

**Produção de biomassa e estado nutricional de trevo-encarnado (*Trifolium incarnatum* L.) e aveia (*Avena sativa* L.) após aplicação de nitrogênio mineral, biochar e composto orgânico**

**PAULO AUGUSTO CRESTANI**

*Dissertação apresentada à Escola Superior Agrária de Bragança para obtenção do Grau de Mestre em Agroecologia, no âmbito da dupla diplomação com a Universidade Tecnológica Federal do Paraná*

Orientado por:

**Margarida Maria Pereira Arrobas Rodrigues**

**Manuel Ângelo Rosa Rodrigues**

**Luís César Cassol**

**Bragança**

**2025**

*A todos que tornaram este trabalho possível.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por ser minha luz constante, por me sustentar nos momentos mais desafiadores e por me permitir celebrar cada conquista com gratidão, esperança e humildade. Sua presença me fortaleceu ao longo desta caminhada e me guiou mesmo quando os caminhos pareciam incertos.

À minha família, base e maior inspiração, expresso profunda gratidão pelo apoio incondicional, carinho e incentivo constantes. Em especial, aos meus pais, Donato Francisco Crestani e Noimi Bessegatto Crestani, que sempre acreditaram no meu potencial e me fortaleceram mesmo à distância. Ficar longe de casa por tanto tempo não foi fácil, mas o amor e a confiança de vocês foram fundamentais para que eu seguisse firme em direção aos meus objetivos.

Expresso minha sincera gratidão à minha orientadora, Professora Doutora Margarida Maria Pereira Arrobas Rodrigues, por acreditar no meu trabalho desde o início, oferecendo orientação dedicada, paciência e suporte contínuo. Ao meu coorientador, Professor Doutor Manuel Ângelo Rodrigues, agradeço pelas valiosas contribuições científicas, pela generosidade em compartilhar seu conhecimento e pela atenção em todos os momentos necessários. Agradeço também ao Professor Doutor Luís César Cassol, por ter aceitado ser meu coorientador e pelo apoio, incentivo e contribuições ao longo da realização deste trabalho, sendo fonte de inspiração constante.

Sou grato ao Instituto Politécnico de Bragança pela acolhida, pelas experiências proporcionadas e pela oportunidade de realização desta dissertação. Ao Laboratório de Solos do IPB, agradeço o suporte técnico durante as análises laboratoriais. À UTFPR, minha instituição de origem, agradeço por viabilizar minha participação no programa de dupla diplomação e por proporcionar tantas experiências incríveis ao longo do meu curso técnico e da graduação.

Aos amigos que fiz em Bragança e aos que permaneceram no Brasil, deixo meu sincero agradecimento pela companhia, mensagens de apoio e força nos momentos difíceis, jamais pensei que poderia conhecer tantas pessoas extraordinárias.

Por fim, deixo meu agradecimento a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta dissertação.

Muito obrigado!

## RESUMO

O crescimento da população mundial tem elevado a demanda por alimentos, exigindo aumento da produtividade agrícola aliada à sustentabilidade ambiental. Para atender a essa necessidade, torna-se essencial adotar práticas que promovam o uso eficiente de nutrientes e preservem a fertilidade do solo. Entre essas práticas, destaca-se a utilização de condicionadores de solo, como o biochar e o composto orgânico, capazes de melhorar as propriedades químicas do solo, aumentar a disponibilidade de nutrientes e reduzir perdas por lixiviação e volatilização.

O uso de fertilizantes nitrogenados, embora fundamental para a produtividade, deve ser manejado com cautela devido aos potenciais impactos ambientais, como a contaminação de águas subterrâneas e a emissão de gases de efeito estufa. Associar práticas agroecológicas à adubação mineral, bem como integrar culturas com diferentes estratégias nutricionais, como leguminosas fixadoras de nitrogênio, pode contribuir para a eficiência do sistema produtivo.

Diante desse contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar os efeitos da aplicação de biochar, composto orgânico e adubação nitrogenada mineral na produção de matéria seca e no estado nutricional de *Trifolium incarnatum* L. (trevo-encarnado) e *Avena sativa* L. (aveia). O experimento foi conduzido em vasos, ao ar livre, com cinco tratamentos distintos e três repetições. Foram avaliadas a produção de biomassa aérea, a composição mineral das plantas e os atributos químicos do solo ao início e ao fim do experimento.

