

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM PRODUÇÃO VEGETAL

Cecília Matos Queiroz

Adubação organomineral à base de dejetos bovinos na produção e nutrição de
***Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás**

Montes Claros

2025

Cecília Matos Queiroz

**Adubação organomineral à base de dejetos bovinos na produção e nutrição de
Urochloa brizantha cv. BRS Paiaguás**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal.

Orientador: Dr. Luiz Arnaldo Fernandes

Coorientador: Dr. Fernando Colen

Montes Claros

Novembro de 2025

Queiroz, Cecília Matos.

Q3a Adubação organomineral à base de dejetos bovinos na produção e nutrição de
2025 urochloa brizantha cv. brs paiaguás [manuscrito] / Cecília Matos Queiroz. Montes
Claros, 2025.
68 f.: il

Dissertação (mestrado) - Área de concentração em Produção Vegetal. Universidade
Federal de Minas Gerais / Instituto de Ciências Agrárias.

Orientador(a): Luiz Arnaldo Fernandes.

Banca examinadora: Luiz Arnaldo Fernandes, Fernando Colen, Rodinei Facco
Pegoraro, Gustavo Lopes Muniz.

Inclui referências: f. 60-68.

1. Pirolise - Teses. 2. Digestão anaeróbia - Teses. 3. Biofertilizantes - Teses. I.
Fernandes, Luiz Arnaldo. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de
Ciências Agrárias. III. Título.

CDU: 631.8


ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO

Aos 09 de dezembro do ano de dois mil e vinte e cinco, às 14:00 horas, sob a Presidência do Professor Luiz Arnaldo Fernandes, D. Sc. (Orientador – UFMG/ICA) e com a participação dos Professores Fernando Colen, D. Sc. (UFMG/ICA), Rodinei Facco Pegoraro, D. Sc. (UFMG/ICA) e Gustavo Lopes Muniz, D. Sc. (Unicamp), reuniu-se, por videoconferência, a Banca de Defesa de Dissertação de **Cecília Matos Queiroz**, aluna do Curso de Mestrado em Produção Vegetal. Após avaliação da defesa de Dissertação da referida aluna, a Banca Examinadora procedeu à publicação do resultado da defesa de Dissertação intitulada: “**ADUBAÇÃO ORGANOMINERAL À BASE DE DEJETOS BOVINOS NA PRODUÇÃO E NUTRIÇÃO DE *Urochloa brizantha* CV. BRS PAIAGUÁS**”, sendo a aluna considerada **aprovada**. E, para constar, eu, Professor Luiz Arnaldo Fernandes, Presidente da Banca, lavrei a presente ata que depois de lida e aprovada, será assinada por mim e pelos demais membros da Banca examinadora.


OBS.: A aluna somente receberá o título após cumprir as exigências do ARTIGO 65 do regulamento do Curso de Mestrado em Produção Vegetal, conforme apresentado a seguir:

Art. 65 Para dar andamento ao processo de efetivação do grau obtido, o candidato deverá, após a aprovação de sua Dissertação ou Tese e da realização das modificações propostas pela banca examinadora, se houver, encaminhar à secretaria do Colegiado do Programa, com a anuência do orientador, 1 (um) exemplar impresso e 1 (um) exemplar eletrônico da dissertação ou, tese, no prazo de 60 (sessenta) dias.


Montes Claros, 09 de dezembro de 2025.

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ ARNALDO FERNANDES**
 Data: 09/12/2025 16:35:14-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>


Luiz Arnaldo Fernandes
 Orientador

Documento assinado digitalmente
 **FERNANDO COLEN**
 Data: 09/12/2025 18:35:01-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Fernando Colen
 Membro

Documento assinado digitalmente
 **RODINEI FACCO PEGORARO**
 Data: 09/12/2025 16:42:55-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rodinei Facco Pegoraro
 Membro

Documento assinado digitalmente
 **GUSTAVO LOPES MUNIZ**
 Data: 09/12/2025 23:04:37-0300
 Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Gustavo Lopes Muniz
 Membro

Em memória ao meu querido avô Edson, cuja sabedoria, amor e exemplo de vida continuarão sendo fonte de inspiração em cada conquista minha.

Dedico.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a Deus, pelas bênçãos concedidas ao longo dessa jornada, concedendo-me serenidade, sabedoria e coragem para seguir em frente. Por iluminar meus passos e fortalecer minha fé, mesmo diante dos desafios.

Ao meu esposo Renato, pela parceria, compreensão e por compartilhar comigo cada etapa desta caminhada. Seu amor, apoio e presença constante foram fundamentais para que eu chegasse até aqui.

À minha filha Heloísa, que, ainda em meu ventre, trouxe novo sentido e uma luz especial à minha vida, tornando esta conquista ainda mais significativa.

À minha família, por cada palavra de incentivo, por cada gesto de apoio e por acreditarem em mim mesmo quando o caminho parecia difícil.

Aos meus professores, Luiz Arnaldo e Fernando Colen, pela dedicação, paciência e valiosa orientação ao longo deste trabalho. Agradeço pelos ensinamentos, conselhos e pela contribuição fundamental para o meu crescimento acadêmico e pessoal.

Aos amigos que estiveram presentes durante essa caminhada, pela amizade sincera, carinho e pelas palavras de incentivo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro por meio da concessão da bolsa de estudos, que possibilitou a realização desta pesquisa.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal, pelos conhecimentos transmitidos e pela oportunidade de aprendizado e crescimento profissional.

E, por fim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para esta conquista, deixo o meu sincero e eterno agradecimento.

MUITO OBRIGADA.

“Há um tempo em que é preciso abandonar as roupas usadas, que já tem a forma do nosso corpo, e esquecer os nossos caminhos, que nos levam sempre aos mesmos lugares. É o tempo da travessia: e, se não ousarmos fazê-la, teremos ficado, para sempre, à margem de nós mesmos”.

(Fernando Pessoa)

RESUMO

A intensificação da pecuária leiteira, acompanhada pelo aumento da geração de dejetos, impõe desafios à gestão ambiental. Nesse contexto, a utilização do esterco bovino, como matéria-prima para a produção de organominerais, se apresenta como alternativa viável frente aos altos custos com adubação mineral. Dessa forma, a pesquisa teve como objetivo avaliar a eficiência agrônômica do biocarvão e do biofertilizante à base de esterco bovino, combinados com fonte mineral, na produção e nutrição do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás. A pesquisa foi conduzida em duas etapas: (i) produção e caracterização do biocarvão e do biofertilizante e (ii) cultivo do capim. O biocarvão foi obtido a partir de esterco bovino fresco submetido à pirólise lenta, sendo posteriormente triturado, peneirado (0,25 mm) e utilizado tanto na forma pura quanto na formulação de grânulos, com bio-óleo como aglutinante. O biofertilizante foi produzido por meio da fermentação anaeróbia do esterco bovino fresco diluído em água. O experimento foi conduzido em vasos, em delineamento em blocos casualizados com sete tratamentos e três repetições: (i) organomineral (ORG), (ii) biocarvão em pó com fosfato de potássio (BPO + PK), (iii) biocarvão granulado com fosfato de potássio (BGR + PK), (iv) esterco com fosfato de potássio (EB + PK), (v) biofertilizante com fosfato de potássio (BF + PK), (vi) biocarvão em pó (BPO) e (vii) fertilizante mineral (PK). As doses foram definidas com base na aplicação de 200 mg dm⁻³ de fósforo, referência utilizada para o cálculo da dose da fonte mineral (fosfato de potássio). A partir desse valor, adotou-se a proporção de 80 % de fonte orgânica e 20 % de fonte mineral nos tratamentos combinados, considerando os teores de fósforo específicos de cada material, a fim de garantir o fornecimento equivalente desse nutriente entre os tratamentos. O cultivo foi realizado por 113 dias, com cinco cortes consecutivos. Avaliou-se a biomassa seca da parte aérea (20-40 cm), radicular e do resíduo (0-20 cm), além de atributos químicos do solo ao final do cultivo. A partir dos dados de biomassa e dos teores nutricionais, determinou-se os acúmulos de macro e micronutrientes na parte aérea, resíduo e raiz, a eficiência média de utilização de nutrientes (EUN) e a produção relativa da parte aérea em relação ao tratamento PK. Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade. O tratamento BF + PK apresentou uma das maiores produções de biomassa seca aérea total (12,75 g/vaso) e residual (7,41 g/vaso) acompanhada dos maiores acúmulos foliares de N, K, S, B, Zn, Mn e Cu. O tratamento EB + PK também apresentou desempenho expressivo, destacando-se com elevada biomassa seca aérea (12,34 g/vaso), radicular (8,07 g/vaso) e residual (7,78 g/vaso), além de promover elevados acúmulos de macro e micronutrientes na raiz e no resíduo. Entre os produtos derivados da pirólise, os tratamentos com ORG e o BPO + PK obtiveram os melhores resultados. O organomineral resultou em crescimento intermediário da parte aérea (10,72 g/vaso), alto desenvolvimento radicular (7,58 g/vaso) e acúmulos expressivos de P, Ca e Mg nas folhas, e de Ca e Mg nas raízes. Já o BPO + PK apresentou produção de biomassa aérea equivalente à do BF + PK, destacando-se pelo elevado teor foliar de N. Em contrapartida, as aplicações isoladas de PK e biocarvão em pó resultaram nas menores produções e acúmulos de nutrientes. Assim, a combinação de fontes orgânicas combinadas ao PK, especialmente o biofertilizante, mostrou-se uma estratégia eficiente para potencializar a produtividade e o estado nutricional do capim Paiaguás, além de favorecer a melhoria dos atributos químicos do solo.

Palavras-chave: Biocarvão; biodigestão; biofertilizante; esterco bovino; pirólise

ABSTRACT

The intensification of dairy farming, accompanied by the increasing generation of manure, poses major challenges to environmental management. In this context, the use of cattle manure as a raw material for producing organomineral fertilizers emerges as a viable alternative to the high costs of mineral fertilization. This study aimed to evaluate the agronomic efficiency of biochar and biofertilizer derived from cattle manure, combined with a mineral source, on the production and nutrition of *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás. The research was conducted in two stages: (i) production and characterization of the biochar and biofertilizer, and (ii) cultivation of the grass. The biochar was obtained from fresh cattle manure subjected to slow pyrolysis, then ground, sieved (0.25 mm), and used both in pure form and as granules formulated with bio-oil as a binder. The biofertilizer was produced through the anaerobic fermentation of fresh manure diluted in water. The experiment was conducted in pots under a randomized block design with seven treatments and three replications: (i) organomineral fertilizer (ORG), (ii) powdered biochar with potassium phosphate (BPO + PK), (iii) granulated biochar with potassium phosphate (BGR + PK), (iv) manure with potassium phosphate (EB + PK), (v) biofertilizer with potassium phosphate (BF + PK), (vi) powdered biochar (BPO), and (vii) mineral fertilizer (PK). The doses were determined based on 200 mg dm⁻³ of phosphorus, used as a reference for calculating the mineral source (potassium phosphate). In the combined treatments, an 80% organic and 20% mineral ratio was applied, considering the specific phosphorus content of each material to ensure equivalent phosphorus supply among treatments. The cultivation lasted 113 days, with five consecutive harvests. Evaluations included dry biomass yield and the macro- and micronutrient contents in the shoot, roots, and residue, as well as soil chemical attributes at the end of the cultivation. Based on dry biomass and nutrient contents, macro and micronutrient accumulation, average nutrient use efficiency (NUE), and relative shoot yield (compared to PK) were calculated. Data were subjected to analysis of variance, and means were compared using Scott-Knott's test at a 5% probability level. The BF + PK treatment showed one of the highest total shoot dry biomass productions (12.75 g pot⁻¹) and residual biomass (7.41 g pot⁻¹), along with the greatest foliar accumulations of N, K, S, B, Zn, Mn, and Cu. The EB + PK treatment also showed outstanding performance, with high shoot (12.34 g pot⁻¹), root (8.07 g pot⁻¹), and residual (7.78 g pot⁻¹) biomass, in addition to promoting high macro- and micronutrient accumulations in roots and residues. Among the pyrolysis-derived products, the ORG and BPO + PK treatments showed the best performance. The organomineral fertilizer promoted intermediate shoot growth (10.72 g pot⁻¹), strong root development (7.58 g pot⁻¹), and notable accumulations of P, Ca, and Mg in leaves, and of Ca and Mg in the roots. The BPO + PK treatment produced shoot biomass similar to that of the biofertilizer, standing out for its high leaf N content. Conversely, isolated applications of PK and powdered biochar resulted in the lowest biomass production and nutrient accumulation. Overall, the combination of organic sources with PK, especially the biofertilizer, proved to be an effective strategy to enhance the productivity and nutritional status of Paiaguás palisadegrass, while contributing to the improvement of soil chemical attributes.

Keywords: Biochar; biodigestion; biofertilizer; cattle manure; pyrolysis

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Desenvolvimento da estrutura do biocarvão com o aumento da temperatura de tratamento.....	20
Figura 2 – Estrutura porosa do biocarvão responsável em atrair a colonização microbiana.....	22
Figura 3 – Esquema da produção do biocarvão de esterco bovino por pirólise lenta.....	29
Figura 4 – Esquema da produção do biofertilizante de esterco bovino por biodigestão anaeróbia.....	30
Figura 5 – Esquema da produção dos fertilizantes granulados em mesa de agitação.....	32
Figura 6 – Disposição dos vasos e implantação do experimento em casa de vegetação.....	35
Figura 7 – Esquema da composição e caracterização dos tratamentos do experimento.....	37
Figura 8 – Produção relativa de biomassa seca da parte aérea em relação ao tratamento PK.....	45
Figura 9 – Relação Raiz/Parte aérea, valores obtidos pela razão entre a biomassa seca radicular (BSRA) e a biomassa seca da parte aérea total (BSPTO).....	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características químicas do esterco bovino, do biofertilizante e do biocarvão.....	28
Tabela 2 – Descrição dos tratamentos utilizados para o cultivo do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiaguás em vasos preenchidos com 1,5 dm ³ de solo.....	33
Tabela 3 – Atributos físicos e químicos do solo coletado na camada de 0-20 cm utilizado no experimento antes do plantio do capim Paiaguás em vasos.....	34
Tabela 4 – Biomassa seca de parte aérea em cada corte (BSPA), total (BSPAT), biomassa seca de raiz (BSRA) e biomassa seca residual (BSRE) do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiaguás nos diferentes tratamentos.....	39
Tabela 5 – Acúmulo médio de macronutrientes da biomassa seca radicular (BSRA) no final do cultivo do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiaguás e eficiência de utilização média de nutrientes nos diferentes tratamentos.....	50
Tabela 6 – Acúmulo médio de micronutrientes da biomassa seca radicular (BSRA) no final do cultivo do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiaguás e eficiência de utilização média de nutrientes nos diferentes tratamentos.....	51
Tabela 7 – Acúmulo médio de macronutrientes da biomassa seca da parte aérea (BSPA) no final do cultivo do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiaguás e eficiência de utilização média de nutrientes nos diferentes tratamentos.....	52

Tabela 8 – Acúmulo médio de micronutrientes da biomassa seca da parte aérea (BSPA) no final do cultivo do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiagúas e eficiência de utilização média de nutrientes nos diferentes tratamentos.....	53
Tabela 9 – Acúmulo médio de macronutrientes da biomassa seca residual (BSRE) no final do cultivo do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiagúas e eficiência de utilização média de nutrientes nos diferentes tratamentos.....	54
Tabela 10 – Acúmulo médio de micronutrientes da biomassa seca residual (BSRE) no final do cultivo do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiagúas e eficiência de utilização média de nutrientes nos diferentes tratamentos.....	55
Tabela 11 – Acidez ativa (pH em água), fósforo Mehlich (P), potássio trocável (K), cálcio trocável (Ca), magnésio trocável (Mg), acidez potencial trocável (Al) e total (H+Al), capacidade de troca de cátions potencial (T), saturação por bases (V) e carbono orgânico do solo (COS) do solo nos diferentes tratamentos.ás.....	57
Tabela 12 – Coeficientes de correlação de Pearson entre os teores de fósforo e potássio do solo com a biomassa seca da parte aérea (BSPAT), biomassa seca de raiz (BSRA), biomassa seca residual (BSRE), biomassa seca total da parte aérea (BSPATO), biomassa seca da planta (BST), fósforo e potássio acumulados na biomassa seca da planta.....	59

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	14
2.1	Objetivo Geral	14
2.2	Objetivos Específicos	14
3	REVISÃO DE LITERATURA	15
3.1	Rotas termoquímicas para a conversão de biomassa	15
3.2	Conceito e caracterização do processo de pirólise	16
3.3	Classificação dos tipos de pirólise	17
3.4	Propriedades e conceito do biocarvão	18
3.5	Efeitos do biocarvão nas propriedades do solo e na produção agrícola	21
3.6	Processo de biodigestão anaeróbia	23
3.7	Subprodutos e aproveitamento da biodigestão anaeróbia na produção agrícola	24
4	MATERIAL E MÉTODOS	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
5.1	Crescimento do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiaguás	38
5.1.1	Produção da biomassa seca da parte aérea (20 - 40 cm)	38
5.1.2	Produção da biomassa residual (BSRE) e radicular (BSRA)	46
5.2	Nutrição mineral do capim <i>Urochloa brizantha</i> cv. BRS Paiaguás	48
5.2.1	Acúmulo e eficiência de utilização de nutrientes pela raiz	49
5.2.2	Acúmulo e eficiência de utilização de nutrientes na parte aérea	51
5.2.3	Acúmulo e eficiência de utilização de nutrientes no material residual	53
5.3	Propriedades químicas do solo ao final do cultivo	55
6	CONCLUSÕES	59
7	REFERÊNCIAS	60

1 INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da população mundial e o conseqüente aumento da demanda por alimentos têm colocado forte pressão sobre o setor agropecuário. De acordo com dados da Organização das Nações Unidas (ONU, 2017), estima-se que a população global alcance cerca de 9,8 bilhões de pessoas até 2050, o que exigirá um acréscimo de aproximadamente 70% na produção agrícola. No contexto brasileiro, a pecuária bovina destaca-se como atividade de grande relevância econômica e social, apresentando contínuo crescimento do rebanho. Segundo dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2024), o rebanho bovino atingiu, em 2023, aproximadamente 238,6 milhões de cabeças, o maior valor já registrado na série histórica. Esse aumento na produção pecuária, se por um lado atende a demanda alimentar, resulta na produção de grandes quantidades de esterco animal a cada ano.

