de amônia, observaram emissões significativas de NH₃ no ar durante um curto espaço de tempo na primeira semana de monitoramento, corroborando com o presente trabalho.

As perdas acumuladas de N-NH₃ para o tratamento ureia (Figura 3A, 3B) foram mais acentuadas quando comparadas ao digestato bovino (Figura 3C, D), ao longo dos 27 dias de experimento. Souza *et al.* (2021) observaram que a aplicação de ureia tratada com o inibidor de urease NBPT reduziu significativamente as perdas de nitrogênio por volatilização de amônia em comparação à ureia convencional, destacando a eficácia do NBPT na mitigação dessas perdas.

Pode-se observar uma tendência de aumento das perdas acumuladas de N-NH₃ por volatilização com o aumento das doses de ureia adicionadas ao solo (Figura 3). As perdas acumuladas por volatilização de N-NH₃ foram de 2,78 kg ha⁻¹ do N adicionado na forma de ureia com aplicação da dose 20 kg de N ha⁻¹ (Figura 3 A, 3B). Ainda para esse fertilizante, observa-se perdas de 4,43, 8,61 e 10,07 kg de N ha⁻¹ para as doses 40, 80 e 120 kg de N ha⁻¹, respectivamente.



Figura 3. Perdas acumuladas de $N-NH_3$ em diferentes doses de N, até os 27 dias após a aplicação de ureia (A) ou digestato bovino (C). Ajuste logístico para o tratamento ureia (B) e ajuste linear de primeira ordem para digestato bovino (D). Barras verticais de erro padrão ($\pm EP$).



Fonte: Elaborado pelos autores.

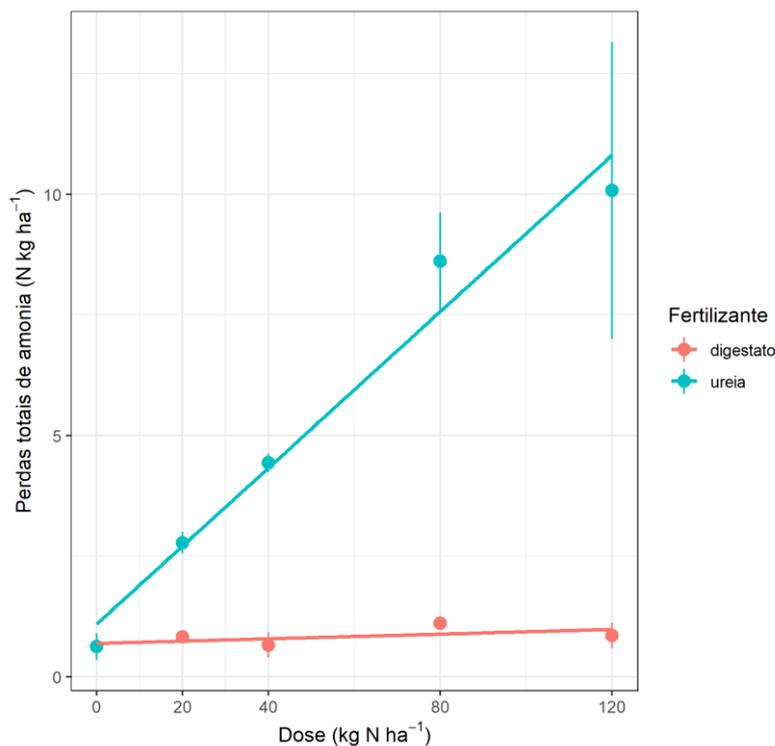
Observa-se no digestato perdas inferiores de $N-NH_3$ quando comparado à ureia, além de uma tendência de volatilização de $N-NH_3$ distinta, onde maiores perdas foram observadas para a dose de $80 \text{ kg de N ha}^{-1}$ (Figura 3C, 4D). As perdas totais para a adubação utilizando digestato foram de 0,82, 0,65, 1,10 e 0,85 kg de N ha^{-1} , para as doses 20, 40, 80 e $120 \text{ kg de N ha}^{-1}$, respectivamente.

As perdas totais por volatilização de $N-NH_3$ proveniente das diferentes doses (0, 20, 40, 80 e $120 \text{ kg de N ha}^{-1}$) da adubação nitrogenada na forma de ureia e da adubação orgânica na forma de digestato bovino apresentaram uma grande discrepância. Pode-se observar a dose-



resposta linear positiva somente para a ureia e comportamento constante para digestato bovino (Figura 4).