Os resultados evidenciaram o desempenho superior do trevo-encarnado na produção de biomassa, com média aproximadamente 280% maior em relação à aveia entre os tratamentos avaliados, especialmente sob aplicação de composto orgânico. Esse resultado reflete sua capacidade de fixação biológica de nitrogênio e maior eficiência na ciclagem de nutrientes. A aveia, embora tenha apresentado menor acúmulo de matéria seca, concentrou maiores teores dos micronutrientes manganês, cobre e ferro nos tecidos. O composto orgânico destacou-se como uma alternativa eficiente e sustentável à adubação mineral, promovendo o aumento dos níveis de nutrientes residuais no solo e contribuindo para a melhoria da sua fertilidade.

**Palavras-chave:** *Avena sativa*; *Trifolium incarnatum*; biochar; composto orgânico; agricultura sustentável.

## ABSTRACT

The world population growth has increased the demand for food, requiring higher agricultural productivity combined with environmental sustainability. To meet this need, it is essential to adopt practices that promote efficient nutrient use and preserve soil fertility. Among these practices, the use of soil conditioners, such as biochar and organic compost, stand out for their ability to improve soil chemical properties, increase nutrient availability, and reduce losses through leaching and volatilization.

Although nitrogen fertilizers are essential for productivity, their use must be carefully managed due to potential environmental impacts, such as groundwater contamination and greenhouse gas emissions. Integrating agroecological practices with mineral fertilization, as well as incorporating crops with different nutritional strategies, such as nitrogen-fixing legumes, can contribute to the production system efficiency.

In this context, the aim of this study was to evaluate the effects of biochar, organic compost, and mineral nitrogen fertilization on dry matter production and the nutritional status of *Trifolium incarnatum* L. (crimson clover) and *Avena sativa* L. (oat). The experiment was conducted in pots, outdoors, using five distinct treatments and three replications. Aboveground biomass production, plant mineral composition, and soil chemical attributes were assessed at the beginning and end of the experiment.

The results demonstrated the superior performance of crimson clover in biomass production, with an average approximately 280% higher than that of oat across the evaluated treatments, especially under organic compost application. This outcome reflects its biological nitrogen fixation capacity and greater efficiency in nutrient cycling. Oat, although producing less dry matter, exhibited higher concentrations of the micronutrients manganese, copper, and iron in plant tissues. Organic compost emerged as an efficient and sustainable alternative to mineral fertilization, promoting increased residual nutrient levels in the soil and contributing to improved soil fertility.

**Keywords:** *Avena sativa*; *Trifolium incarnatum*; biochar; organic compost; sustainable agriculture.

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	<b>2</b>
2.1	GERAL .....	2
2.2	ESPECÍFICOS.....	2
<b>3</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
3.1	AGRICULTURA SUSTENTÁVEL .....	3
3.2	FERTILIZAÇÃO DAS CULTURAS E PROBLEMÁTICA AMBIENTAL ASSOCIADA.....	5
3.3	ECONOMIA CIRCULAR E NECESSIDADE DE RECICLAR E REUTILIZAR .....	8
3.4	UTILIZAÇÃO DE FERTILIZANTES ORGÂNICOS NA AGRICULTURA .....	10
3.5	CICLO DO NITROGÊNIO .....	13
3.6	CONDICIONADORES DE SOLO.....	17
3.6.1	<i>Biochar</i> .....	18
3.7	PLANTAS INDICADORAS .....	19
3.7.1	<i>Aveia e suas necessidades específicas de fertilização</i> .....	19
3.7.2	<i>Trevo-encarnado e suas necessidades específicas de fertilização</i> .....	21
<b>4</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>23</b>
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO .....	23
4.2	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO E CLIMA.....	23
4.2.1	<i>Solo</i> .....	23
4.2.2	<i>Clima</i> .....	24
4.3	DESCRIÇÃO DO EXPERIMENTO .....	25
4.4	ANÁLISES LABORATORIAIS DO SOLO, COMPOSTO ORGÂNICO E BIOCHAR .....	25
4.5	INSTALAÇÃO E CONDUÇÃO DO EXPERIMENTO .....	28
4.6	PARÂMETROS AVALIADOS.....	32
4.6.1	<i>Parâmetros avaliados no solo</i> .....	33
4.6.1.1	pH.....	33
4.6.1.2	Determinação do carbono facilmente oxidável e do teor de matéria orgânica .....	33
4.6.1.3	Determinação do fósforo e potássio.....	33
4.6.1.4	Determinação do boro .....	34
4.6.1.5	Capacidade de troca catiônica .....	34
4.6.1.6	Micronutrientes .....	34
4.6.2	<i>Parâmetros avaliados nos tecidos vegetais</i> .....	35
4.6.2.1	Nitrogênio .....	35
4.6.2.2	Fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, zinco, manganês .....	36
4.6.2.3	Boro .....	36