A elevada geração de esterco bovino, quando não manejada de forma adequada, pode causar sérios impactos ambientais. O descarte incorreto pode levar à contaminação da água e do ar, além de contribuir para a emissão de gases de efeito estufa. Diante desse cenário, práticas agrícolas sustentáveis ganham destaque, propondo modelos produtivos menos danosos aos recursos naturais e baseados no uso de insumos renováveis. Essas estratégias buscam manter a produtividade ao longo prazo, preservando o ambiente e reduzindo a dependência de fertilizantes minerais.

Apesar dos riscos ambientais, o esterco é um resíduo com alto potencial de reaproveitamento, com nutrientes essenciais (nitrogênio, fósforo, potássio), matéria orgânica, energia e fibras. Quando manejado de forma adequada, deixa de ser um passivo e passa a atuar como um recurso valioso para a fertilização do solo.

Diversos processos vêm sendo estudados e aplicados para valorizar e estabilizar o esterco, incluindo rotas termoquímicas, como a pirólise e a gaseificação, e rotas

bioquímicas, como a digestão anaeróbia (MENG *et al.*, 2022). A pirólise, por exemplo, consiste no aquecimento do resíduo na ausência de oxigênio, convertendo-o em biocarvão, bio-óleo e gases não condensáveis. Já na digestão anaeróbia, ocorre a decomposição da matéria orgânica por microrganismos na ausência de oxigênio, promovendo a geração de biogás e de um efluente com elevado teor de nutrientes, o biofertilizante.

Cabe destacar que diferentes sistemas de manejo geram resíduos com características físico-químicas distintas, o que influencia diretamente nas possibilidades de tratamento e aproveitamento. Em instalações onde ocorre lavagem, o resíduo apresenta-se predominantemente na forma líquida, podendo ser direcionado à biodigestores para a produção de biogás e biofertilizante, este último com aplicação potencial na adubação agrícola. Em sistemas de confinamento, nos quais há elevada geração diária de esterco sólido, a pirólise constitui alternativa viável para a produção de biocarvão, reduzindo o volume do resíduo e conferindo valor agrônômico ao produto. A escolha do método de tratamento deve considerar a minimização dos impactos ambientais e o incremento da produtividade de forma sustentável.

Neste cenário, a hipótese deste trabalho é que a aplicação de biocarvão e biofertilizante derivados de esterco bovino no cultivo do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás, melhore as propriedades do solo e a produção de biomassa, favorecendo o uso mais eficiente dos recursos agrícolas.

A escolha do capim Paiaguás como planta indicadora se justifica por seu rápido crescimento, que permite múltiplos cortes ao longo do ciclo, favorecendo a exportação de nutrientes e a avaliação da eficiência das adubações. O cultivo em vasos com baixo volume de solo ($1,5 \text{ dm}^{-3}$) e reduzida fertilidade natural acentua o esgotamento dos nutrientes disponíveis, tornando mais evidentes os efeitos dos tratamentos testados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

- Avaliar os efeitos de fertilizantes produzidos a partir de dejetos bovinos, combinados com fonte mineral, na produção e nutrição do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás.

2.2 Objetivos Específicos

- Produzir e caracterizar o biocarvão e o biofertilizante obtidos a partir de dejetos bovinos;
- Avaliar os efeitos de diferentes fertilizantes produzidos a partir de dejetos bovinos na produção e nutrição do capim *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás;
- Avaliar os efeitos de diferentes fertilizantes produzidos a partir de dejetos bovinos nas propriedades do solo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Rotas termoquímicas para a conversão de biomassa

A conversão termoquímica utiliza altas temperaturas para transformar a matéria orgânica em intermediários, como gás de síntese, hidrocarbonetos combustíveis e/ou carvão residual (CANTRELL *et al.*, 2007). Esse processo é uma abordagem promissora para a obtenção de produtos energéticos e químicos a partir de fontes renováveis.

Os principais processos térmicos utilizados na conversão da biomassa são a pirólise, a gaseificação e a combustão. A pirólise, em particular, é capaz de gerar uma variedade de produtos na forma de sólidos, líquidos e gases. A gaseificação, por sua vez, concentra-se na produção de gás combustível e outros produtos gasosos, como o gás de síntese. Já a combustão é utilizada principalmente para a geração de calor e energia elétrica (SHARMA *et al.*, 2015).

A pirólise se destaca entre os processos termoquímicos, pois oferece uma gama mais ampla de produtos. Comparada a outros métodos, como a combustão e a gaseificação, a pirólise proporciona uma maior variedade de produtos e é menos poluente. (SHARMA *et al.*, 2015; CHIANG *et al.*, 2012).

As propriedades da biomassa desempenham um papel crucial nos processos de conversão térmica. Fatores como o teor de umidade, poder calorífico, frações de carbono fixo e voláteis, e teor de cinzas são determinantes nesse contexto (MCKENDRY, 2002). Anualmente, a produção de biomassa para energia é estimada em cerca de 1,3 bilhões de toneladas, provenientes da agricultura, indústria e domicílios. Esse número pode aumentar para 2,2 bilhões de toneladas até 2025, criando uma oportunidade significativa para a conversão sustentável desses resíduos em bioprodutos, com aplicações nos setores industrial, comercial, agrícola e energético (CULABA *et al.*, 2023).

Entre as tecnologias disponíveis para o tratamento de dejetos, os processos termoquímicos são uma opção viável. A pirólise e a gaseificação do esterco bovino, por exemplo, produzem carvão e gás de síntese com propriedades similares às obtidas a partir de biomassa lignocelulósica (NESHAT *et al.*, 2017).

3.2 Conceito e caracterização do processo de pirólise

A palavra "pirólise" tem origem grega, sendo uma combinação de "*pýr*", que significa "fogo", e "*lysis*", que quer dizer "fracionamento" ou "quebra". Etimologicamente, pirólise refere-se à "separação por fogo" ou, mais precisamente, ao "fracionamento por calor" (PECHA; GARCIA-PEREZ, 2015).

A pirólise é um processo de degradação térmica da matéria orgânica na ausência de oxigênio, que pode ocorrer em diferentes faixas de temperatura. O processo envolve um conjunto complexo de reações químicas, acompanhado pela transferência de calor e massa (BRIDGWATER, 2012). A composição heterogênea das frações produzidas e suas interações tornam o processo ainda mais complexo. Dessa forma, a pirólise é caracterizada por reações simultâneas e sucessivas que ocorrem na matéria orgânica (PINHEIRO *et al.*, 2001).

Ao garantir um ambiente sem oxigênio, assegura-se que a combustão não ocorrerá durante o aquecimento da biomassa. Dessa forma, o processo envolve basicamente duas reações: pirólise primária e secundária. As reações que atuam diretamente sobre o substrato celulósico são denominadas reações primárias, enquanto aquelas que envolvem a decomposição de produtos intermediários, como vapores orgânicos, são chamadas de reações secundárias (KLOCK *et al.*, 2005). Essas reações ocorrem durante a degradação dos principais componentes da biomassa (hemicelulose, celulose e lignina) e em diferentes faixas de temperatura.

A degradação da hemicelulose ocorre a partir de 220°C, enquanto a celulose começa a se decompor em temperaturas acima de 310°C. A lignina, por sua vez, se decompõe em ampla faixa de temperatura, entre 200°C e 900°C (DOUMER *et al.* 2015). Durante a degradação completa da lignina, são formados alcatrões pesados e alguns hidrocarbonetos. Esse processo é particularmente importante, pois a degradação da lignina contribui com cerca de 50% do carbono fixo presente no material sólido (LUENGO, 2008).

Durante a pirólise primária, ocorre a clivagem e desvolatilização dos principais constituintes da biomassa devido à ação do calor. Esse processo resulta na ruptura de ligações carbono-carbono e na formação de ligações do tipo carbono-oxigênio. Diversos grupos funcionais, como carboxílicos, carbonílicos e hidroxílicos, são formados nessa etapa. Além disso, ocorrem reações como desidratação, descarboxilação e desidrogenação durante a desvolatilização (COLLARD; BLIN, 2014).

A pirólise secundária ocorre quando os compostos voláteis gerados se tornam instáveis sob as condições de temperatura do reator. Nesta fase, mecanismos como craqueamento e a recombinação favorecem a formação de compostos de menor massa molar, como gases H₂, CH₄, CO e CO₂, além da conversão em carvão (VAN DE VELDEN *et al.*, 2010; MORF *et al.*, 2002).

3.3 Classificação dos tipos de pirólise

A pirólise pode ser classificada de acordo com a taxa de aquecimento e o tempo de residência da biomassa no reator. Quanto maior o tempo de residência, maior número de reações secundárias ocorre, convertendo as frações voláteis em gás ou carvão. Os três principais tipos de pirólise são: lenta, rápida e flash (ONAY; KOCKAR, 2003).

Segundo Tripathi *et al.* (2016), a pirólise lenta ocorre em temperaturas entre 400°C e 600°C, utilizando biomassa com granulometria superior a 2 mm e com taxas de aquecimento lentas, inferior a 10°C min⁻¹. A pirólise lenta é particularmente eficiente para a produção de biocarvão de uso agrônômico, pois favorece a formação de material sólido e maximiza o rendimento de carvão. Portanto, a adoção de estratégias que priorizem a pirólise lenta pode aumentar o rendimento de biocarvão (ZHAO *et al.*, 2018).

A pirólise rápida é realizada a temperaturas entre 577°C e 977°C, com o objetivo de produzir líquidos, resultando em um rendimento de biocarvão de apenas 20% em massa. Nesse caso, o tempo de residência é reduzido para poucos segundos (PIRES, 2017). Segundo Zhao *et al.* (2018), a pirólise rápida facilita o armazenamento e transporte dos líquidos, que têm custos menores em comparação com a biomassa sólida.

A pirólise flash ocorre a temperaturas ainda mais elevadas, podendo atingir até 1026°C, com tempos de residência extremamente curtos. O objetivo é maximizar a produção de bio-óleo, limitando o rendimento de biocarvão a apenas 12%, em massa (PIRES, 2017).

Independentemente do tipo de pirólise, o processo resulta na formação de três frações energéticas: biocarvão, bio-óleo e gás de síntese. O bio-óleo é uma fonte de energia importante, com grande potencial para substituir combustíveis fósseis e oferecer benefícios ambientais com neutralidade de carbono. O gás gerado pode ser reaproveitado como fonte de calor para o próprio processo, reduzindo o consumo de energia (ARABIOURRUTIA *et al.*, 2020).

3.4 Propriedades e conceito do biocarvão

O biocarvão é obtido a partir de biomassa homogênea sob condições controladas de temperatura e na ausência ou baixa disponibilidade de oxigênio. Já o carvão vegetal é

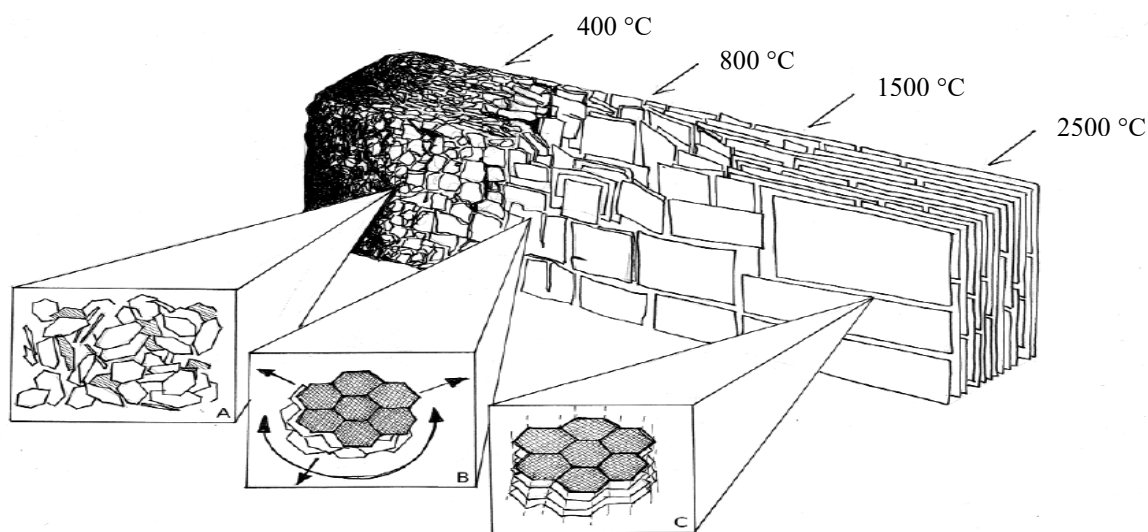
produzido em condições não controladas, com variações de temperatura e oxigênio, e envolve uma maior diversidade de espécies vegetais (SPOKAS, 2010). Segundo Lima (2004), no processo de combustão, a biomassa tem contato direto com a queima, enquanto na pirólise ocorre a desidratação térmica em um ambiente fechado, levando à desintegração dos resíduos.

Diversas biomassas podem ser utilizadas como matéria-prima para a produção de biocarvão, incluindo resíduos agroindustriais, florestais e urbanos (DA SILVEIRA *et al.*, 2020). Formado pela pirólise da matéria orgânica, o biocarvão é um sólido rico em carbono (TRAZZI *et al.*, 2018). Esse carbono pode se assemelhar ao proveniente da carbonização da vegetação, especialmente em termos do alto teor de estruturas aromáticas (HANKE, 2022).

As propriedades físicas do biocarvão variam conforme a matéria-prima e o sistema de pirólise adotado, que pode incluir etapas de pré e pós-processamento. O rearranjo microestrutural e a formação de fissuras durante o processo dependem tanto do material de origem quanto das condições operacionais da pirólise.

Durante a pirólise, o aumento da temperatura de tratamento promove uma maior ordenação dos cristalitos (FIGURA 1). Lua *et al.* (2004) observaram que o aumento da temperatura de 250°C para 500°C resultou em uma maior área de superfície e porosidade dos biocarvões.

Figura 1: Desenvolvimento da estrutura do biocarvão com o aumento da temperatura de tratamento.



Fonte: (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

Diversos parâmetros operacionais influenciam as propriedades físicas do biocarvão, como taxa de aquecimento, a temperatura de tratamento mais alta, pressão e tempo de residência. Pré-tratamentos, como secagem e trituração, e pós-tratamento, como peneiramento, também afetam as características do produto. Entre esses fatores, a temperatura é a mais relevante, pois a liberação de voláteis e a formação dos produtos da pirólise, dependem diretamente dela (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

Um fator significativo no processamento da biomassa no setor agroindustrial é o teor de umidade do esterco, que influencia diretamente no rendimento da pirólise. A secagem é um pré-tratamento essencial para ajustar a umidade do esterco e maximizar a produção de biocarvão, biogás e bio-óleo. O processo de secagem pode ser realizado por métodos renováveis, como a secagem solar, porém o tempo necessário para reduzir a umidade do esterco pode ultrapassar uma semana, dependendo de seu teor inicial (XIN *et al.*, 2018).

3.5 Efeitos do biocarvão nas propriedades do solo e na produção agrícola

Os benefícios do uso de biocarvão em solos são amplamente conhecidos desde a descoberta da Terra Preta na Amazônia, caracterizada por um alto pH, riqueza de nutrientes e uma comunidade microbiana diversa (GUL *et al.*, 2015). Essas áreas escuras de solo sugerem uma origem antrópica, resultante das práticas agrícolas dos povos originários que utilizaram essas áreas para a produção de alimentos (GLASER; BIRK, 2012).