Figura 4. Perdas totais por volatilização de N-NH₃ para as doses de N dos fertilizantes ureia ($y = 1,09^{(ns)} + 0,082^{***}x$; $R^2 = 0,72$) e digestato bovino ($y = 0,69^{***} + 0,0024^{(ns)}x$; $R^2 = 0,08$). Teste t (não significativo ^(ns); *** $p < 0,001$).



Fonte: Elaborado pelos autores.

O digestato não apresentou ajuste significativo, com coeficiente de determinação $R^2 = 0,08$. Já a ureia apresentou um ajuste significativo para a taxa de volatilização de $0,082 \text{ kg de N ha}^{-1}$ a cada aumento incremental de 1 kg na dose de N ha^{-1} na forma de ureia, demonstrando o efeito das doses nas perdas de N-NH_3 , com coeficiente de determinação $R^2 = 0,72$.

Comparando as fontes de N aplicadas na cultura do milho, podemos observar que para a dose de $20 \text{ kg de N ha}^{-1}$, as perdas resultantes pela aplicação de ureia foram superiores em 70% em comparação às perdas conferidas pelo digestato bovino. Enquanto que para as maiores doses de N aplicadas ($40, 80$ e $120 \text{ kg de N ha}^{-1}$), as perdas para ureia foram ainda mais expressivas quando comparadas ao digestato bovino, apresentando-se em média 87% maiores ou superiores. Ambas as fontes de N foram aplicadas da mesma forma, superficialmente, evidenciando que as diferenças observadas para as perdas por volatilização entre as fontes de N não estão relacionadas



à forma de aplicação destas, mas podem estar ligadas às características químicas que cada uma das fontes apresenta.

Uma vez que a ureia se encontra na forma amídica, é necessário que ocorra o processo de hidrólise, pela ação da enzima urease, podendo ocasionar elevadas perdas por volatilização de N-NH_3 quando aplicada superficialmente. A aplicação incorporada da ureia ao solo é uma estratégia que visa reduzir as perdas por volatilização consideravelmente, uma vez que a ureia hidrolisada se difunde no solo, possibilitando a conversão de formas instáveis do nitrogênio (NH_3) em NH_4^+ , em função de condições favoráveis que podem ser encontradas no interior do solo (Trivelin *et al.*, 2002).

Quando se fala do digestato líquido, menores perdas também são observadas quando o mesmo é incorporado ao solo em comparação à aplicação em superfície (Riva *et al.*, 2016). Entretanto, estudos avaliando a aplicação incorporada da fração sólida do digestato comparada a aplicação superficial são escassos na literatura.

Apesar da umidade do solo ser mantida diariamente em sua capacidade de campo (fator que contribui para volatilização), a aplicação do digestato apresentou menores perdas quando comparada à literatura (Muller, 2018; Gumiero *et al.*, 2019). Todavia, é importante destacar que os trabalhos supracitados avaliaram as perdas por volatilização de N-NH_3 a partir da aplicação de digestato líquido como fertilizante. Segundo Logan & Visvanathan, (2019), a fração sólida do digestato pode possuir cerca de 20 a 30% do conteúdo de NH_4^+ total do digestato, fator que pode justificar as menores emissões de amônia observadas no presente estudo quando comparado aos demais da literatura.

Eickenscheidt *et al.* (2014) atribuem às baixas perdas de amônia através da aplicação do digestato à pouca infiltração do mesmo no solo, devido ao alto teor de matéria seca do material, como pode ser observado no presente estudo. O dejetos bovino utilizado como matéria-prima para produção do digestato apresentou características muito favoráveis à formação de crosta na superfície do vaso, como alto teor de matéria seca devido à alimentação animal (Smith *et al.*, 2007). Uma vez que a fração sólida do digestato bovino foi utilizada para fertilização, tem-se ainda um teor ainda maior de matéria seca na sua composição, relacionada principalmente às características físicas do dejetos bovino que o compõem. Ademais, as temperaturas máximas observadas também podem ter contribuído para formação de crosta após a aplicação de digestato, fato que pode efetivamente inibir a troca de NH_3 com a atmosfera (Eickenscheidt *et al.*, 2014).