4.6.3	<i>Análise estatística dos dados</i> .....	37
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>38</b>
5.1	PRODUÇÃO DE MATÉRIA SECA DAS CULTURAS.....	38
5.2	CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES NO TECIDO VEGETAL .....	39
5.2.1	<i>Macronutrientes</i> .....	39
5.2.2	<i>Micronutrientes</i> .....	40
5.3	NUTRIENTES RECUPERADOS.....	43
5.3.1	<i>Macronutrientes recuperados</i> .....	44
5.3.2	<i>Micronutrientes recuperados</i> .....	46
5.4	EFEITO DOS TRATAMENTOS NO SOLO.....	48
5.4.1	<i>Carbono e pH</i> .....	49
5.4.2	<i>Nutrientes no solo</i> .....	50
5.5	NITROGÊNIO DERIVADO DA ATMOSFERA.....	52
<b>6</b>	<b>DISCUSSÃO</b> .....	<b>54</b>
6.1	PRODUÇÃO DE BIOMASSA .....	54
6.2	CONCENTRAÇÃO DE NUTRIENTES NO TECIDO VEGETAL E ESTADO NUTRICIONAL DAS CULTURAS.....	55
6.3	NUTRIENTES RECUPERADOS E EFEITO SOBRE AS CARACTERÍSTICAS DO SOLO .....	57
<b>7</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	<b>59</b>
<b>8</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>61</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Quantidade de bioresíduos tratados em alguns países europeus (kg/habitante/ano) (Adaptado de ECN Status Report, 2019). .....	12
Figura 2. Quantidade total de fertilizantes nitrogenados utilizados no setor agrícola por país (Mt) (Adaptado de FAOSTAT, 2022).....	15
Figura 3. Localização do local onde se decorreu o ensaio (Fonte: Google Earth) .....	23
Figura 4. Crivo (esquerda) e vasos utilizados para a coleta de solo (direita) .....	24
Figura 5. Climograma do período de novembro de 2024 a abril de 2025 do local de estudo (Fonte: Estação Climatológica da ESAB) .....	25
Figura 6. Incorporação dos tratamentos no solo (esquerda) e organização dos vasos em bancada aquecida (direita) .....	29
Figura 7. Croqui do experimento.....	29
Figura 8. Semeadura das espécies (esquerda) e colocação das bandejas sobre os vasos (direita). .....	30
Figura 9. Condição das plantas no dia 11 de dezembro de 2024 (trevo-encarnado na esquerda e aveia na direita). .....	31
Figura 10. Condição das plantas no dia 24 de março de 2025 (trevo-encarnado na esquerda e aveia na direita).....	32
Figura 11. Produção de matéria seca por espécie e por tratamento. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. .	39
Figura 12. Concentração de ferro (Fe) nos tecidos vegetais por espécie e por tratamento em miligramas por quilograma. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio.....	42
Figura 13. Concentração de cobre (Cu) nos tecidos vegetais por espécie e por tratamento em miligramas por quilograma. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. ....	43
Figura 14. Fósforo (P) recuperado por espécie e por tratamento em miligramas por vaso. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio.....	45
Figura 15. Potássio (K) recuperado por espécie e por tratamento em miligramas por vaso. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. ....	46

Figura 16. Boro (B) recuperado por espécie e por tratamento em miligramas por vaso. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio.....	48
Figura 17. Teor de carbono no solo ao final do experimento por espécie e por tratamento em gramas por quilograma de solo. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio.....	49
Figura 18. pH em água do solo ao final do experimento por espécie e por tratamento. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio.....	50
Figura 19. Teor de fósforo (P, expresso em $P_2O_5$ ) no solo ao final do experimento por espécie e por tratamento em miligramas por quilograma de solo. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. .	51
Figura 20. Teor de potássio (K, expresso em $K_2O$ ) no solo ao final do experimento por espécie e por tratamento em miligramas por quilograma de solo. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. .	51
Figura 21. Teor de boro (B) no solo ao final do experimento por espécie e por tratamento em miligramas por quilograma de solo. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio.....	52