A presença de biocarvão no solo contribui significativamente para a melhoria das suas características físicas, como profundidade, textura, estrutura, porosidade e consistência. Isso se deve a mudanças na área superficial, distribuição do tamanho dos poros e partículas, da densidade e arranjo do solo (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

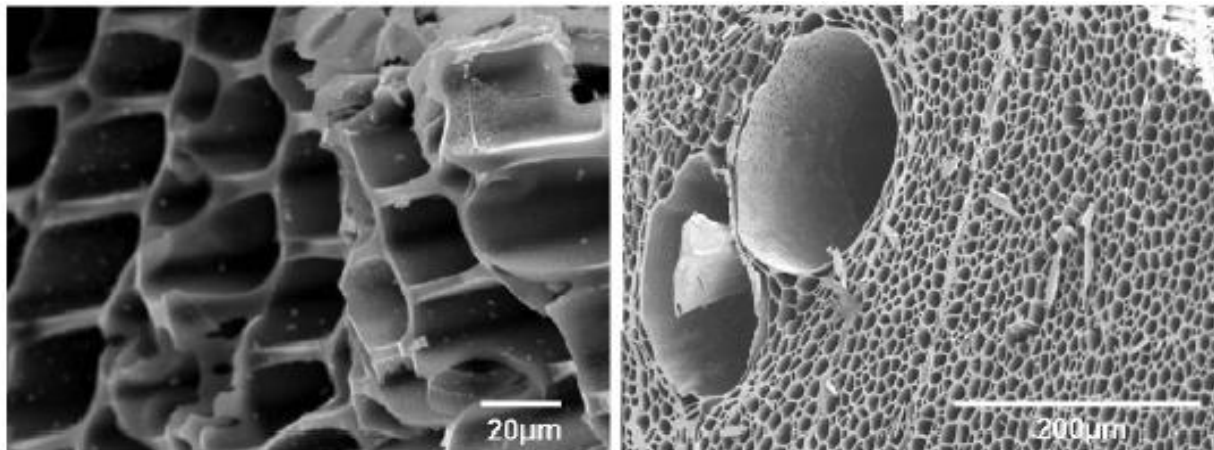
Além disso, o biocarvão pode elevar o pH, a capacidade de troca catiônica (CTC) e o teor de carbono orgânico do solo (GLASER, LEHR, 2019). Com isso, há uma maior retenção de água e nutrientes, além de maior resistência à lixiviação (STRUHS *et al.*, 2020). Os autores Rasul *et al.* (2022) destacam que a persistência do biocarvão no solo o torna adequado como um fertilizante de liberação lenta.

Hossain *et al.* (2021) realizaram a pirólise lenta de diferentes tipos de esterco animal e obtiveram biocarvão com área superficial e porosidade adequadas, apresentando potencial para ser utilizado como corretivo do solo. A pirólise de esterco para a produção de biocarvão é uma alternativa viável, pois o material pode ser facilmente aplicado ao solo, melhorando sua produtividade, fertilidade, sequestro de carbono e filtrando a água percolada do solo e seus poluentes dissolvidos (SHACKLEY *et al.*, 2010). Além disso, os metais pesados presentes no esterco são acumulados no biocarvão durante o processo de pirólise, evitando a contaminação ambiental (YU *et al.*, 2020).

O efeito do biocarvão nas propriedades físicas do solo impacta diretamente o crescimento das plantas, ao influenciar a profundidade de penetração e a disponibilidade de ar e água na zona radicular (LEHMANN; JOSEPH, 2009). Em experimentos, Santos Júnior (2022) observou que o uso de biocarvão de esterco bovino aumentou a fertilidade do solo e contribuiu para o crescimento de *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás, sendo os melhores resultados obtidos com biocarvão peletizado e enriquecido com PK.

A alta estabilidade do biocarvão também oferece abrigo para microrganismos do solo (Figura 2), atuando como sequestrador de carbono e reduzindo as emissões de gases para a atmosfera (VENDRUSCOLO *et al.*, 2018). Além disso, o biocarvão promove a diversidade de microrganismos benéficos ao solo, criando um micro-habitat capaz de neutralizar o ataque de patogênicos (AJEMA, 2018).

Figura 2: Estrutura porosa do biocarvão responsável em atrair a colonização microbiana.



Fonte: (LEHMANN; JOSEPH, 2009).

Assim, o biocarvão se apresenta como uma solução promissora para melhorar as propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, aumentar a produtividade das culturas e contribuir para a mitigação das mudanças climáticas (DIATTA *et al.*, 2020).

3.6 Processo de biodigestão anaeróbia

O tratamento de dejetos animais com sistemas biológicos é amplamente utilizado devido à elevada biodegradabilidade da matéria orgânica (BONTURI; DIJK, 2012). Entre as alternativas recomendadas pelo Plano ABC (Agricultura de Baixo Carbono) destaca-se a biodigestão anaeróbia, que reduz o potencial poluidor dos resíduos, possibilita a produção de biogás e permite o aproveitamento do efluente como biofertilizante.

A biodigestão anaeróbia é um processo bioquímico que ocorre na ausência de oxigênio, sendo aplicada no tratamento e reciclagem de resíduos orgânicos. Durante o processo, microrganismos degradam a matéria orgânica, resultando na produção de biogás e biofertilizante (ADEKUNLE; OKOLIE, 2015). Esse método destaca-se pela eficiência na estabilização e degradação de resíduos sólidos orgânicos, transformando-os em material estabilizado.

O biodigestor, estrutura central do processo, consiste em uma câmara hermeticamente fechada, sem contato com o ar atmosférico, onde ocorre a degradação anaeróbia pela ação de microrganismos e por um gasômetro ou campânula responsável pelo armazenamento do biogás produzido (DOTTO; WOLFF, 2012). Essa tecnologia, utilizada desde a antiguidade, apresenta grande versatilidade, podendo ser aplicada em diferentes escalas de produção, desde pequenas propriedades até empreendimentos de grande porte (COLATTO; LANGER, 2011).

O tempo de retenção hidráulica (TRH) pode variar de 30 a 50 dias, dependendo de fatores como as condições climáticas, especialmente a temperatura, que varia entre regiões, e a temperatura da própria biomassa. Ao final desse período, obtém-se o material já estabilizado (OLIVEIRA, 2004). O processo de biodigestão anaeróbia envolve quatro etapas principais:

- Hidrólise: enzimas extracelulares degradam compostos complexos (carboidratos, proteínas e lipídios) em monômeros (açúcares, aminoácidos e ácidos graxos), que serão absorvidos pelos microrganismos.
- Acidogênese: bactérias fermentativas convertem esses monômeros em ácidos graxos voláteis (AGVs), álcoois, ácido láctico, CO₂, H₂, NH₃ e H₂S.
- Acetogênese: AGVs de cadeia longa são transformados em acetato, H₂ e CO₂.
- Metanogênese: acetato, hidrogênio, carbonatos e metanol são convertidos em metano (CH₄), CO₂.

A eficiência do processo é influenciada por fatores como pH, temperatura, composição e nutrientes da matéria-prima, presença de compostos tóxicos ou inibidores e taxa de carga orgânica.

3.7 Subprodutos e aproveitamento da biodigestão anaeróbia na produção agrícola

O biofertilizante é um dos subprodutos, resultante da fermentação aeróbia e/ou anaeróbia de compostos orgânicos. Sua composição inclui microrganismos ativos, enzimas, minerais e macro e micronutrientes essenciais (CANDIAN *et al.*, 2016). O material digerido (digestato) divide-se em frações líquida e sólida. A fração líquida, rica em nutrientes, pode ser utilizada como fertilizante líquido, devendo ser aplicada de forma controlada para evitar lixiviação e contaminação de águas subterrâneas ou superficiais. O volume de digestato produzido é semelhante ao volume inicial de material inserido no biodigestor, mas com a matéria orgânica já parcialmente degradada.

O biofertilizante contém principalmente nitrogênio amoniacal, altamente volátil, especialmente em solos calcários e de pH alcalino, além de potássio, cálcio, fósforo e magnésio (MENDONÇA *et al.*, 2016). A presença e a disponibilidade desses nutrientes

contribuem para a melhoria da fertilidade e correção do solo, favorecendo a absorção desses compostos pelas plantas e, conseqüentemente, seu desenvolvimento (MUKHUBA *et al.*, 2018).

Segundo Ronga *et al.* (2019), o biofertilizante promove diversos efeitos positivos no solo devido, em razão da presença de microrganismos vivos e de compostos naturais, os quais atuam como estimuladores do crescimento vegetal e restauradores da fertilidade do solo. O uso desse insumo apresenta diversas vantagens ao sistema solo-planta, uma vez que pode aumentar a permeabilidade e a capacidade de retenção de água do solo, favorecer o desenvolvimento radicular e, conseqüentemente, melhorar a absorção de nutrientes pelas plantas (YANG; ANTONIETTI, 2020). Além disso, conforme destacado por Chew *et al.* (2019), a composição do biofertilizante varia conforme a biomassa utilizada no processo de digestão anaeróbia, estando diretamente relacionada a alimentação do animal que originou o resíduo.

Além de fornecer nutrientes, sua função principal, a matéria orgânica presente no biofertilizante atua como agente cimentante entre as partículas do solo, favorecendo a agregação e aumentando a disponibilidade de nutrientes para as plantas (ALENCAR *et al.*, 2015). Esse insumo pode, inclusive, substituir ou complementar a adubação química (SOUSA *et al.*, 2013). No Brasil, a demanda por fertilizantes atingiu cerca de 30 milhões de toneladas em 2015, sendo aproximadamente 65% desse volume proveniente de importações (CRUZ *et al.*, 2017).

Outro subproduto de grande relevância é o biogás, que pode ser utilizado como fonte de energia limpa (elétrica ou térmica) por meio de sua combustão em motogeradores. Quando purificado, esse gás apresenta potencial para substituição do gás natural (VIEIRA; POLLI, 2020). Entre seus componentes, o metano se destaca por ser o principal responsável pelo valor energético do biogás, podendo ser aproveitado para a geração de energia em substituição às fontes convencionais baseadas em

combustíveis fósseis (CHERNICHARO, 2007). Dessa forma, a digestão anaeróbia se destaca como uma alternativa eficiente para o tratamento de dejetos, pois além de mitigar impactos ambientais, contribui para a diversificação e ampliação da matriz energética global.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição geral do experimento

O experimento foi conduzido no Instituto de Ciências Agrárias (ICA) da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), situado no município de Montes Claros-MG, com coordenadas geográficas de latitude 16°51'38"S, longitude 44°55'00"W e altitude de 630 metros. O clima da região é classificado como Aw, de acordo com a classificação de Köppen, caracterizado por temperaturas anuais elevadas, uma estação seca bem definida e chuvas concentradas entre outubro e março.

A pesquisa constituiu de duas etapas distintas. Na primeira etapa, foi realizada a produção e caracterização do biocarvão e do biofertilizante obtidos pelo tratamento de dejetos bovinos. Na segunda etapa, os adubos orgânicos foram aplicados e avaliados quanto à produtividade e nutrição mineral no cultivo de *U. brizantha* cv. BRS Paiaguás.

4.2 Local e coleta da biomassa

A biomassa de esterco bovino, destinada ao tratamento por processo de pirólise e biodigestão anaeróbia, foi obtida na Fazenda Experimental Professor Hamilton de Abreu Navarro do Instituto de Ciências Agrárias da UFMG.

A coleta foi realizada na área pavimentada de alimentação das vacas leiteiras, para garantir a qualidade da biomassa, assegurando a obtenção de um esterco fresco e livre de outros resíduos. Após a raspagem da área, o esterco foi quantificado e caracterizado (TABELA 1). Em seguida, as amostras foram separadas e destinadas para a produção do biocarvão e do biofertilizante.

Tabela 1: Características químicas do esterco bovino, do biofertilizante e do biocarvão.

Característica	Biomassa		
	Esterco Bovino	Biofertilizante*	Biocarvão
N (g kg ⁻¹)	18,60	0,59	6,80
P (g kg ⁻¹)	29,60	0,31	61,21
K (g kg ⁻¹)	17,40	0,35	11,25
Ca (g kg ⁻¹)	25,00	0,27	42,26
Mg (g kg ⁻¹)	6,40	0,14	42,87
S (g kg ⁻¹)	4,30	0,48	1,52
B (mg kg ⁻¹)	13,20	1,24	6,20
Zn (mg kg ⁻¹)	190,00	2,19	348,17
Fe (mg kg ⁻¹)	700,20	31,24	784,45
Mn (mg kg ⁻¹)	150,00	22,68	175,98
Cu (mg kg ⁻¹)	27,00	1,16	42,58

* Para o biofertilizante as unidades de macronutrientes estão expressas em g L⁻¹, enquanto os micronutrientes estão em mg L⁻¹, com exceção do ferro (Fe), que está expresso em g L⁻¹.

4.3 Produção e caracterização do biocarvão – Primeira etapa

A produção de biocarvão foi conduzida no Laboratório de Tratamento de Resíduos do ICA/UFMG. Neste local, o esterco bovino foi moldado em esferas de 4 centímetros de diâmetro, de forma manual, e submetidas ao processo de secagem com temperatura de 65 ± 1 °C, por um período de aproximadamente 48 horas, até alcançarem uma massa constante.

Após a etapa de secagem, as esferas foram transferidas para um forno mufla industrial, onde foram submetidas ao processo de pirólise lenta (NOVOTNY *et al.*, 2015). O reator pirolítico foi aquecido a uma taxa de 4,0 °C min⁻¹, até atingir 450 °C, permanecendo nessa temperatura por 30 minutos, o que caracterizou o tempo de residência da biomassa no reator (FIGURA 3). Posteriormente, o biocarvão foi resfriado dentro da mufla até atingir a temperatura ambiente (TORRES *et al.*, 2020).

Figura 3: Esquema da produção do biocarvão de esterco bovino por pirólise lenta.



As esferas de biocarvão resfriadas foram trituradas em um almofariz de porcelana para reduzir os grânulos à pó. Em seguida, o material foi passado em uma peneira com abertura de malha de 0,25 mm (60 mesh). O biocarvão em pó resultante foi então utilizado nos experimentos subsequentes. A caracterização química do biocarvão (TABELA 1) em relação ao conteúdo de macro e micronutrientes foi conduzida conforme o método descrito por Rajkovich *et al.* (2012).

4.4 Produção e caracterização do biofertilizante – Primeira etapa

O biofertilizante líquido foi produzido, seguindo a metodologia proposta por Santos (1992), a partir da fermentação, em sistema fechado e com ausência de ar (anaeróbio), do esterco bovino fresco diluído.

O esterco foi diluído em água não clorada na proporção de 1 parte de esterco para 3 partes de água. O efluente resultante foi armazenado em um reservatório plástico (bombona) de 200 litros, deixando um espaço vazio de 20 centímetros na parte superior, e mantido hermeticamente fechado por 30 dias. Para liberar o gás metano produzido durante a fermentação, uma mangueira fina foi conectada na parte superior da bombona, com a outra extremidade submersa em um recipiente com água para evitar a entrada de ar (SANTOS, 1992).

Após completar o processo de fermentação anaeróbica, amostras foram coletadas para análises. O efluente passou pelo processo de filtragem e a parte líquida foi utilizada imediatamente no experimento (FIGURA 4). A caracterização do biofertilizante (TABELA 1), incluindo a teor de macro e micronutrientes, foi realizada de acordo com o método estabelecido por Rajkovich *et al.* (2012).

Figura 4: Esquema da produção do biofertilizante de esterco bovino por biodigestão anaeróbica.



4.5 Produção dos fertilizantes granulados e cultivo do capim – Segunda etapa

4.5.1 Produção dos fertilizantes granulados

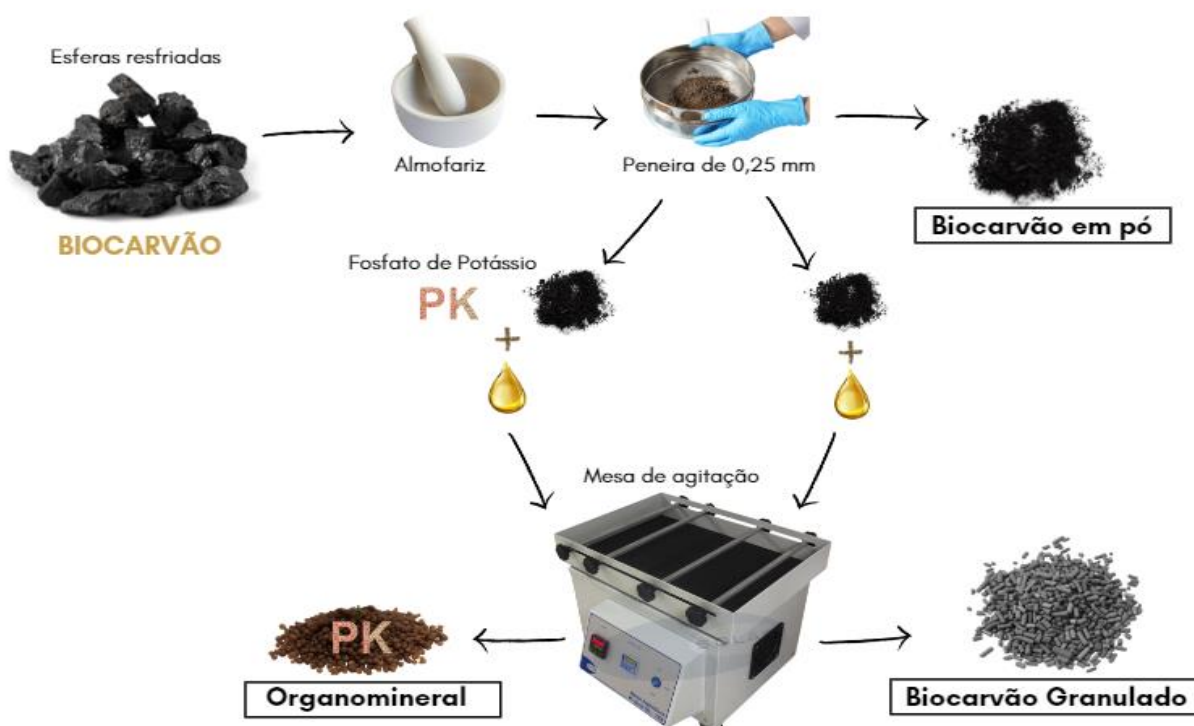
A partir do pó de biocarvão, produzido na primeira etapa da pesquisa, foram confeccionados os fertilizantes granulados, por meio da mistura do biocarvão em pó e bio-óleo em um almofariz até a obtenção de uma consistência pastosa. Em seguida, esse material foi encaminhado para o processo de granulação através de uma mesa de agitação. Esse equipamento proporciona vibrações controladas, permitindo a formação de grânulos uniformes. As vibrações ajudam a compactar e moldar o material em grânulos de tamanhos específicos. Para tanto, em testes de laboratório foram definidas as proporções adequadas dos componentes sólidos, solução líquida, tempo e velocidade de agitação do equipamento.