Considera-se ainda para o presente estudo que a formação de crosta sobre a superfície dos vasos com aplicação de digestato pode favorecer a rápida perda de umidade na superfície com o aumento de temperatura. Essa diminuição de umidade superficial poderá refletir em redução da atividade microbiológica e conseqüentemente menor taxa de mineralização da fração orgânica do digestato. Tal fato pode contribuir para a redução de perdas por volatilização de amônia para esta fonte de N.

4 CONCLUSÃO

O digestato bovino aplicado na superfície apresentou menor perda diária, acumulada e total de nitrogênio por volatilização de amônia quando comparado à ureia, em todas as doses avaliadas. As perdas acumuladas de N-NH₃, resultantes da aplicação de ureia, atingiram patamares de 70% superiores em comparação às perdas conferidas pelo digestato bovino, para todas as doses avaliadas.

As maiores taxas de volatilização de N-NH₃ no cultivo do milho ocorrem nos primeiros três dias após a aplicação da maior dose do fertilizante mineral nitrogenado (120 kg N ha⁻¹) alcançando valor de 3,42 kg de N ha⁻¹ no primeiro dia de avaliação. Por outro lado, sob digestato bovino as perdas de N-NH₃ foram menores e a mitigação ocorreu até o 18º dia após a fertilização. Essa informação é relevante visando estratégias de manejo do solo e na aplicação do digestato que objetivam reduzir as perdas de N-NH₃ após a adubação orgânica e mineral.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, através da concessão de bolsa para a primeira autora. Também contou com o apoio financeiro do Comitê Guandu e Associação Pró-gestão das Águas da Bacia Hidrográfica do Rio Paraíba do Sul – AGEVAP.



REFERÊNCIAS

ABREU, J. A. A. **Estado de nitrogênio, índice SPAD, teor de açúcar e produtividade de genótipos de milho doce (Zea Mays L. Saccharata) em função de doses de nitrogênio.** Tese (Doutorado em Fitotecnia) - Curso de Fitotecnia - Universidade Federal de Viçosa - Viçosa, 2022.

ARAÚJO, E. S. *et al.* Calibração de câmara semiaberta estática para quantificação de amônia volatilizada do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 44, p. 769-776, 2009.

BRASIL. **Resolução nº 498, de 19 de agosto de 2020** (2020). Define critérios e procedimentos, para produção e aplicação de bio sólido em solos, e dá outras providências. Disponível em:
conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconam_a&task=arquivo.download&id=797.

BOUWMEESTER, R. J. B.; VLEK, P. L. G.; STUMPE, J. M. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil. **Soil Science Society of America Journal**, v. 49, p. 376-381, 1985.

CONAB. **Acompanhamento da Safra Brasileira de grãos**, v. 7, n.4 – Safra 2024/25 – Quarto levantamento. Brasília, p. 1-104, jan. 2020. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-graos/boletim-da-safra-de-graos/9o-levantamento-safra-2024-25/9o-levantamento-safra-2024-25>.

DUARTE, F. M.; POCOJESKI, E.; SILVA, L. S.; GRAUPE, F. A.; BRITZKE, P. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia com aplicação de ureia em solo de várzea com diferentes níveis de umidade. **Ciência Rural**, n. 3, p. 705-711, 2007.

DUGALIĆ, M. *et al.* Effect of Lime, Mineral Fertilizer and Manure on Soil Characteristics and Yield of Four Maize Hybrids. **Agronomy**, n. 3, p. 542. 2025.

EICKENSCHIEDT, T. *et al.* Short-term effects of biogas digestate and cattle slurry application on greenhouse gas emissions affected by N availability from grasslands on drained fen peatlands and associated organic soils. **Biogeosciences**, v. 11, p. 6187-6207, 2014.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. Rio de Janeiro, 1997.

GIACOMINI, S. J. *et al.* Emissão de óxido nitroso com a aplicação de dejetos líquidos de suínos em solo sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n. 11, 1653-1661, 2006.

GUAN, D. *et al.* A critical review on sustainable management and resource utilization of digestate. **Biochemical Engineering Journal**, v. 207, p. 339-354, 2024.

GUMIERO, B. *et al.* Nitrogen Budget of Short Rotation Forests Amended with Digestate in Highly Permeable Soils. **Applied Sciences**, n. 20, p. 4326, 2019.