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Propriedades iniciais do solo utilizado no ensaio .....	26
Tabela 2. Propriedades do composto orgânico utilizado .....	27
Tabela 3. Propriedades do biochar utilizado.....	28
Tabela 4. Concentração dos macronutrientes analisados no tecido vegetal .....	40
Tabela 5. Concentração dos micronutrientes analisados no tecido vegetal.....	41
Tabela 6. Macronutrientes recuperados .....	44
Tabela 7. Micronutrientes recuperados.....	47
Tabela 8. Valores de nitrogênio derivado da atmosfera (Ndfa) .....	53

## ABREVIATURAS E SIGLAS

NO – Óxido nítrico

N<sub>2</sub>O – Óxido nitroso

NO<sub>2</sub> – Dióxido de nitrogênio

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change

FAO – Food and Agriculture Organization

Mt – Megatonelada (1 Mt = 1.000.000 t)

M – Molaridade (representa a quantidade de soluto em mols dissolvido em um litro de solução)

ESAB – Escola Superior Agrária de Bragança

rpm – rotações por minuto

N – Nitrogênio

P – Fósforo

K – Potássio

Ca – Cálcio

Mg – Magnésio

Na - Sódio

Al – Alumínio

H<sup>+</sup> - Hidrogênio

Fe – Ferro

Cu – Cobre

Zn – Zinco

Mn – Manganês

B – Boro

t – Tonelada

Tg - Teragrama

ha – Hectare

Ndfa – Nitrogen derived from the atmosphere

## 1 INTRODUÇÃO

As projeções populacionais indicam um crescimento acelerado e contínuo nas próximas décadas, o que deve elevar a demanda de alimentos em geral (Saath e Fachinello, 2018), que devem ser produzidos de forma sustentável (Costa, 2010). A necessidade de conciliar produtividade com a sustentabilidade dos sistemas agrícolas impulsiona a busca por práticas e insumos que minimizem os impactos ambientais, garantindo a manutenção da fertilidade do solo e a eficiência no uso de nutrientes.

Nesse contexto, a utilização de condicionadores de solo, como o biochar e a adubação orgânica, tem sido amplamente estudada como uma estratégia para melhorar a qualidade do solo, aumentar a disponibilidade de nutrientes e reduzir as perdas por lixiviação e volatilização (Kumar e Bhattacharya, 2021; Semida et al., 2019). Além disso, a aplicação de fertilizantes nitrogenados deve ser criteriosamente manejada para otimizar a eficiência do nitrogênio pelas culturas e minimizar os impactos negativos ao ambiente, como a contaminação de águas por nitratos e a emissão de gases de efeito estufa, como o óxido nitroso (Savci, 2012).

A adoção de estratégias de manejo que aliem a sustentabilidade com a eficiência produtiva é essencial para o desenvolvimento de uma agricultura equilibrada e resiliente. Diante disso, este estudo tem como objetivo geral avaliar a influência da utilização de condicionadores de solo, como o biochar e a adubação orgânica, bem como a adubação nitrogenada na produção de matéria seca de culturas anuais, especificamente do trevo-encarnado e da aveia. Para isso, pretende-se compreender de que maneira os condicionadores de solo podem impactar a eficiência de aproveitamento dos nutrientes. Além disso, busca-se explicar como o biochar e o composto orgânico influenciam o estado nutricional das culturas, fornecendo ou aumentando a disponibilidade de nutrientes para um manejo mais eficiente e sustentável do solo e dos fertilizantes.

A investigação dessas interações entre condicionadores de solo e adubação nitrogenada é relevante por oferecer subsídios para práticas agrícolas mais eficientes e ambientalmente responsáveis. Ao analisar os impactos na produtividade e na nutrição das culturas, este estudo poderá fornecer informações técnicas aplicáveis a diferentes contextos produtivos, contribuindo para o uso racional de fertilizantes, a melhoria da fertilidade do solo e a redução de impactos ambientais, aspectos fundamentais para a viabilidade econômica e ecológica da agricultura contemporânea.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 GERAL**

O presente estudo tem como objetivo geral avaliar a influência da utilização de condicionadores de solo, como o biochar e a adubação orgânica, além da adubação nitrogenada mineral, no estado nutricional e na produção de matéria seca de culturas anuais (trevo-encarnado e aveia).