O fertilizante organomineral foi formulado com base na proporção de fósforo e potássio equivalente a 200 e 250 mg dm⁻³, respectivamente, conforme sugerido por Malavolta (1980), para experimentos em vasos com solo. Considerando a concentração de P no fosfato de potássio (KH₂PO₄), foi aplicado 1,31 g de KH₂PO₄ por vaso. A partir desse valor, estabeleceu-se uma proporção de 4:1 entre a fonte orgânica (biocarvão) e a fonte mineral (PK), correspondendo a 80% de componente orgânico e 20% de mineral. Dessa forma, para a produção do organomineral, foram utilizados 5,24 g de biocarvão e 1,31 g de KH₂PO₄.

O fosfato de potássio (PK – KH₂PO₄) foi moído e misturado com biocarvão em pó e bio-óleo, que atuou como aglutinante para garantir a consistência dos grânulos (SANTOS JÚNIOR *et al.*, 2024). Após a homogeneização, o material pastoso foi encaminhado para a mesa de agitação, conforme descrito anteriormente.

Os grânulos formados foram secos em uma estufa com circulação forçada e renovação de ar monitorada a uma temperatura de 65±1°C durante 7 dias. Esse processo visa obter uma massa constante e eliminar qualquer umidade residual (FIGURA 5).

Figura 5: Esquema da produção dos fertilizantes granulados em mesa de agitação.



No entanto, é importante destacar que foram produzidos dois tipos distintos de fertilizantes na forma granulada. No tratamento organomineral (ORG), o fosfato de potássio (KH_2PO_4) foi incorporado diretamente à mistura com o biocarvão em pó e o bio-óleo, formando grânulos homogêneos com ambos os componentes, o orgânico e o mineral. Já no tratamento denominado biocarvão granulado + PK (BGR + PK), os grânulos foram compostos apenas por biocarvão e bio-óleo, sem adição de fertilizante mineral em sua formulação. Nesse caso, o fosfato de potássio foi aplicado separadamente no solo, de forma isolada. Essa distinção permite avaliar os efeitos da aplicação conjunta e integrada dos nutrientes em um único grânulo (ORG) em comparação à aplicação separada dos componentes (BGR + PK).

4.5.2 Cultivo do capim Paiaguás

Para avaliar os efeitos de fertilizantes produzidos a partir de dejetos bovinos na produção e nutrição do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás, foi conduzido um experimento em casa de vegetação, em vasos com solo. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso, com sete tratamentos e três repetições, totalizando 21 unidades experimentais. Os tratamentos foram: (i) fertilizante organomineral granulado (ORG); (ii) biocarvão em pó + PK (BPO + PK); (iii) biocarvão granulado + PK (BGR + PK); (iv) esterco bovino + PK (EB + PK); (v) biofertilizante líquido + PK (BF + PK); (vi) biocarvão em pó (BPO); e (vii) fosfato de potássio (PK).

As quantidades de biocarvão, do esterco bovino, seco a temperatura ambiente, e do biofertilizante foram calculadas com base em seus teores individuais de fósforo, de modo a garantir a padronização do fornecimento desse nutriente entre os diferentes tratamentos (TABELA 2).

Tabela 2: Descrição dos tratamentos utilizados para o cultivo do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás em vasos preenchidos com 1,5 dm³ de solo.

Tratamentos	Composição	Fósforo fornecido (g/vaso)	
		Fonte orgânica	Fonte mineral
ORG*	6,55 g/vaso de organomineral granulado	0,3	0,3
BPO + PK	5,24 g/vaso biocarvão em pó e 1,31 g/vaso de PK	0,3	0,3
BGR + PK	5,24 g/vaso biocarvão granulado e 1,31 g/vaso de PK	0,3	0,3
EB + PK	10,83 g/vaso de esterco e 1,31 g/vaso de PK	0,3	0,3
BF + PK	1.017,60 mL/vaso de biofertilizante e 1,31 g/vaso de PK	0,3	0,3
BPO	5,24 g/vaso de biocarvão em pó	0,3	0
PK	1,31 g/vaso de PK	0	0,3

* 5,24 g e 1,31 g/vaso de biocarvão e PK no mesmo grânulo.

Os vasos, correspondentes as unidades experimentais, foram preenchidos com 1,5 dm³ de Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, coletado na camada de 0 a 20 cm de profundidade em uma área de Cerrado nativo no município de Montes Claros (MG). Após a coleta, o solo foi peneirado em malha de 4 mm e, em seguida, distribuído nos vasos plásticos. O solo foi caracterizado quanto às suas propriedades físicas e químicas (TABELA 3), de acordo com Teixeira *et al.* (2017).

Tabela 3: Atributos físicos e químicos do solo coletado na camada de 0-20 cm utilizado no experimento. Análise realizada antes do plantio do capim Paiaguás.

Propriedades químicas do solo		
pH em água	5,40	Acidez média*
Fósforo Mehlich 1 (mg dm ⁻³)	1,50	Muito baixo
Fósforo remanescente (mg L ⁻¹)	36,50	-
Potássio (mg dm ⁻³)	12,60	Muito baixo
Cálcio (cmol _c dm ⁻³)	0,31	Muito baixo
Magnésio (cmol _c dm ⁻³)	0,14	Muito baixo
Alumínio (cmol _c dm ⁻³)	0,50	Baixo
H + Al (cmol _c dm ⁻³)	1,55	Baixo
CTC potencial (cmol _c dm ⁻³)	2,03	Baixo
Saturação de bases - V (%)	23,73	Baixo
Carbono orgânico do solo (g kg ⁻¹)	9,80	Baixo
Características físicas do solo		
Areia (g kg ⁻¹)	78,00	
Silte (g kg ⁻¹)	10,00	Franco – arenoso
Argila (g kg ⁻¹)	12,00	

*Intepretação de acordo com Ribeiro *et al.* (1999).

Com base em estudos prévios realizados com esse mesmo solo e a mesma cultivar de capim, verificou-se produção muito baixa na ausência de correção da acidez e adubação (SANTOS JUNIOR *et al.*, 2024). Por esse motivo, foi aplicado carbonato de cálcio e magnésio na proporção de 4:1 (Ca:Mg) para elevar a saturação por bases a 60%. O período de incubação do corretivo foi de 30 dias, mantendo-se a umidade do solo próxima à capacidade de campo durante todo esse período.

As diferentes composições de substratos foram preparadas previamente, conforme os tratamentos, e em seguida foi realizada a semeadura de dez sementes de capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás em cada vaso (FIGURA 6).

Figura 6: Disposição dos vasos e implantação do experimento em casa de vegetação.



Após a semeadura, os vasos foram irrigados com água destilada até atingirem a capacidade de campo. Decorridos 13 dias após a germinação, foi realizado o desbaste, mantendo-se cinco plantas por vaso. As plantas foram cultivadas por um período de 113 dias, o suficiente para a realização de cinco cortes da parte aérea. Os cortes ocorriam, aproximadamente, a cada 18 dias e foram realizados a 20 cm a partir do solo, quando as plantas atingiam uma altura de 40 cm, conforme recomendações de manejo da espécie (DA SILVA, 2004).

Além da adubação de plantio, foi realizada adubação nitrogenada de cobertura, aplicando-se 50 mg dm^{-3} de nitrogênio na forma de ureia após cada corte (MALAVOLTA *et al.*, 1997). Durante todo o experimento, os vasos foram irrigados regularmente com o objetivo de manter a umidade do solo próxima a capacidade de campo.

4.6 Avaliação do experimento

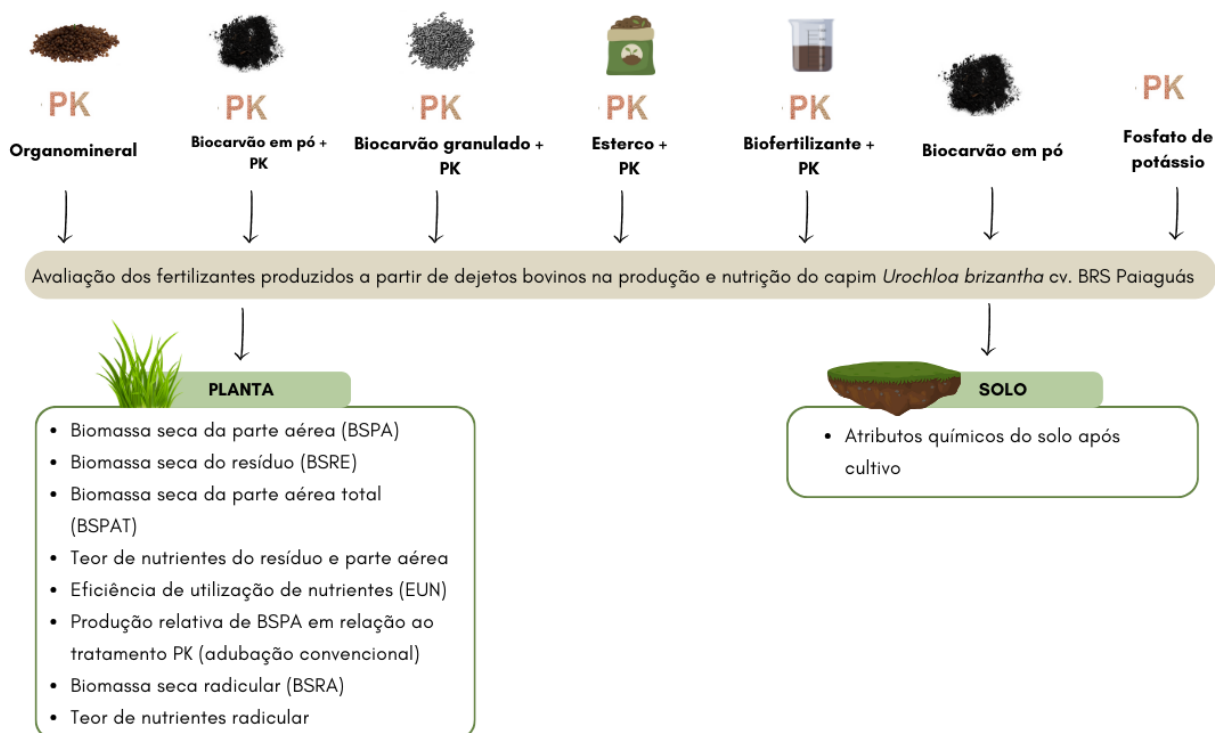
Após cada corte, a parte aérea das plantas eram acondicionadas em sacos de papel e seca em uma estufa de circulação forçada de ar à uma temperatura entre 65-70 °C por aproximadamente 72 horas, até a obtenção de massa constante. Em seguida foram pesadas para a determinação da biomassa seca da parte aérea (BSPA) e moídas para a determinação dos teores de nutrientes, conforme Malavolta *et al.* (1997).

Ao final do período experimental, no quinto corte, foram coletadas separadamente a parte aérea na altura de 20 a 40 cm para a determinação da biomassa seca da parte aérea (BSPA), o material vegetal remanescente na altura de 0 a 20 cm para determinação da biomassa seca do resíduo (BSRE) e as raízes, que após lavadas e secas em estufa, determinou-se a biomassa seca de raízes (BSRA). Tanto para a BSPA do quinto corte quanto da BSRE e BSRA foram determinados os teores de nutrientes, conforme Malavolta *et al.* (1997). A biomassa seca da parte aérea total (BSPAT) foi calculada pela soma BSPA de todos os ciclos de cultivo. Foi ainda calculada a produção relativa de BSPAT em relação ao tratamento PK (referência, adubação convencional). Para o cálculo da produção relativa, dividiu-se a BSPAT de cada tratamento pela BSPAT do tratamento PK e multiplicou por 100. No mesmo dia, correspondente ao último corte das plantas, foram coletadas amostras de solo para análise química, conforme Teixeira *et al.* (2017).

A partir dos dados de biomassa seca e de seus respectivos teores de nutrientes calculou-se as quantidades acumuladas de macronutrientes e micronutrientes na BSPA, BSRE e BSRA. Para a BSPA, BSRA e BSRE foi calculada a eficiência de utilização de nutrientes (EUN), de acordo com a metodologia de Siddiqi e Glass (1981): $EUN = \frac{(biomassa\ seca)^2}{(teor\ de\ nutriente\ na\ biomassa\ seca)}$. A EUN média dos tratamentos foi calculada pela somatória dos valores de EUN de cada nutriente (FIGURA 7).

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste Scott-Knott, ao nível de 5% de probabilidade. A produção relativa de BSPAT de cada tratamento foi comparada com a produção relativa do tratamento PK pelo teste de Dunnett, ao nível de 5% de probabilidade. Foi realizada uma análise de correlação de Pearson entre os teores de fósforo e potássio do solo com as variáveis de crescimento e acúmulo de P e K pelas plantas. O programa estatístico utilizado foi o software R (versão 3.6.3).

Figura 7. Esquema da composição e caracterização dos tratamentos do experimento.



5 RESULTADO E DISCUSSÃO

5.1 Crescimento do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás

5.1.1 Produção da biomassa seca da parte aérea (20 - 40 cm)

A produção de biomassa seca da parte aérea (BSPA) do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás diferiu entre os tratamentos (TABELA 4). Na média dos cinco cortes, as maiores produções de BSPAT foram obtidas nos tratamentos de biocarvão em pó + PK (BPO + PK), esterco bovino + PK (EB + PK) e biofertilizante líquido + PK (BF + PK). A elevação na produção de forragem é fundamental para os sistemas pecuários, pois aumenta a oferta de alimento aos animais, contribuindo para ganhos produtivos e para a sustentabilidade da atividade. Por outro lado, as menores produções médias foram observadas nos tratamentos biocarvão granulado + PK (BGR + PK), biocarvão em pó (BPO) e fosfato de potássio (PK). O tratamento organomineral (ORG) apresentou desempenho intermediário em relação aos demais tratamentos quanto à BSPAT (TABELA 4)

Em relação aos cortes, verificou-se uma maior produção de BSPA no quarto corte, que correspondeu a 28,9% da produção de BSPAT (TABELA 4). A diminuição da produção no quinto corte foi um indicativo para o encerramento do experimento. Resultados semelhantes foram observados por Ribelatto *et al.* (2019), que relataram um aumento na massa seca do capim-marandu até o quarto corte e um declínio no quinto.

Tabela 4: Biomassa seca de parte aérea em cada corte (BSPA), total (BSPAT), biomassa seca da raiz (BSRA) e biomassa seca residual (BSRE) do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás nos diferentes tratamentos.

Tratamento	BSPA					BSPAT	BSRA	BSRE
	1º corte	2º corte	3º corte	4º corte	5º corte			
	----- g/vaso -----							
ORG	0,47 c*	1,78 b	2,23 c	3,89 a	2,32 c	10,72 b	7,58 a	5,95 c
BPO + PK	1,46 a	1,32 c	3,47 a	3,44 b	2,37 c	12,07 a	7,18 b	6,95 b
BGR + PK	0,59 c	1,49 c	1,53 d	2,95 c	2,48 c	9,03 c	4,98 c	5,61 c
EB+ PK	1,30 a	1,87 b	2,99 b	3,34 b	2,84 b	12,34 a	8,07 a	7,78 a
BF + PK	1,06 b	2,26 a	3,06 b	3,11 b	3,26 a	12,75 a	4,96 c	7,41 a
BPO	0,33 c	1,54 c	2,76 b	2,31 d	2,09 c	9,04 c	6,80 b	5,71 c
PK	0,46 c	1,75 b	1,68 d	2,55 d	2,24 c	8,69 c	8,08 a	6,62 b
Média	0,81 (7,6%)**	1,72 (16,1%)	2,53 (23,7%)	3,08 (28,9%)	2,52 (23,7%)	10,66 (100%)	6,81	6,61

*Médias seguidas por uma mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). **Números entre parênteses representa o percentual da média de BSPA dos tratamentos produzida em cada corte em relação a BSPAT.