GURGEL, G. C. S. *et al.* Volatilização de amônia proveniente de fertilizantes minerais mistos contendo ureia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n. 9, p. 1686-1694, 2016.



KUNZ, A.; STEINMETZ, R. L. R.; AMARAL, A. C. **Fundamentos da digestão anaeróbia, purificação do biogás, uso e tratamento do digestato.** Concórdia: SBERA, 2019.

LENTH, R. V. Response-Surface Methods in R, using rsm. **J Stat Software**, n. 7, p. 1-17, 2009.

LOGAN, M.; VISVANATHAN, C. Management strategies for anaerobic digestate of organic fraction of municipal solid waste: current status and future prospects. **Waste Management & Research**, n. 1, p. 27-39, 2019.

LORENSINI, F. *et al.* Lixiviação e volatilização de nitrogênio em um Argissolo cultivado com videira submetida à adubação nitrogenada. **Ciência Rural**, n. 7, p. 1173-1179, 2012.

MARTINS, J. D. L. *et al.* Esterco bovino, biofertilizante, inoculante e combinações no desempenho produtivo do feijão comum. **Revista Agro@mbiente On-line**, n. 4, p. 369-376, 2016.

MIKUSIŃSKA, J. *et al.* Fuel properties characterization of hydrochars derived from agricultural digestate. **Renewable Energy**, v. 244, p. 122639, 2025.

MULLER, F. **Volatilização de amônia com o uso de dejetos de suínos com pH modificado.** 2018. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Energia na Agricultura) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, 2018.

MYERS, R. H.; MONTGOMERY, D. C.; ANDERSON-COOK, C. M. Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments. **John Wiley & Sons**, p. 273-307, 2026.

PACIFICO, F. *et al.* Quantifying the impact of an abrupt reduction in mineral nitrogen fertilization on crop yield in the European Union. **Science of The Total Environment**, v. 954, p- 176692, 2024.

PORT, A. O. C.; GIACOMINI, S. J. Perda de nitrogênio por volatilização de amônia com o uso de dejetos de suínos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, n. 7, p. 857-865, 2003.

R DEVELOPMENT CORE TEAM. R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: **R Foundation for Statistical Computing**, 2019.

RITZ, C. *et al.* Dose-response analysis using R. **PLoS one**, n. 12, p. e0146021, 2015.

RIVA, C. *et al.* Short-term experiments in using digestate products as substitutes for mineral (N) fertilizer: Agronomic performance, odours, and ammonia emission impacts. **Science of The Total Environment**, v. 547, p. 206-214, 2016.

ROCHA, A. A. *et al.* Ammonia Volatilization from Soil-Applied Organic Fertilizers. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 43, p. 1-10, 2019.



SKORUPKA, M.; NOSALEWICZ, A. Ammonia volatilization from fertilizer urea—A new challenge for agriculture and industry in view of growing global demand for food and energy crops. **Agriculture**, n. 9, p. 822, 2021.

SMITH, K. *et al.* Natural crusting of slurry storage as an abatement measure for ammonia emissions on dairy farms. **Biosystems Engineering**, n. 4, p. 464 - 471, 2007.

SOUZA, J. R. *et al.* Volatilização de amônia de fontes convencionais de nitrogênio e ureia compactada sob condições controladas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, n. 2, e6411, 2021.

SOUZA, J. R. *et al.* Volatilização de amônia de fontes convencionais de nitrogênio e ureia compactada sob condições controladas. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, n. 2, p. 6411, 2020.

STAFANATO, J. B. *et al.* Volatilização de amônia oriunda de ureia pastilhada com micronutrientes em ambiente controlado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 726-732, 2013.

STAFANATO, J. B. **Aplicação de misturas granuladas NK e NS em cultivar de arroz (*Oryza sativa*)**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Instituto de Agronomia - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2009.

SZULC, P. *et al.* Dry matter yield of maize (*Zea mays* L.) as an indicator of mineral fertilizer efficiency. **Plants**, n. 3, p. 535, 2021.

TASCA, F. A. *et al.* Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 2, p. 493-502, 2011.

TRIVELIN, P. C. O. *et al.* Perdas de nitrogênio da uréia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 193-201, 2002.

VERDI, L. *et al.* Does the use of digestate to replace mineral fertilizers have less emissions of N₂O and NH₃ ? **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 269, p. 112–118, 2019.