### **2.2 ESPECÍFICOS**

- Avaliar o efeito do biochar e do composto orgânico na produção de matéria seca das culturas do trevo-encarnado e da aveia, além de suas influências nas características químicas do solo;
- Avaliar o efeito dos tratamentos no estado nutricional das plantas de trevo-encarnado e aveia;

### 3 REFERENCIAL TEÓRICO

Este capítulo visa contextualizar conceitos importantes para o entendimento deste trabalho, utilizando como base para explicação experimentos já realizados na área, de modo a salientar a importância do mesmo.

#### 3.1 Agricultura Sustentável

Estima-se que a população mundial aumentará de 8,2 para aproximadamente 9 bilhões em 2030 e atinja um pico de 10,3 bilhões de habitantes em 2085 (UNDESA, 2024). Por conta deste expressivo crescimento populacional, calcula-se que a produção de alimentos necessária para suprir toda a população mundial deva crescer entre 100 e 110% até o ano de 2050 (Tilman et al., 2011).

Neste cenário, a agricultura tem papel fundamental para a sobrevivência humana (Laurett et al, 2021), mas frequentemente provoca disrupções nos ecossistemas naturais. Isto é especialmente verdade para as comunidades vegetais, populações animais, sistema solo e recursos hídricos. Compreender, avaliar e equilibrar as perturbações agrícolas prejudiciais e benéficas nos recursos do solo e da água são tarefas essenciais nos esforços humanos para sustentar e melhorar o bem-estar humano (Parikh e James, 2012).

Portanto, dada a extrema importância de manter os sistemas agrícolas produtivos ao longo do tempo, capazes de produzir os nutrientes necessários para manutenção de um constante crescimento e desenvolvimento da espécie humana, se faz necessária a introdução do conceito de sustentabilidade a agricultura.

O conceito de agricultura sustentável pode ser muitas vezes distinto em sua definição plena dependendo do local e das condições em que está sendo desenvolvido, no entanto, desde a publicação do Relatório de Brundtland em outubro de 1987 (*World Commission on Environment and Development - WCED, 1987*), que esmiuçou princípios para o desenvolvimento sustentável, a agricultura sustentável tem sido foco de muitos estudos ao redor do planeta. Porém, assim como a definição de desenvolvimento

sustentável, o conceito de agricultura sustentável é ambíguo quanto ao seu significado (Culleton, 1994).

Sendo assim, diferentes conceitos de agricultura sustentável foram desenvolvidos ao longo do tempo, das condições geográficas, econômicas e sociais em que as sociedades estavam inseridas. Como exemplo disso, vários autores buscaram definir um conceito universal para a agricultura sustentável, como por exemplo:

“A agricultura sustentável compreende procedimentos de gestão que trabalham com os processos naturais para conservar todos os recursos, minimizar o desperdício e o impacto ambiental, prevenir problemas e promover a resiliência, a autorregulação, a evolução e a produção sustentada dos agroecossistemas, garantindo o sustento e o bem-estar de todos.” (MacRae et al, 1989).

“Sistema integrado de práticas de produção vegetal e animal com aplicação específica ao local, que, a longo prazo, visa: (a) satisfazer as necessidades humanas de alimentos e fibras; (b) melhorar a qualidade ambiental; (c) utilizar de forma eficiente os recursos não renováveis e os recursos da própria exploração agrícola, integrando ciclos biológicos naturais e controles adequados; (d) sustentar a viabilidade econômica das operações agrícolas; e (e) melhorar a qualidade de vida dos agricultores e da sociedade como um todo.” (US Farm Bill, 1990).

“A agricultura sustentável tem como objetivo a satisfação contínua das necessidades, não só das gerações atuais, mas também das futuras, conservando o solo, a água e os recursos genéticos vegetais e animais. Para isso, a agricultura não deve degradar o ambiente, mas precisa de ser tecnicamente adequada, economicamente viável e socialmente aceitável.” (FAO, 1993).

“A agricultura sustentável baseia-se em três funções essenciais: a função de produção de bens e serviços; a função de gestão do território e a função de desempenho de um papel no mundo rural” (Zaham et al, 2007).

No entanto, todas as tentativas de encontrar uma definição única e abrangente estavam destinadas ao fracasso (Pretty, 1995). Devido à natureza complexa e contestada da noção de agricultura sustentável e à sua adaptação ao contexto, a sua definição precisa e absoluta é impossível.