As maiores produções de biomassa seca das plantas de capim podem ser explicadas pelo fornecimento de nitrogênio e fósforo pelos diferentes tratamentos. Esses resultados certamente estão relacionados à disponibilidade de nitrogênio e fósforo, influenciada pelas fontes e pela dinâmica de liberação dos nutrientes pelas mesmas. Apesar de ao longo dos cultivos tenham sido realizadas adubações nitrogenadas com fertilizante mineral solúvel (ureia), de modo que esse elemento não fosse limitante às plantas, alguns dos tratamentos são também fontes de nitrogênio (TABELA 1). Assim, nos tratamentos com os mesmos teores de fósforo, uma das hipóteses é que o incremento no fornecimento de nitrogênio pelo biocarvão, esterco bovino e biofertilizante podem ter contribuído para o maior crescimento e desenvolvimento das plantas.

Corroborando com a hipótese do incremento de nitrogênio pelos tratamentos, Wasselai *et al.* (2020) verificaram que esse elemento estimula a emissão de perfilhos e folhas, resultando em maior acúmulo de massa de forragem. Considerando os teores de nitrogênio (TABELA 1) e as doses aplicadas de cada fonte, o incremento de N foi de 0,036 g com tratamento com biocarvão, 0,20 g para o esterco bovino e 0,59 g para o biofertilizante em cada vaso cultivado.

Apesar do menor aporte de nitrogênio pelo biocarvão, vários trabalhos demonstram que, além de ser fonte de matéria orgânica, a porosidade presente nas partículas do biocarvão funciona como um habitat favorável aos microrganismos, como para bactérias diazotróficas, responsáveis pela fixação biológica de N_2 (ZHAO *et al.*, 2023). Além disso, de acordo com Abbasi *et al.* (2007), o tamanho das partículas do biocarvão influencia diretamente na taxa de mineralização do N, uma vez que partículas menores aumentam a área de superfície e o contato com microrganismos, favorecendo sua disponibilidade para as plantas. Essa característica pode justificar os maiores teores de biomassa seca da parte aérea total (BSPAT) observados no tratamento com biocarvão em pó + PK, em comparação às formas granuladas. O biocarvão também pode reduzir perdas por lixiviação e volatilização, contribuindo para a estabilização do N no solo, o que é relevante para o aumento da eficiência dos fertilizantes em sistemas agrícolas.

Deve-se considerar ainda que, embora alguns tratamentos apresentem nitrogênio em sua composição, a disponibilidade efetiva desse nutriente para as plantas pode variar em função da labilidade das formas em que o N se encontra. Assim, fontes com maior proporção de compostos orgânicos lábeis tendem a liberar o nutriente de forma mais rápida, enquanto materiais mais recalcitrantes apresentam liberação gradual. Nesse contexto, o esterco bovino, assim como o biofertilizante, são fontes de nutrientes essenciais em formas biodisponíveis, além de compostos que atuam como bioestimulantes do crescimento vegetal (SCHÜLLER *et al.*, 2020).

O uso do esterco bovino promoveu incremento expressivo de N (0,20 g/vaso). Aliado à sua alta taxa de mineralização, essa biomassa favoreceu a absorção de nutrientes pelas plantas e, conseqüentemente, maior produção de BSPAT. O alto teor de nutrientes e a baixa relação C:N:P:S do esterco favorecem sua decomposição e mineralização, aumentando a disponibilidade e liberação de N, P, S para as plantas (BANKOLE; AZEEZ, 2024).

De forma semelhante, o biofertilizante líquido destacou-se pelo maior aporte de N (0,59 g/vaso). A eficiência desse efluente pode ser atribuído à sua constituição física, composta por uma fração líquida e por partículas sólidas em suspensão e de fácil separação. Segundo Maghanaki *et al.* (2013), a dissolução da fração sólida é necessária para a liberação gradual dos nutrientes, enquanto os nutrientes presentes na fração líquida já estão prontamente dissolvidos, permitindo rápida penetração nas raízes das plantas. De forma semelhante, Estavillo *et al.* (1996) relataram alta eficiência de N proveniente de biofertilizante bovino em relação a fontes minerais, atribuindo esse resultado à aplicação diluída, que promove maior aproveitamento ao longo do ciclo da cultura.

Segundo Orrico Júnior *et al.* (2018), os fertilizantes orgânicos ricos em N, representam alternativas de menor custo para produção de pastagens. Eles podem reduzir a dependência de fertilizantes minerais, assegurando a produtividade das pastagens.

Uma outra hipótese a ser considerada para as maiores produções BSPAT é em relação a maior disponibilidade de fósforo atribuída as fontes orgânicas. A presença e, ou o estímulo de microrganismos solubilizadores de fosfatos e os efeitos dos tratamentos na fixação de fósforo pelo solo, juntamente com a maior disponibilidade de N podem ter contribuído para o maior crescimento das plantas.

A fixação de fósforo pelo solo reduz sua disponibilidade às plantas, mas os compostos orgânicos podem minimizar esse processo ao complexar íons de ferro e alumínio presentes na solução do solo e/ou bloquear os sítios de fixação das partículas de argila (ALVES *et al.*, 2021). No biofertilizante e no esterco bovino, o favorecimento dos microrganismos solubilizadores de fosfatos não apenas aumenta a disponibilidade de fósforo, mas também pode estimular o crescimento radicular (ESTAVILLO *et al.*, 1996; ARAÚJO *et al.*, 2007).

Já o biocarvão, pode exercer um efeito adicional sobre a disponibilidade de fósforo em razão da presença de bases e de sílica resultantes da pirólise. As bases presentes nas cinzas elevam o pH do solo, promovem a precipitação de íons ferro e alumínio e aumentam a capacidade de troca catiônica, enquanto a sílica atua bloqueando os sítios de fixação de fósforo nas argilas (TORRES *et al.*, 2020). Além disso, a forma pulverizada do biocarvão aumenta a área de contato com as raízes, favorecendo a liberação e absorção de nutrientes, especialmente do fósforo, cuja disponibilidade é influenciada pelas condições do solo (ABBASI *et al.*, 2007). Esse efeito pode explicar o desempenho do tratamento com biocarvão em pó + PK, que apresentou resposta rápida à adubação, refletida no elevado acúmulo de BSPA já no primeiro corte.

As menores produções nos tratamentos com BPO e PK podem ser atribuídas à menor quantidade de fósforo adicionada, correspondente à metade das doses aplicadas nos demais tratamentos (TABELA 2). Além disso, a baixa disponibilidade de P e K no biocarvão isolado e ausência de compostos orgânicos no fosfato de potássio, podem ter contribuído para as menores produtividades nesses tratamentos. Importante destacar que as quantidades de P e K aplicadas no tratamento PK não foram limitantes ao crescimento das plantas e seguiu as recomendações para adubação de experimentos em vasos com solo (MALAVOLTA *et al.*, 1980). Dessa forma, a combinação do fertilizante mineral PK com fonte orgânica proporcionou benefícios adicionais ao crescimento das plantas.

Corroborando com essa hipótese, de acordo com Simansky *et al.* (2022) a aplicação isolada de biocarvão em solos de baixa fertilidade não favorece o crescimento das plantas, uma vez que apresenta baixos teores de nutrientes e a mineralização pode demorar anos ou até séculos. Desse modo, Rafael *et al.* (2019) recomendam a combinação do biocarvão com fertilizantes minerais, pois essa estratégia aumenta a

disponibilidade dos nutrientes ao longo do tempo, melhora sua eficiência de uso e reduz a necessidade de fertilizantes minerais.

Em relação ao tratamento PK, embora tenha suprido a demanda imediata por fósforo e potássio no primeiro corte, seu uso isolado apresentou a menor produção de BSPAT entre os tratamentos (TABELA 4). Essa limitação pode estar associada à ausência de matéria orgânica que estimula o crescimento das plantas e uma possível acidificação e salinização do solo. Agegnehu *et al.* (2016) destacam que a combinação de fertilizantes orgânicos e minerais, promove uma liberação mais controlada de nutrientes ao longo do ciclo das culturas, favorecendo maiores produtividades.

Entre os fertilizantes na forma granulada, o tratamento ORG apresentou produção intermediária de BSPAT, enquanto o biocarvão granulado associado ao PK (BGR + PK) resultou em baixa produção. Após a aplicação no solo, a água que penetra nos poros do biocarvão dissolve compostos orgânicos e minerais solúveis presentes nas superfícies externa e interna, aumentando a concentração de cátions e ânions na solução do solo (SILBER; LEVKOVITCH; GRABER, 2010). Quando o composto orgânico e mineral está integrado no mesmo grânulo, como no tratamento ORG, a dissolução desses nutrientes pode torná-los gradualmente disponíveis para a planta.

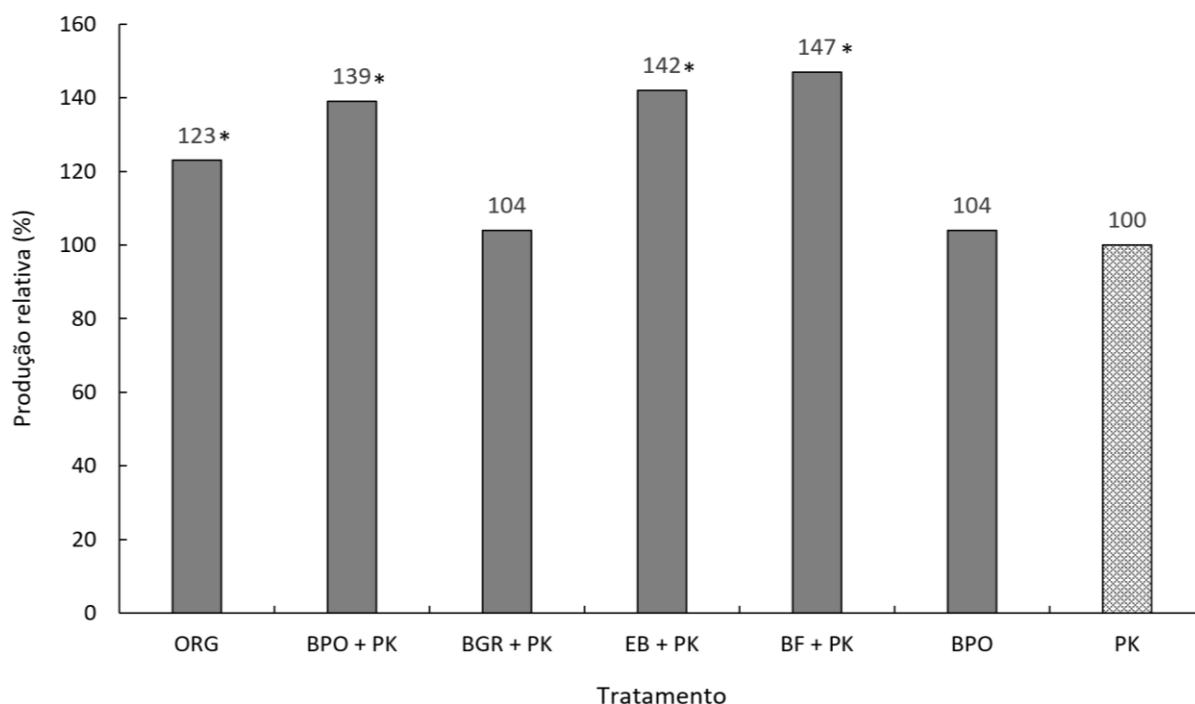
Por outro lado, no tratamento com biocarvão granulado aplicado separadamente ao PK, a interação físico-química entre os insumos pode ser limitada, comprometendo sua eficiência. Quando oxidado, o biocarvão tende a imobilizar nutrientes, atuando mais como receptor do que como fornecedor de nutrientes, devido à elevada retenção promovida pelos sítios reativos presentes em sua estrutura (KAVITHA *et al.*, 2018; JOSEPH *et al.*, 2018). Dessa forma, ao reagir com o PK disponível no solo, sem estar integrado ao grânulo, o biocarvão pode reduzir a disponibilidade desses nutrientes para as plantas.

O desempenho inferior dos tratamentos ORG e BGR + PK em relação ao BPO + PK, pode estar relacionado à liberação mais gradual dos nutrientes (ZHOU *et al.*, 2015; WEN *et al.*, 2017), não atendendo satisfatoriamente as demandas da planta, que possui um crescimento relativamente rápido. Verificou-se ao longo do experimento que, em menos de 20 dias, as plantas já atingiram a altura de corte, evidenciando a elevada demanda por nutrientes.

A característica de liberação lenta de nutrientes, especialmente de nitrogênio, fósforo e potássio, ajuda a manter a fertilidade do solo ao longo do tempo, tornando-se uma tecnologia valiosa para a agricultura sustentável. Considerando cultivos de pastagens de longa duração, a aplicação de fertilizantes de liberação mais lenta pode representar uma vantagem competitiva em relação aos nutrientes prontamente solúveis. Além disso, a granulação apresenta ainda outra vantagem, pois quando aplicados na forma de pó, as partículas, por serem pequenas e de baixa densidade, dificultam o transporte e favorecem a inalação pelos aplicadores, o que representa riscos à saúde (MOHAMMADI, 2021).

As produções de BSPAT nos tratamentos BPO + PK, EB + PK e BF + PK corresponderam a 39, 42 e a 47% da obtida no tratamento PK (tratamento de referência, adubação mineral convencional), ilustrando a superioridade desses tratamentos em relação aos demais (FIGURA 8). De acordo com Freitas *et al.* (2021) a associação entre fertilizantes minerais e orgânicos representa uma estratégia promissora para o fornecimento eficiente de nutrientes e redução da dependência de insumos importados. Da mesma forma, Orrico Júnior *et al.* (2018) apontam que, apesar da necessidade de doses elevadas, os fertilizantes orgânicos promovem liberação lenta de nutrientes, reduzindo perdas por lixiviação e mantendo a produtividade das pastagens.

Figura 8: Produção relativa de biomassa seca da parte aérea em relação ao tratamento PK.



*Médias seguidas por asterisco diferem do tratamento PK pelo teste de Dunnett, $p < 0,05$).

Entretanto, é fundamental ressaltar que a aplicação descontrolada de esterco in natura pode acarretar impactos ambientais negativos. Devido à sua alta taxa de mineralização, esse manejo pode resultar em perdas de carbono e nitrogênio para a atmosfera. Além disso, a rápida liberação de nutrientes no solo potencializa o risco de contaminação de águas superficiais e subterrâneas (FONT-PALMA, 2019). Em contrapartida, o aproveitamento energético do esterco tem sido apontado como uma alternativa mais sustentável, permitindo sua valorização por meio de processos tecnológicos. Nesse sentido, o biofertilizante destaca-se por associar o aproveitamento agrônomico do efluente ao benefício energético, já que a digestão anaeróbia gera biogás, fonte renovável de energia. De forma semelhante, a conversão termoquímica para produção de biocarvão também resulta em subprodutos com potencial de uso agrícola e energético, como o gás pirolítico e o bio-óleo.

5.1.2 Produção da biomassa residual (BSRE) e radicular (BSRA)

Ao final do período experimental, no quinto corte, foi coletado o material residual, ou seja, resíduos de planta na altura de 0 a 20 cm de altura (TABELA 5). Para a biomassa seca residual (BSRE), houve diferenças significativas entre os tratamentos, sendo as maiores produções obtidas nos tratamentos EB + PK e BF + PK (TABELA 5), corroborando com a produção de biomassa da parte aérea total (BSPAT) na altura de 20 a 40 cm de altura (TABELA 4). Segundo Lopes *et al.* (2011), quanto maior a proporção de lâminas foliares remanescentes, menor é a necessidade da planta mobilizar suas reservas orgânicas para retomar seu crescimento.

A produção de biomassa seca radicular (BSRA) avaliada ao final dos cinco cortes foi maior nos tratamentos organomineral (ORG), esterco bovino + PK (EB + PK) e fosfato de potássio (PK). Segundo Thouin *et al.* (2019) e Ippolito *et al.* (2020), o esterco bovino contribui para a estabilização de elementos potencialmente tóxicos no solo, como alumínio, o que pode influenciar indiretamente na absorção de nutrientes pelas raízes. No caso do organomineral, tem-se verificado maior número de raízes finas com a aplicação de biocarvão (ALVES *et al.*, 2021), o que aumenta a absorção de nutrientes, principalmente de fósforo que possui baixa mobilidade no solo. Por outro lado, o tratamento PK isolado, mesmo sem fonte orgânica, apresentou elevada BSRA, sugerindo que, na ausência de formas orgânicas de liberação lenta, a planta aloca mais recursos para o crescimento das raízes em busca de nutrientes.

Apesar do conhecimento consolidado de que a disponibilidade de oxigênio, água, nutrientes e alguns compostos orgânicos estimulam e favorecem o crescimento radicular, a avaliação do sistema de raízes ainda representa um desafio. Essa dificuldade está associada, entre outros fatores, à variação na espessura das raízes e à ocorrência de mortalidade durante o período experimental.

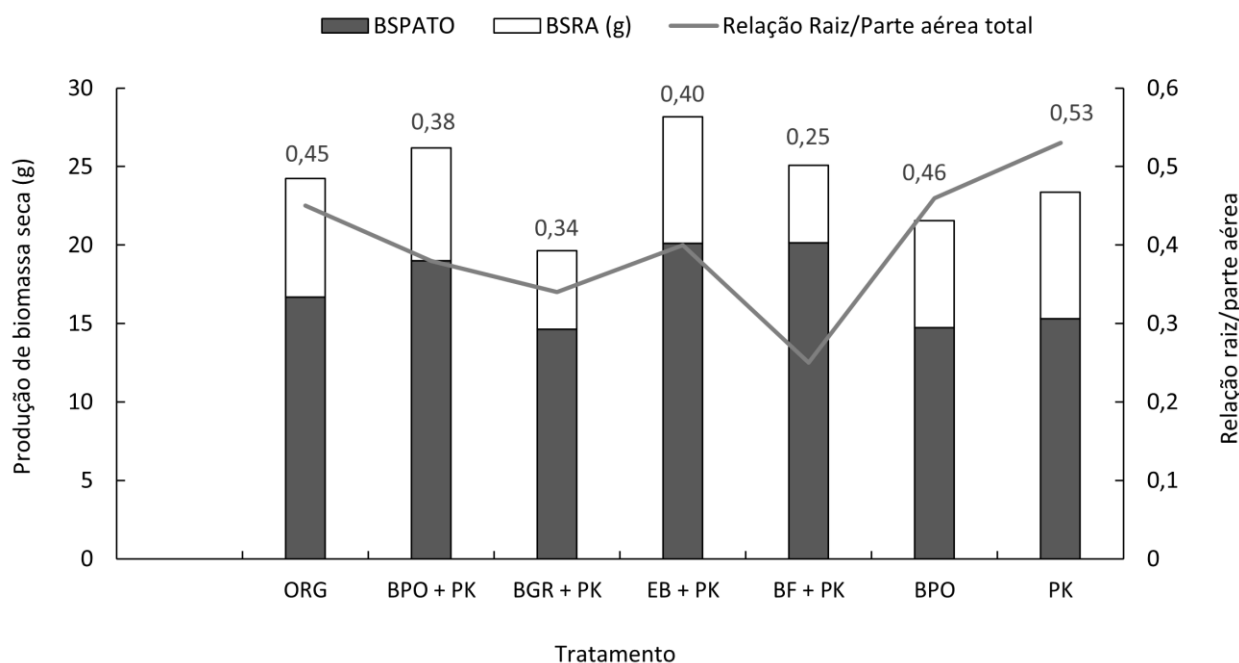
Ademais, a complexidade do sistema radicular decorre da influência simultânea de múltiplos fatores físicos, químicos e biológicos do solo, os quais determinam tanto o crescimento quanto a arquitetura das raízes. Esses fatores também são variáveis no espaço e no tempo, destacando a senescência, a mortalidade e a adaptação as diferentes condições do solo (TERUEL *et al*, 2000). Diante do exposto, as hipóteses para explicar a produção de BSRA são frágeis e difíceis de embasar com resultados da literatura.

Independentemente das dificuldades de avaliar o sistema radicular, é importante destacar que a presença de compostos orgânicos favorece a retenção de água e nutrientes, melhora a estrutura física do solo e estimula a atividade microbiana (AGEGNEHU *et al.*, 2016). Nos tratamentos com fontes orgânicas que resultaram em maiores incrementos na BSPAT, como BF + PK e BPO + PK, é possível inferir que as plantas direcionaram o desenvolvimento radicular de forma mais eficiente, priorizando a absorção de água e nutrientes do solo, em vez do acúmulo de biomassa nas raízes. A relação entre raiz e parte aérea constitui, portanto, um indicador relevante da alocação de biomassa entre os compartimentos radicular e aéreo, refletindo a capacidade da planta de se adaptar às condições ambientais, especialmente à disponibilidade de nutrientes.

A partir da soma da biomassa seca total dos cinco cortes (BSPAT) e da biomassa seca residual (BSRE), calculou-se a biomassa seca total da parte aérea (BSPATO) para estimar a relação com a BSRA (FIGURA 9). Verificou-se que o tratamento BF + PK, que apresentou a menor relação Raiz/Parte aérea, também obteve uma maior BSPAT, indicando um maior favorecimento do crescimento da parte aérea em decorrência da maior disponibilidade de nutrientes. Nessas condições, a planta tende a investir mais no crescimento da parte aérea, maximizando sua capacidade fotossintética, uma vez que a necessidade de expansão do sistema radicular é reduzida. Já o tratamento PK

apresentou a maior relação, sugerindo um maior investimento em crescimento radicular em detrimento da parte aérea, o que é coerente com o alto valor de BSRA observado nesse tratamento.

Figura 9: Relação Raiz/Parte aérea, valores obtidos pela razão entre a biomassa seca radicular (BSRA) e a biomassa seca da parte aérea total (BSPTO).



5.2 Nutrição mineral do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás

Os tratamentos apresentaram diferenças significativas na produção de biomassa da parte aérea, raiz e residual (TABELA 4), mas ao longo do período experimental não foram observados sintomas visuais de deficiência nutricional. Os resultados referentes ao acúmulo de nutrientes foram apresentados e discutidos pelas médias dos cinco cortes do capim, de modo a obter tendências mais claras e robustas ao longo do período experimental, para evitar a influência de variações sazonais, eventos esporádicos e outras flutuações de curto prazo.

5.2.1 Acúmulo e eficiência de utilização de nutrientes pela raiz

O acúmulo de macronutrientes (N, P, K, Ca, Mg e S) na raiz do capim Paiaguás diferiram significativamente entre os tratamentos. A ordem decrescente de acúmulo dos macronutrientes nas raízes, independentemente dos tratamentos foi: $N > K > Ca > Mg > S > P$ (TABELA 5). Segundo Galindo *et al.* (2018), com aumento no acúmulo de nitrogênio, haverá maior desenvolvimento do sistema radicular, favorecendo o acesso das plantas a um maior volume de solo e, conseqüentemente, de nutrientes e água, entre eles o potássio.

De modo geral, os maiores acúmulos de macronutrientes nas raízes foram observados nos tratamentos com fertilizante mineral (PK), aplicado isoladamente ou em combinação com o esterco bovino (EB + PK). Esse resultado está associado à maior produção de biomassa seca radicular (BSRA) e aos teores desses elementos nos tecidos das plantas de capim (TABELA 5).

O organomineral (ORG) também se destacou pelo elevado acúmulo de cálcio e magnésio nas raízes das plantas (TABELA 5). Apesar da granulação e do próprio biocarvão apresentarem uma liberação mais lenta de nutrientes, como discutido anteriormente, a formulação granulada pode favorecer a liberação gradual dos cátions durante o cultivo, mantendo a disponibilidade ao longo do tempo (LUO *et al.*, 2021). Embora o maior acúmulo de nutrientes nem sempre corresponda à maior eficiência de utilização de nutrientes (EUN), verificou-se neste estudo que os tratamentos com maior acúmulo também apresentaram os maiores valores médios de EUN (TABELA 5). Conforme a metodologia adotada, a ordem decrescente da EUN média entre os tratamentos foi: $ORG = PK = EB+PK = BPO+PK = BPO > BGR+PK > BF+PK$.

Tabela 5: Acúmulo médio de macronutrientes da biomassa seca radicular (BSRA) no final do cultivo do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás e eficiência de utilização média de nutrientes nos diferentes tratamentos.

Nutriente	ORG	BPO + PK	BGR + PK	EB+ PK	BF + PK	BPO	PK	Média
	----- mg/planta -----							
N	242,56 b*	239,82 b	178,14 c	273,86 a	171,76 c	243,46 b	268,94 a	231,22
P	9,09 c	10,29 c	8,30 c	14,52 b	10,41 c	12,01 c	17,79 a	11,77
K	159,94 c	180,23 c	163,19 c	255,98 a	143,09 c	213,76 b	265,17 a	197,34
Ca	25,77 a	22,62 b	14,95 c	27,02 a	16,11 c	22,21 b	27,08 a	22,25
Mg	24,27 a	22,62 a	16,28 c	25,54 a	14,37 c	19,72 b	25,06 a	21,12
S	22,74 b	19,39 b	13,12 d	26,35 a	14,04 d	17,00 c	20,21 b	18,98
EUNm	17,48 a	15,22 a	6,95 b	16,70 a	6,43 b	12,99 a	16,75 a	

*Médias seguidas por uma mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

O tratamento PK, além de apresentar expressivos teores de macronutrientes, também se destacou pelos maiores valores de acúmulo de micronutrientes. Por outro lado, de modo geral, os tratamentos BGR + PK e BF + PK resultaram em menores acúmulos (TABELA 6). Essa diferença entre os tratamentos pode estar relacionada à disponibilidade de nutrientes no solo. Segundo Hui, Luo, Katul (2003), em condições de baixa fertilidade, as plantas tendem a alocar maior proporção de biomassa e nutrientes para o sistema radicular, com o objetivo de aumentar a capacidade de absorção. Em contrapartida, sob alta disponibilidade de nutrientes, essa alocação é reduzida, favorecendo o crescimento da parte aérea. Independentemente dos tratamentos, os micronutrientes acumulados em maiores quantidades pelas raízes, em ordem decrescente foi: Fe > Mn > Zn > B > Cu. Em relação a EUN média, a ordem decrescente dos tratamentos foi: EB+PK = ORG = PK > BPO+PK = BPO > BGR+PK = BF+PK (TABELA 6).

Tabela 6: Acúmulo médio de micronutrientes da biomassa seca radicular (BSRA) no final do cultivo do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás e eficiência de utilização média de nutrientes nos diferentes tratamentos.

Nutriente	ORG	BPO+PK	BGR+PK	EB + PK	BF + PK	BPO	PK	Média
----- mg/planta -----								
B	0,062 b*	0,066 b	0,038 d	0,064 b	0,043 c	0,060 b	0,075 a	0,06
Zn	0,158 a	0,139 b	0,117 b	0,185 a	0,119 b	0,140 b	0,171 a	0,15
Fe	8,663 a	9,185 a	4,977 b	9,546 a	5,116 b	8,668 a	9,262 a	7,92
Mn	0,237 a	0,190 b	0,164 c	0,200 b	0,158 c	0,191 b	0,260 a	0,2
Cu	0,046 c	0,062 a	0,037 c	0,056 b	0,043 c	0,053 b	0,068 a	0,05
EUNm	4,23 a	3,25 b	1,69 c	4,61 a	1,52 c	3,03 b	4,01 a	

*Médias seguidas por uma mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

5.2.2 Acúmulo e eficiência de utilização de nutrientes na parte aérea

Os tratamentos diferiram significativamente entre si quanto ao acúmulo de macronutrientes na parte aérea das plantas de capim e não houve um tratamento que se destacasse em relação a todos os macronutrientes analisados (TABELA 7). Os nutrientes acumulados em maiores quantidades na BSPA, independentemente dos tratamentos foram, em ordem decrescente: $K > N > Ca > Mg > P > S$. Resultado semelhante foi encontrado por Maranhão *et al.* (2018), que avaliaram o capim-elefante cv. Roxo, em diferentes idades e épocas de crescimento, também observaram o potássio como o nutriente mais acumulado na parte aérea, seguido do nitrogênio. Esse comportamento está em concordância com Marschner (2011), que destaca o potássio como o principal nutriente em ordem de extração pelas culturas, devido à sua participação na formação e translocação de carboidratos e na absorção de outros nutrientes, entre outras funções.

O tratamento organomineral (ORG) se destacou pelo acúmulo expressivo de fósforo, diferindo significativamente dos demais tratamentos. O fósforo é um dos

nutrientes mais limitantes para a produção vegetal em solos de regiões tropicais e subtropicais (OLIVEIRA *et al.*, 2021), devido à sua elevada afinidade por óxidos de ferro e alumínio, o que resulta em baixa disponibilidade para as plantas (SILVA *et al.*, 2018). A composição do fertilizante organomineral favorece a proteção do fósforo contra a fixação no solo e promove a liberação gradual dos nutrientes. Conforme Chen *et al.* (2019), a recalcitrância e a porosidade da matriz orgânica contribuem para maior estabilidade e controle do fluxo de água, influenciando diretamente a dinâmica de liberação dos nutrientes.

Em relação a EUN média, a ordem decrescente dos tratamentos foi: BF+PK = EB+PK = BPO+PK > BPO = ORG > PK = BGR+PK (TABELA 7). Esses resultados indicam que as combinações de fontes orgânicas com fontes minerais solúveis de P e K proporcionaram uma maior eficiência de utilização de nutrientes. Por outro lado, a granulação comprometeu a liberação de nutrientes durante o período experimental, conforme discutido anteriormente, comprometendo também a EUN.

Tabela 7: Acúmulo médio de macronutrientes da biomassa seca da parte aérea (BSPA) no final do cultivo do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás e eficiência de utilização média de nutrientes nos diferentes tratamentos.

Nutriente	ORG	BPO+ PK	BGR+ PK	EB+ PK	BF + PK	BPO	PK	Média
	----- mg/planta -----							
N	218,51 c*	285,48 a	183,00 d	236,08 b	288,74 a	212,75 c	179,95 d	229,22
P	30,54 a	24,62 c	22,58 d	26,40 b	27,41 b	12,57 f	19,54 e	23,38
K	291,28 c	350,82 b	277,10 d	350,47 b	366,63 a	204,34 f	233,89 e	296,36
Ca	39,65 a	34,76 b	27,09 d	32,32 c	32,63 c	22,24 e	22,15 e	30,12
Mg	35,90 a	29,57 b	29,72 b	30,59 b	30,85 b	22,06 d	24,93 c	29,09
S	17,89 d	18,95 c	16,89 d	20,48 b	23,84 a	14,19 e	15,11 e	18,19
EUNm	30,71 b	47,74 a	22,56 c	49,31 a	50,99 a	30,79 b	23,20 c	

*Médias seguidas por uma mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Em relação aos micronutrientes, o tratamento BF + PK destacou-se com os maiores acúmulos, exceto para o ferro, que foi maior no tratamento EB + PK (TABELA 8). Os

micronutrientes acumulados em maiores quantidades na BSPA, independentemente dos tratamentos foram, em ordem decrescente: Fe > Mn > Zn > B > Cu (TABELA 8). Maranhão *et al.* (2020) também relataram baixa concentração de cobre no capim-elefante, o que sugere comportamento semelhante entre as espécies forrageiras.

Tanto na raiz (TABELA 6) quanto na parte aérea (TABELA 8), o Fe e o Mn foram os micronutrientes acumulados em maiores quantidades na biomassa. Esses resultados podem ser explicados pela maior disponibilidade natural desses elementos no solo. Esses dados são coerentes com os encontrados por Maranhão *et al.* (2020), que observaram a ordem Fe > Mn > Zn > Cu no capim-elefante cv. Roxo, reforçando a semelhança no padrão de absorção de micronutrientes entre diferentes espécies forrageiras. Para a EUN média, verificou-se que a ordem decrescente dos tratamentos foi: BPO+PK > EB+PK > BF+PK = ORG > BPO = PK = BGR+PK (TABELA 8).

Tabela 8: Acúmulo médio de micronutrientes da biomassa seca da parte aérea (BSPA) no final do cultivo do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás e eficiência de utilização média de nutrientes nos diferentes tratamentos.

Nutriente	ORG	BPO+PK	BGR+PK	EB+ PK	BF + PK	BPO	PK	Média
	----- mg/planta -----							
B	0,088 b*	0,070 d	0,086 b	0,077 c	0,113 a	0,068 d	0,073 c	0,08
Zn	0,150 b	0,141 c	0,107 d	0,140 c	0,249 a	0,112 d	0,097 e	0,14
Fe	1,706 c	1,812 b	1,369 d	2,341 a	1,893 b	1,239 e	1,263 e	1,66
Mn	0,236 b	0,160 e	0,180 d	0,195 c	0,382 a	0,119 f	0,177 d	0,21
Cu	0,035 c	0,031 d	0,033 c	0,041 b	0,052 a	0,027 e	0,025 f	0,03
EUNm	12,72 c	21,32 a	8,46 d	18,82 b	14,57 c	10,30 d	9,29 d	

*Médias seguidas por uma mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

5.2.3 Acúmulo e eficiência de utilização de nutrientes no material residual

O acúmulo de macronutrientes no material residual do capim Paiaguás (0–20 cm) apresentou diferenças significativas entre os tratamentos, destacando-se o esterco

bovino + PK, que promoveu os maiores valores para todos os elementos avaliados. A ordem decrescente de acúmulo dos macronutrientes, independentemente dos tratamentos, foi: K > N > Ca > Mg > S > P (TABELA 9). Essa sequência está condizente à encontrada na parte aérea na porção de 20-40 cm. Em relação à eficiência de uso de nutrientes (EUN) média, a sequência decrescente dos tratamentos foi: EB + PK = BF + PK > BPO + PK > PK > ORG = BPO. De modo geral, os maiores valores de EUN ocorreram nos mesmos tratamentos que apresentaram superior produção de biomassa seca da parte aérea total (BSPAT) e do material residual (BSRE), indicando melhor equilíbrio nos processos de absorção, translocação e redistribuição de nutrientes entre os compartimentos da planta.

Tabela 9: Acúmulo médio de macronutrientes da biomassa seca residual (BSRE) no final do cultivo do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiagúas e eficiência de utilização média de nutrientes nos diferentes tratamentos.