Sendo assim, desde o fim da Segunda Guerra Mundial, a agricultura passou por processos revolucionários de exploração e produção de recursos. A produção por área de cultivo de fibras e alimentos disparou devido a novas tecnologias como a mecanização dos processos produtivos, o aumento do uso de produtos químicos, a especialização de propriedades agrícolas e o desenvolvimento de políticas públicas que favorecem a maximização da produção e a diminuição dos custos para os consumidores (Brodt et al, 2011).

No entanto, quando a produção de alimentos e fibras degrada a base de recursos naturais, a capacidade das gerações futuras de produzir e prosperar diminui. A queda de

civilizações antigas na Mesopotâmia, na região do Mediterrâneo, no sudoeste pré-colombiano dos Estados Unidos e na América Central acredita-se ter sido fortemente influenciada pela degradação dos recursos naturais devido a práticas agrícolas e florestais não sustentáveis (Brodt et al., 2011).

Dessa forma, fica clara a necessidade de encontrarmos soluções para a transição dos métodos agrários intensivos e extrativistas para métodos sustentáveis. A degradação ambiental das últimas décadas aliada a uma busca pela maior sustentabilidade do sistema produtivo da agricultura fez com que novos estilos de produção fossem desenvolvidos ao redor do mundo, como é o caso da Agricultura Biodinâmica (Áustria); da Agricultura Biológica (Estados Unidos e Portugal); da Agricultura Ecológica (Espanha); da Agricultura Natural (Japão); da Agricultura Orgânica (Inglaterra); e da Agricultura Regenerativa (França) (Navarro, 2002).

Portanto, como observado no trabalho de Costa (2010), após uma extensa revisão bibliográfica, existe uma tridimensionalidade nos objetivos da agricultura sustentável nos mais diversos conceitos distribuídos pelo globo, envolvendo os aspectos do ambiente, o social e o econômico aplicados a atividade agrícola. Da mesma forma, neste mesmo trabalho de Costa (2010), a autora conclui que há a necessidade da construção de um conceito operacional para a agricultura sustentável, que permita a análise da complexidade dos sistemas e a subsequente criação de soluções para possíveis problemas que forem encontrados, fazendo assim com que se torne possível a avaliação da sustentabilidade.

Assim, o conceito de agricultura sustentável deve basear-se no simples fato de que os ecossistemas agrícolas são sustentáveis a longo prazo apenas se os *outputs* de todos os componentes produzidos equilibram os *inputs* no sistema. Se a quantidade necessária de *inputs* (nutrientes) para obter o rendimento desejado é fornecida em forma orgânica ou inorgânica, é uma questão de disponibilidade e logística. As plantas não conseguem diferenciar os nutrientes fornecidos por fontes orgânicas ou sintéticas (Lal, 2008).

### **3.2 Fertilização das culturas e problemática ambiental associada**

Para o desenvolvimento de uma planta superior são necessários dezessete elementos nutrientes. Na ausência de qualquer um deles a planta não se desenvolve ou

não consegue completar o seu ciclo biológico, pelo que são designados de elementos essenciais. A lista de elementos que a ciência reconhece como sendo essenciais às plantas superiores são carbono, oxigênio, hidrogênio, nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio, enxofre, boro, ferro, manganês, zinco, cobre, molibdênio, cloro e níquel (Varenes, 2003).

Nem todos os nutrientes identificados como essenciais colocam os mesmos problemas ao agricultor. Alguns estão disponíveis na atmosfera (como o dióxido de carbono) e outros são obtidos a partir da molécula da água (oxigênio e hidrogênio) pelo que não são uma preocupação habitual dos planos de fertilização, apesar de existirem em grandes quantidades nos tecidos vegetais. Estes existem no ambiente em quantidades em que é virtualmente impossível esgotarem-se, pelo que não será necessário aplicá-los como fertilizantes. Outros, porém, esgotam-se rapidamente com o cultivo, e o solo deixa de poder assegurar um adequado desenvolvimento das plantas. Por outro lado, os diferentes solos não apresentam a mesma fertilidade, fornecendo, de forma variável, cada um dos nutrientes essenciais. Além disso, as plantas cultivadas também necessitam de quantidades diferenciadas de cada um dos nutrientes essenciais (Arrobas e Rodrigues, 2020).