Nutriente	ORG	BPO + PK	BGR + PK	EB+ PK	BF + PK	BPO	PK	Média
	----- mg/planta -----							
N	90,23 c	104,64 b	85,87 c	114,85 a	113,06 a	83,34 c	100,92 b	98,99
P	12,69 c	14,58 b	11,78 c	18,15 a	15,55 b	12,36 c	14,76 b	14,27
K	111,65 c	130,11 b	101,03 d	144,67 a	138,23 a	101,80 d	121,85 b	121,34
Ca	22,41 d	25,69 b	21,51 d	27,48 a	28,14 a	21,12 d	24,01 c	24,34
Mg	17,65 d	21,29 b	15,52 e	24,50 a	21,96 b	15,41 e	19,61 c	19,42
S	16,26 c	19,44 b	15,15 c	22,55 a	20,24 b	15,60 c	18,73 b	18,29
EUNm	9,20 d	12,46 b	8,35 d	15,08 a	14,29 a	8,68 d	11,18 c	

*Médias seguidas por uma mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

Em relação aos micronutrientes, o tratamento com esterco bovino + PK (EB + PK) destacou-se com os maiores acúmulos médios de B, Zn, Fe, Mn e Cu na biomassa seca residual (TABELA 10). Independentemente dos tratamentos, a ordem decrescente de acúmulo total dos micronutrientes foi Fe > Mn > Zn > B > Cu. Quanto à eficiência de utilização de nutrientes (EUNm), verificou-se que a ordem decrescente dos tratamentos foi: BF + PK > EB + PK = BPO + PK > PK = ORG = BPO (TABELA 10). Essa resposta

positiva reforça a importância do uso combinado de fontes orgânicas e minerais na adubação do capim Paiaguás, conforme discutido anteriormente com base nos resultados de produção de biomassa e nutrição do capim, promovendo melhor eficiência fisiológica, equilíbrio nutricional e sustentabilidade do sistema produtivo.

Tabela 10: Acúmulo médio de micronutrientes da biomassa seca residual (BSRE) no final do cultivo do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás e eficiência de utilização média de nutrientes nos diferentes tratamentos.

Nutriente	ORG	BPO+PK	BGR+PK	EB + PK	BF + PK	BPO	PK	Média
----- mg/planta -----								
B	0,055 c	0,062 b	0,050 d	0,073 a	0,064 b	0,044 e	0,057 c	0,058
Zn	0,087 d	0,101 b	0,081 d	0,121 a	0,106 b	0,086 d	0,095 c	0,097
Fe	1,128 c	1,333 b	1,061 d	1,488 a	1,362 b	1,008 d	1,202 c	1,226
Mn	0,136 c	0,152 b	0,121 d	0,177 a	0,161 b	0,119 d	0,149 b	0,145
Cu	0,016 c	0,017 c	0,014 d	0,023 a	0,016 c	0,014 d	0,019 b	0,018
EUNm	4,15 c	5,98 b	3,98 c	6,69 b	7,47 a	4,14 c	5,00 c	

*Médias seguidas por uma mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$).

5.3 Propriedades químicas do solo ao final do cultivo

De acordo com os resultados das análises químicas do solo após o período experimental, verificou-se que houve diferenças significativas entre os tratamentos para o fósforo e potássio disponíveis e magnésio trocável (TABELA 11). Para as demais propriedades químicas analisadas não houve diferenças significativas entre os tratamentos. A ausência de diferenças significativas entre os tratamentos para as propriedades relacionadas à acidez, à saturação por bases e aos teores de cálcio pode ser atribuída à aplicação de calcário em todos os tratamentos. Dessa forma, as condições químicas do solo associadas à acidez mantiveram-se adequadas ao cultivo do capim Paiaguás, conforme os parâmetros estabelecidos por Ribeiro *et al.* (1999).

Em relação ao carbono orgânico (COS), embora tenha se adicionado compostos orgânicos ao solo, exceto no tratamento PK, não houve diferenças significativas e os teores foram classificados como muito baixos (TABELA 11), sendo numericamente a metade do observado no solo antes do cultivo (TABELA 3). O teor inicial de COS do solo utilizado no experimento era de $0,98 \text{ dag kg}^{-1}$. Contudo, ao final do ciclo de cultivo do capim Paiaguás, observou-se uma redução significativa nos teores de COS em todos os tratamentos (TABELA 11), com valores variando de $0,42$ a $0,56 \text{ dag kg}^{-1}$. A hipótese para a ausência de efeito dos tratamentos, bem como para a redução observada nos valores de carbono orgânico do solo (COS) durante o período experimental, envolve o efeito priming positivo e possíveis interações planta–microrganismos. O efeito priming positivo refere-se ao favorecimento da mineralização do COS em resposta à adição de compostos orgânicos ao solo (KUZYAKOV *et al.*, 2000). Segundo essa hipótese, embora a adição desses compostos favoreça a mineralização do COS original do solo, ela não foi suficiente para incrementar os teores de carbono, mesmo quando se utilizou biocarvão, que apresenta formas mais estáveis de carbono. Zhang *et al.* (2023), ao conduzirem um experimento de incubação de solo por 80 dias com a adição de nitrogênio, fósforo e biocarvão, observaram um aumento significativo na taxa de mineralização do carbono orgânico do solo (COS) nos tratamentos que receberam N e P, caracterizando um efeito de priming positivo. Esses resultados corroboram achados de outros autores (VEGA *et al.*, 2025), indicando que, para aumentar significativamente os teores de carbono do solo, são necessárias doses elevadas de biocarvão.

Em relação às interações planta–microrganismos, a elevada demanda por nutrientes pelas plantas ao longo do período experimental pode ter estimulado a mineralização dos compostos orgânicos presentes no solo, favorecida pelas condições adequadas de umidade e temperatura. A atividade radicular intensa e a liberação de exsudatos pelas plantas promovem a multiplicação de microrganismos e aceleram a

degradação dos resíduos orgânicos (LOSS *et al.*, 2011). Outro aspecto relevante foi a ausência de cobertura permanente do solo e a realização de múltiplos cortes do capim durante o período experimental, que diferentemente de cultivos a campo, compromete o aporte de material vegetal à superfície do solo.

Tabela 11: Acidez ativa (pH em água), fósforo Mehlich (P), potássio trocável (K), cálcio trocável (Ca), magnésio trocável (Mg), acidez potencial trocável (Al) e total (H+Al), capacidade de troca de cátions potencial (T), saturação por bases (V) e carbono orgânico do solo (COS) do solo nos diferentes tratamentos.

	ORG	BPO + PK	BGR + PK	EB+ PK	BF + PK	BPO	PK
pH	6,7 a* AF**	6,5 a AF	6,8 a AF	6,4 a AF	6,8 a AF	6,6 a AF	6,7 a AF
P (mg dm ⁻³)	52,80 b MA	27,10 c A	32,53 c A	22,45 c A	70,45 a MA	9,46 d MB	21,73 c B
K (mg dm ⁻³)	25,95 b B	20,53 c B	19,23 c B	17,30 c B	32,75 a B	12,50 d B	18,25 c B
Ca (cmol _c dm ⁻³)	2,52 a A	2,28 a A	2,47 a A	2,43 a A	2,16 a A	2,35 a A	2,37 a A
Mg (cmol _c dm ⁻³)	0,45 a B	0,49 a B	0,31 b B	0,43 a B	0,42 a B	0,31 b B	0,35 b B
Al (cmol _c dm ⁻³)	0	0	0	0	0	0	0
H+Al	0,74 a MB	0,74 a MB	0,73 a MB	0,77 a MB	0,77 a MB	0,79 a MB	0,78 a MB
T (cmol _c dm ⁻³)	3,77 a	3,63 a	3,57 a	3,83 a	3,48 a	3,50 a	3,56 a
V (%)	80,19 a A	75,86 a A	79,34 a A	76,34 a A	77,56 a A	77,26 a A	77,83 a A
COS (g kg ⁻¹)	0,43 a B	0,43 a B	0,46 a B	0,46 a B	0,56 a B	0,49 a B	0,42 a B

*Médias seguidas por mesma letra minúsculas nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott ($p < 0,05$). **Letras maiúscula referem-se à interpretação dos resultados de acordo com Ribeiro *et al.* (1999): AF, acidez fraca; MB, muito baixo; B, baixo; A, alto e; MA, muito alto.

De acordo com as análises de caracterização (TABELA 3), o solo, um Latossolo Vermelho–Amarelo sob vegetação de Cerrado, apresentava acidez média e disponibilidade de nutrientes muito baixa. Nas análises realizadas após a calagem, aplicação dos tratamentos e o cultivo das plantas, observou-se uma melhora significativa nas propriedades relacionada à fertilidade do solo (TABELA 11). A melhoria das propriedades relacionadas a acidez do solo, como comentada anteriormente, é justificada pela calagem, enquanto a elevação dos teores de fósforo (P) e potássio (K) pode ser atribuída à aplicação dos tratamentos.

Os maiores teores de fósforo e potássio foram observados no tratamento BF + PK, (TABELA 11). Esses resultados evidenciam o efeito do biofertilizante como fonte de

nutrientes e sugerem um possível efeito na redução das reações de fixação de fósforo, mediado pelos compostos orgânicos adicionados ou produzidos durante o processo de mineralização. Além disso, os maiores teores de P e K no solo corroboram com a maior produção de BSPAT observados no tratamento BF + PK (TABELA 4).

Os teores de fósforo e potássio do solo foram correlacionados com a produção de biomassa seca da parte aérea total na altura de 20 a 40 cm (BSPAT), a biomassa seca de raiz (BSRA), biomassa seca residual na altura de 0 a 20 cm (BSRE), biomassa seca total com a residual (BSPATO) e a biomassa seca da planta (parte aérea total-BSPATO e raízes - BST) (TABELA 12). Apesar de correlações significativas, os valores dos coeficientes de correlação de Pearson foram relativamente baixos. Os teores de P e K correlacionaram-se negativamente com a BSRA, enquanto que para as demais variáveis de crescimento, as correlações foram positivas. Para as quantidades acumuladas de P e K, verificou-se que apenas o teor de P do solo correlacionou-se positivamente com o P acumulado pelas plantas (TABELA 12). Importante destacar que durante o experimento as plantas alteram diferentemente as propriedades do solo. Por exemplo, onde ocorreu maior produção, ocorreu também uma maior retirada de nutrientes do solo.

Tabela 12: Coeficientes de correlação de Pearson entre os teores de fósforo e potássio do solo com a biomassa seca da parte aérea (BSPAT), biomassa seca de raiz (BSRA), biomassa seca residual (BSRE), biomassa seca total da parte aérea (BSPATO), biomassa seca da planta (BST), fósforo e potássio acumulados na biomassa seca da planta.

	BSRA	BSPAT	BSRE	BSPATO	BST	P acumulado	K acumulado
P solo	-0,49*	0,52*	0,23*	0,45*	0,16	0,40*	0,07
K solo	-0,44*	0,58*	0,32*	0,52*	0,25*	0,47*	0,17

*Significativos a 5% pelo teste t.

6 CONCLUSÕES

- As fontes orgânicas, esterco, biocarvão e biofertilizante contribuíram para o aumento da produção de biomassa do capim *Urochloa brizantha* cv. BRS Paiaguás, quando associadas a fonte mineral de fósforo e potássio.
- As fontes isoladas, orgânica (biocarvão em pó) e mineral (fosfato de potássio) apresentaram baixa produção de biomassa e menor acúmulo de nutrientes nas plantas.
- A aplicação conjunta de biofertilizante e fertilizante mineral fonte de PK proporcionaram maior produção de biomassa e acúmulo de nutrientes.
- O fertilizante organomineral granulado a base de biocarvão e fosfato de potássio foi considerado de liberação lenta, proporcionando menor produção de biomassa que o das mesmas fontes sem granulação.
- O tratamento com biofertilizante associado com PK apresentou maior incremento nos teores de fósforo e potássio no solo.

7 REFERÊNCIAS

ABBASI, M. K. *et al.* Mineralization of three organic manures used as nitrogen source in a soil incubated under laboratory conditions. **Communications in soil science and plant analysis**, v. 38, n. 13-14, p. 1691-1711, 2007.

ADEKUNLE, K. F; OKOLIE, J.A. A review of biochemical process of anaerobic digestion. **Advances in Bioscience and Biotechnology**, v. 6, n. 03, p. 205, 2015.

AGEGNEHU, G.; BASS, A. M.; NELSON, P. N.; BIRD, M. I. Benefits of biochar, compost and biochar–compost for soil quality, maize yield and greenhouse gas emissions in a tropical agricultural soil. **Science of the Total Environment**, v.543, p. 295–306, 2016.

AJEMA, L. Effects of biochar application on beneficial soil organism review. international journal of research studies in science, **Engineering And Technology**, v. 5, n. 5, p. 9-18, 2018.

ALENCAR, T. L. de. *et al.* Atributos físicos de um Cambissolo cultivado e tratado com biofertilizante na Chapada do Apodi, Ceará. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 3, 2015.

ALVES, B. S. Q. *et al.* Effect of sewage sludge and sugarcane bagasse biochar on soil properties and sugar beet production. **Pedosphere**, v. 31, n. 4, p. 572-582, 2021.

ARABIOURRUTIA, M.; LOPEZ, G.; ARTETXE, M.; ALVAREZ, J.; BILBAO, J.; OLAZAR, M. Waste tyre valorization by catalytic pyrolysis – a review. **Renewable Sustainable Energy**, v. 129, p. 109932, 2020.

ARAÚJO, E. N. *et al.* Produção do pimentão adubado com esterco bovino e biofertilizante. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 5, p. 466-470, 2007.

BANKOLE, G. O.; AZEEZ, J. O. Nitrogen, phosphorus and sulphur mineralization kinetic as affected by biochar, manure and ash amendments—An incubation study. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 17, n. 3, p. 101, 2024.

BONTURI, G. L.; DIJK, M. V. Instalação de biodigestores em pequenas propriedades rurais: análise de vantagens socioambientais. **Revista Ciências do Ambiente**, v. 8, n. 2, p. 88-95, 2012.

BRIDGWATER, A. V. Review of Fast Pyrolysis of Biomass and Product Upgrading. **Biomass and Bioenergy**, v. 38, p. 68-94, 2012.

CANDIAN, S. J.; FERREIRA, P. R.; MARTINS, C. R.; LORENZETTI, R. E.; BASTIANI, R. L. M. Biofertilizantes na produção e na caracterização das alfases americanas, cresspa e mimosa. **Vertices**, v.18, n. 1, p. 233-244, 2016.

CANTRELL, K.; RO, K.; MAHAJAN, D.; ANJOM, M.; HUNT, P.G. Role of thermochemical conversion in livestock waste-to-energy treatments: Obstacles and opportunities. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, v. 46, n. 26, p. 8918-8927, 2007.

CHEN, W.; MENG, J.; HAN, X.; LAN, Y.; ZHANG, W. Past, present, and future of biochar. **Biochar**, v. 1, p. 75-87, 2019.

CHERNICHARO, C. A. L. Reatores anaeróbios – Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. v.5. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

CHEW, K. W.; CHIA, S. R.; YEN, H. W.; NOMANBHAY, S.; HO, Y. C.; SHOW, P. L. Transformation of Biomass Waste into Sustainable Organic Fertilizers. *Sustainability*, v. 11, n. 8, p. 2266, 2019.

CHIANG, K-Y.; CHIEN, K-L.; LU, C-H. Characterization and comparison of biomass produced from various sources: Suggestions for selection of pretreatment technologies in biomass-to-energy. **Applied Energy**, v. 100, p. 164-171, 2012.

COLATTO, L.; LANGER, M. Biodigestor - resíduo sólido pecuário para produção de energia. **Unoesc & Ciência-ACET**, v. 2, n. 2, p. 119-128, 2011.

COLLARD, F. X.; BLIN, J. A Review on pyrolysis of biomass constituents: mechanisms and composition of the products obtained from the conversion of cellulose, hemicelluloses and lignin. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 38, p. 594–608, 2014.

CRUZ, A.C.; PEREIRA, F.S.; FIGUEIREDO, V.S. Fertilizantes Organominerais de Resíduos do Agronegócio: avaliação do potencial econômico brasileiro. **Indústria Química**, p.137-187, 2017. (BNDES Setorial, n. 45).

CULABA, A.B.; MAYOL, A.P.; SAN JUAN, J.L.G.; UBANDO, A.T.; BANDALA, A.A.; CONCEPCION, R.S.; ALIPIO, M.; CHEN, W.H.; SHOW, P.L.; CHANG, J.S. Design of biorefineries towards carbon neutrality: A critical review. **Bioresour. Technol.** v. 369, p. 128256, 2023.

DA SILVA, S. C. Fundamentos para o manejo do pastejo de plantas forrageiras dos gêneros *Brachiaria* e *Panicum*. **Simpósio sobre manejo estratégico da pastagem**, v. 2, p. 347-385, 2004.

DA SILVEIRA, J. H. *et al.* Characterization of residual biomass from the harvest of *Eucalyptus saligna* for thermal conversion processes. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental (REGET)**, v. 24, n. 13, p. 24, 2020.

DIATTA, A. A.; FIKE, J. H.; BATTAGLIA, M. L.; GALBRAITH, J. M.; BAIG, M. B. Effects of biochar on soil fertility and crop productivity in arid regions: A review. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 13, n. 14, p. 1-17, 2020.

DOTTO, R. B.; WOLFF, D. B. Biodigestão e produção de biogás utilizando dejetos bovinos. **Disciplinarum Scientia | Naturais e Tecnológicas**, v. 13, n. 1, p. 13-26, 2012.

DOUMER, M. E. *et al.* Slow pyrolysis of different Brazilian waste biomasses as sources of soil conditioners and energy, and for environmental protection. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 113, p. 434-443, 2015.

ESTAVILLO, J. M.; GONZALES-MURUA, C.; BESGA, G.; RODRIGUES, M. Effect of cow slurry N on herbage productivity, efficiency of N utilization and on white clover content in a natural sward in the Basque Country Spain. **Grass and Forage Science**, v. 51, n. 1, p. 1-7, 1996.

FONT-PALMA, C. Methods for the treatment of cattle manure- A review. **C-Journal of Carbon Research**, v.5, n. 2, p. 27, 2019.

FREITAS, J. M. DE.; VAZ, M. C.; DUTRA, G. A.; SOUZA, J. L. DE.; REZENDE, C. F. A. Resposta da produtividade do milho à adubação mineral e organomineral. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 5, p. 26810514301, 2021.

GALINDO, F. S. *et al.* Acúmulo de matéria seca e nutrientes no capim-mombaça em função do manejo da adubação nitrogenada. **Revista de Agricultura Neotropical**, v. 5, n. 3, p. 1-9, 2018.

GLASER, B.; BIRK, J. J. State of the scientific knowledge on properties and genesis of anthropogenic dark earths in central amazonia (terra preta de índio). **Geochimica et Cosmochimica Acta**, v. 82, p. 39-51, 2012.

GLASER, B.; LEHR, V. I. Biochar effects on phosphorus availability in agricultural soils: A meta-analysis. **Scientific Reports**, v. 9, n. 9338, 2019.

GUL, S.; WHALEN, J. K.; THOMAS, B. W.; SACHDEVA, V.; DENG, H. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: Mechanisms and future directions. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 206, p. 46-59, 2015.

HANKE, D.; DA SILVA NASCIMENTO, S. G.; DICK, D. P.; DE ÁVILA, M. R.; PILLON, C. N. Produção e caracterização de biocarvão a partir de diferentes fontes de biomassa vegetal: aproveitamento de resíduos arbóreos e agrícolas sem destinação apropriada. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 10, n. 2, 2022.

HOSSAIN, M.Z.; BAHAR, M.M.; SARKAR, B.; DONNE, S.W.; WADE, P.; BOLAN, N. Assessment of the fertilizer potential of biochars produced from slow pyrolysis of biosolid and animal manures. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 155, p. 105043, 2021.

HUI D.; LUO Y.; KATUL G. Partitioning interannual variability in net ecosystem exchange into climatic variability and functional change. **Tree Physiology**, v.23, p.433–442, 2003.

IBGE, Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM), do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2024.

IPPOLITO, J. A. *et al.* Feedstock choice, pyrolysis temperature and type influence biochar characteristics: a comprehensive meta-data analysis review. **Biochar**, v. 2, n. 4, p. 421-438, 2020.

KAVITHA, B. *et al.* Benefits and limitations of biochar amendment in agricultural soils: A review. **Journal of environmental management**, v. 227, p. 146-154, 2018.

KLOCK, U.; MUÑIZ, G.I.B.; HERNADEZ, J.A.; ANDRADE, A.S. **Química da Madeira**. 3ª Ed. Revisada, Universidade Federal do Paraná, 2005.

KUZYAKOV, Y; FRIEDEL, J. K; STAHR, K. Review of mechanisms and quantification of priming effects. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 32, p. 1485–1498, 2000.

JOSEPH, S. *et al.* Microstructural and associated chemical changes during the composting of a high temperature biochar: Mechanisms for nitrate, phosphate and other nutrient retention and release. **Science of the Total Environment**, v. 618, p. 1210-1223, 2018.

LEHMANN, J.; JOSEPH, S. **Biochar for Environmental Management: an Introduction**. In: LEHMANN, J.; JOSEPH, S. (Ed.). *Biochar for environmental management: science and technology*. London: Earthscan. p.1-12, 2009.

LIMA, L. M. Q. **Lixo: Tratamento e Biorremediação**. 3 ed. São Paulo: Hemus, 2004.

LOPES, M. N. *et al.* Componentes estruturais do resíduo pós-corte em capim-massai adubado com cinco doses de nitrogênio. **Revista Ciência Agronômica**, v. 42, p. 518-525, 2011.

LOSS, A. *et al.* Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. **Pesquisa agropecuária brasileira**, v. 46, p. 1269-1276, 2011.

LUA, A. C.; YANG, T.; GUO, J. Effects of pyrolysis conditions on the properties of activated carbons prepared from pistachio-nut shells. **Journal of analytical and applied pyrolysis**, v. 72, n. 2, p. 279-287, 2004.

LUENGO, C.A.; FELFLI, F.E.F.; BEZZON, G. **Pirólise e torrefação**. In: CORTEZ, L.A.; LORA, E.E.S.; GOMEZ, E.O. *Biomassa para energia*. Campinas, SP: Editora Unicamp, p.333-352, 2008.

LUO, W.; QIAN, L.; LIU, W.; ZHANG, X.; WANG, Q.; JIANG, H.; CHENG, B.; MA, H.; WU, Z. A potential Mg-enriched biochar fertilizer: Excellent slow-release performance and release mechanism of nutrientes. **Science of the Total Environment**, v. 768, n. 144454, p. 1-11, 2021.

MAGHANAKI, M. M. *et al.* Potential of biogas production in Iran. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 28, p. 702-714, 2013.

MALAVOLTA, E. **Elementos de Nutrição Mineral de Plantas**. 1 Ed. São Paulo, SP: Agronômica Ceres, 1980.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; DE OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 Ed. Piracicaba, SP: Potafos, 1997.

MARANHÃO, T. D. *et al.* Accumulation and partition of macronutrients in Pennisetum purpureum cv. Roxo managed under different growth ages and seasons. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v. 19, n. 3, p. 223-240, 2018.

MARANHÃO, T. D. *et al.* Nutritional status and accumulation of micronutrients in elephant grass cv. Roxo under rainfed conditions. **Archivos de zootecnia**, v. 69, n. 265, p. 86-94, 2020.

MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. 3.ed. Londres, Academic Press, p.347-364, 2011.

MCKENDRY, P. Energy production from biomass (Part 1): Overview of biomass. **Bioresour Technol**, v. 83, p. 37–46, 2002.

MENDONÇA, H. V. *et al.* Crescimento de Cana-de-Açúcar sob Aplicação de Biofertilizante da Bovinocultura e Ureia. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 9, n. 4, p. 973-987, 2016.

MENG, J. *et al.* Comparative study on the characteristics and environmental risk of potentially toxic elements in biochar obtained via pyrolysis of swine manure at lab and pilot scales. **Science of the Total Environment**, v. 825, p. 153941, 2022.

MOHAMMADI, A. Overview of the benefits and challenges associated with pelletizing biochar. **Processes**, v. 9, n. 9, p. 1591, 2021.

MORF, P.; HASLER, P.; NUSSBAUMER, T. Mechanisms and kinetics of homogeneous secondary reactions of tar from continuous pyrolysis of wood chips. **Fuel**, v. 81, n. 7, p. 843-853, 2002.

MUKHUBA, M. *et al.* Comparative assessment of bio-fertiliser quality of cow dung and anaerobic digestion effluent. **Cogent Food & Agriculture**, v. 4, n. 1, p. 1435019, 2018.

NESHAT, S. A; MOHAMMADI, M.; NAJAFPOUR, G. D.; LAHIJANI, P. Anaerobic co-digestion of animal manures and lignocellulosic residues as a potent approach for sustainable biogas production. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 79, p. 308-322, 2017.

NOVOTNY, E. H.; MAIA, C. M. B. F.; CARVALHO, M. T. M.; MADARI, B. E. Biochar: Pyrogenic carbon for agricultural use – A critical review. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 2, p. 321-344, 2015.

OLIVEIRA, P. A. V. **Tecnologias para o manejo de resíduos na produção de suínos: manual de boas práticas**. Concórdia: Embrapa Suínos e Aves, 2004.

OLIVEIRA, L. C. A. *et al.* Frações de fósforo em função do uso de fertilizantes fosfatados em distintas classes de solo. **Revista em Agronegócio e Meio Ambiente**, v. 14, n. 4, p. 1025-1035, 2021.

ONAY, O.; KOCKAR, O. M. Slow, Fast and Flash Pyrolysis of Rapeseed. **Renewable Energy**, v. 28, n. 15, p. 2417–2433, 2003.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS (ONU). World Population Prospects: The 2017 Revision. New York: United Nations, 2017.

ORRICO JÚNIOR, M. A. P. *et al.* Use of organic compost for the fertilization of Piatã and Paiaguás grasses: effects of dose on morphogenetic, structural, nutritional, and productive characteristics. **Compost Science & Utilization**, v. 26, n. 3, p. 201-208, 2018.

PECHA, B.; GARCIA-PEREZ, M. Pyrolysis of Lignocellulosic Biomass: Oil, Char and Gas. In: **Bioenergy: Elsevier**, p. 413-442, 2015.

PINHEIRO, P. C. C.; SAMPAIO, R. S.; REZENDE, M. E. A. **Fundamentos e prática da carbonização de biomassa**. Belo Horizonte: UFMG, 120 p., 2001.

PIRES, I. C. D. S. A. **Produção e caracterização de biochar de palha de cana-de-açúcar (*Saccharum sp.*)**. Universidade Federal de São Carlos, 2017 (Dissertação de Mestrado).

RAFAEL, R. B. A. *et al.* Benefits of biochars and NPK fertilizers for soil quality and growth of cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.) in an acid arenosol. **Pedosphere**, v. 29, n. 3, p. 311-333, 2019.

RAJKOVICH, S.; ENDERS, A.; HANLEY, K.; HYLAND, C.; ZIMMERMAN, A. R.; LEHMANN, J. Corn growth and nitrogen nutrition after additions of biochars with varying properties to a temperate soil. **Biol Fertil Soils**, v. 48, n. 3, p. 271-284, 2012.

RASUL, M.; CHO, J.; SHIN, H.S.; HUR, J. Biochar-induced priming effects in soil via modifying the status of soil organic matter and microflora: a review. **Science of the Total Environment**, v. 805, p. 150304. 2022.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Ed.). **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: Comissão de Fertilidade do Solo do estado de Minas Gerais, 1999.

RIBELATTO, P. J. C. *et al.* Atributos químicos do solo e produção de *Urochloa brizantha* cv. Marandu. **Investigación Agraria**, v. 21, n. 2, p. 108-116, 2019.

RONGA, D.; BIAZZI, E.; PARATI, K.; CARMINATI, D.; CARMINATI, E.; TAVA, A. Microalgal biostimulants and biofertilisers in crop productions. **Agronomy**, v. 9, n. 4, p. 1-22, 2019.

SANTOS, A. C. V. DOS. **Biofertilizante líquido: o defensivo agrícola da natureza**. 2. ed. Niterói: Emater, 1992.

SANTOS JÚNIOR, J. M. **Pellets de biochar como condicionador de solo na produção e nutrição de urochlos brizanta cv. BRS paiaguás**. Instituto de Ciências Agrárias, Universidade Federal de Minas Gerais, 2022 (Dissertação de Mestrado).

SANTOS JÚNIOR, J. M. *et al.* Biochar pellets as soil conditioner on the growth of *Urochloa brizantha* BRS Paiaguás. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 55, p. e20238690, 2024.

SCHÜLLER, E. M. *et al.* Influência do esterco bovino na produção e qualidade proteica da cultivar de azevém BRS ponteio. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 1, p. 2685-2697, 2020.

SHACKLEY, S. *et al.* **An assessment of The Benefits and Issues Associated With The Application of Biochar to Soil.** Department for Environment, Food and Rural Affairs, UK Government, London, 2010.

SHARMA, A.; PAREEK, V.; ZHANG, D. Biomass pyrolysis - A review of modelling, process parameters and catalytic studies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 50, p. 1081–1096, 2015.

SIDDIQI, M.Y.; GLASS, A.D.M. Utilization index: a modified approach to the estimation and comparison of nutrient efficiency in plants. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v.4, n.3, p.298-302, 1981.

SILBER, A.; LEVKOVITCH, I.; GRABER, E. R. pH-dependent mineral release and surface properties of cornstraw biochar: agronomic implications. **Environmental science & technology**, v. 44, n. 24, p. 9318-9323, 2010.

SILVA, J. V. DE S. *et al.* Adubação fosfatada no feijoeiro cultivado sob palhada de *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. **Revista Ceres**, v. 65, n. 02, p. 181-188, 2018.

SIMANSKY, V.; HORÁK, J.; BORDOLOI, S. Improving the soil physical properties and relationships between soil properties in arable soils of contrasting texture enhancement using biochar substrates: Case study in Slovakia. **Geoderma Regional**, v. 28, p. e00443, 2022.

SOUSA, G. G. *et al.* Fertirrigação com biofertilizante bovino na cultura do feijoeiro. **Revista Agropecuária Científica no Semiárido**, vol. 9, n. 4, p. 76 -82, 2013.

SPOKAS, K A. Review of the stability of biochar in soils: predictability of O:C molar ratios. **Carbon Management**, v.1, p. 289-303, 2010.

STRUHS, E.; MIRKOU EI, A.; YOU, Y.; MOHAJERI, A. Techno-economic and environmental assessments for nutrient-rich biochar production from cattle manure: a case study in Idaho, USA. **Appl. Energy**, v. 279, n. 115782. 2020.

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo.** 3 Ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2017.

TERUEL, D. A. *et al.* Modelagem matemática como metodologia de análise do crescimento e arquitetura de sistemas radiculares. **Scientia agrícola**, v. 57, p. 683-691, 2000.

THOUIN, H. *et al.* Microcosm-scale biogeochemical stabilization of Pb, As, Ba and Zn in mine tailings amended with manure and ochre. **Applied Geochemistry**, v. 111, p. 104438, 2019.

TORRES, W. G. A. *et al.* Phosphorus availability in soil amended with biochar from rice rusk and cattle manure and cultivated with common bean. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 44, n. 14620, p. 1-10, 2020.

TRAZZI, P.A.; HIGA, A.R.; DIECKOW, J.; MANGRICH, A.S.; HIGA, R.C.V. Biocarvão: realidade e potencial de uso no meio florestal. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 2, p. 875-887, 2018.

TRIPATHI, M.; SAHU, J. N.; GANESAN, P. Effect of process parameters on production of biochar from biomass waste through pyrolysis: A Review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 55, p. 467–481, 2016.

VAN DE VELDEN, M.; BAEYENS, J.; BREMS, A.; JANSSENS, B.; DEWIL, R. Fundamentals, kinetics and endothermicity of the biomass pyrolysis reaction. **Renewable energy**, v. 35, p. 232-242, 2010.

VIEIRA, H. G.; POLLI, H. Q. O biogás como fonte alternativa de energia. **Revista Interface Tecnológica**, v. 17, n. 1, p. 388-400, 2020.

VEGA, C. F. P. *et al.* Biochar from eucalyptus waste improves the chemical and biological properties of an Inceptisol and sugarcane yield over time under tropical conditions. **Pedosphere**, 2025.

VENDRUSCOLO, E. P; ALVES, M. C.; FREITAS LEAL, A. J.; DE SOUZA, E. J.; SOUTO FILHO, S. N. Efeitos do biochar, culturas de cobertura e lodo de esgoto nos atributos físicos do solo. **Ciencia del Suelo**, v. 36, n. 1, p. 1-10, 2018.

WASSELAI, J. H. T. *et al.* Produção de forragem e características agronômicas de capim-piatã sob doses de nitrogênio. **Boletim de Indústria Animal**, v. 77, p. 1-14, 2020.

WEN, P.; WU, Z.; HAN, Y.; CRAVOTTO, G.; WANG, J.; YE, B. C. Microwave-assisted synthesis of a novel biochar-based slow-release nitrogen fertilizer with enhanced water-retention capacity. **ACS Sustainable Chemistry and Engineering**, v. 5, p. 7374-7382, 2017.

XIN, Y.; WANG, D.; QIAN, X.; YUAN, Q.; CAO, H. Influence of moisture content on cattle manure char Properties and its potential for hydrogen rich gas production. **Journal of Analytical and Applied Pyrolysis**, v. 130, p.249-255, 2018.

YANG, F.; ANTONIETTI, M. The sleeping giant: A polymer view on humic matter in synthesis and applications. **Progress in Polymer Science**, v. 100, p. 101182, 2020.

YU, X.; ZHANG, C.; QIU, L.; YAO, Y.; SUN, G.; GUO, X. Anaerobic digestion of swine manure using aqueous pyrolysis liquid as an additive. **Renewable Energy**, v. 147, p. 2484-2493, 2020.

ZHANG, S. *et al.* Biochar significantly reduced nutrient-induced positive priming in a subtropical forest soil. **Biology and Fertility of Soils**, v. 59, n. 6, p. 589-607, 2023.

ZHAO, B. *et al.* Effect of pyrolysis temperature, heating rate, and residence time on rapeseed stem derived biochar. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 977-987, 2018.

ZHAO, Y. *et al.* Biochar Acts as an Emerging Soil Amendment and Its Potential Ecological Risks: A Review. **Energies**, v. 16, n. 1, 2023.

ZHOU, Z.; DU, C.; LI, T.; SHEN, Y.; ZENG, Y.; DU, J.; ZHOU, J. Biodegradation of a biochar-modified waterborne polyacrylate membrane coating for controlled-release fertilizer and its effects on soil bacterial community profiles. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 22, p. 8672-8682, 2015.