Os elementos essenciais podem ser divididos em macronutrientes e micronutrientes, sendo que esse critério é baseado no fato da planta necessitar de certo elemento em maiores ou menores quantidades. Tanto os macronutrientes quanto os micronutrientes são fundamentais para o crescimento das plantas. Visto isso, vale ressaltar a “Lei do Mínimo” a qual diz que, se deficiente, qualquer nutriente essencial pode se tornar fator determinante na produtividade das culturas. Sendo assim, se houver carência de qualquer macro ou micronutriente, o crescimento e o rendimento máximo da planta não serão atingidos (McClellan et al., 2007).

Para o suprimento destes nutrientes essenciais às plantas são comumente utilizados os chamados fertilizantes ou adubos, que podem ser apresentados das mais variadas formas, como: sólidos, líquidos, em pó ou em grânulos.

Os adubos podem ser divididos em elementares e compostos. Os primeiros, como o próprio nome diz, são aqueles que fornecem individualmente os macronutrientes primários, designadamente nitrogênio, fósforo ou potássio. Como exemplo pode-se citar o adubo nitrato de amônio 20,5% que é um adubo nitrogenado que doseia 20,5 kg de N por 100 kg de adubo. Os compostos são os mais utilizados, pois podem ter fórmulas que incluem dois ou três dos macronutrientes primários em diferentes proporções. Um adubo

10-10-10, por exemplo, contém 10% de nitrogênio, 10% de fósforo expresso em  $P_2O_5$  e 10% de potássio expresso em  $K_2O$  (Arrobas, 2010).

A divisão dos fertilizantes também pode ser feita de acordo com a sua origem, podendo ser: minerais; orgânicos; e organominerais. Os primeiros de origem mineral são obtidos por meio de processos industriais físicos e/ou químicos. Já os fertilizantes orgânicos são de origem animal e/ou vegetal, enquanto os fertilizantes organominerais são aqueles obtidos por meio da mistura mecânica de fertilizantes minerais e orgânicos (Decreto-Lei n.o 103/2015).

De forma geral, os fertilizantes químicos têm algumas vantagens sobre os fertilizantes orgânicos, como a maior solubilidade dos nutrientes e sua imediata disponibilidade para as plantas, bem como sua menor necessidade de mão de obra para aplicação (Yang, 2015).

No entanto, a fertilização das culturas não pode ser realizada de forma aleatória e desordenada, diferentes espécies vegetais respondem de maneiras distintas aos níveis de cada nutriente disponível. Embora os fertilizantes tenham seus benefícios, também existem desvantagens em seu uso, especialmente no que diz respeito aos fertilizantes sintéticos de nitrogênio. O uso de nitrogênio em níveis inadequados pode acarretar a perda de espécies vegetais em certos ecossistemas, o esgotamento de outros nutrientes no solo, a contaminação da água e do meio ambiente, além de efeitos nocivos à saúde humana (Sarwar, 2018).

As perdas de fosfatos ocorrem por escoamento superficial, enquanto a perda de nitrogênio também ocorre por volatilização e lixiviação. A quantidade perdida varia amplamente, dependendo da cultura, do método de aplicação, do tipo de fertilizante, dos fatores do solo e das condições ambientais (Ayoub, 1999).

Um dos principais problemas relacionados com a utilização de fertilizantes é a eutrofização das águas, que pode ser caracterizada como um dos estados da sucessão natural dos ecossistemas de lago. À medida que o tempo passa e os nutrientes se vão acumulando dentro da bacia lacustre, vai havendo um desenvolvimento cada vez maior das populações de fitoplâncton, observando-se com frequência o aparecimento de blooms de algas (Wetzel, 1993). O principal vínculo entre o uso de fertilizantes e a eutrofização de corpos de água doce e ambientes marinhos é a lixiviação, o escoamento superficial ou a erosão dos nutrientes dos fertilizantes dos campos agrícolas para os cursos d'água (Ayoub, 1999).

Além da contaminação das águas, os fertilizantes também podem contaminar os solos em que são aplicados caso as quantidades dos nutrientes não sejam balanceadas de acordo com a capacidade adsorção pelas plantas em cada tipo de solo. Como exemplo disso, Savci (2012), demonstrou que os efeitos da má utilização de fertilizantes químicos no solo não são imediatamente evidentes, pois os solos possuem um forte poder de tamponamento devido aos seus componentes. Com o tempo, observa-se que a poluição, a deterioração da fertilidade do solo e as reações de degradação que ocorrem no solo levam ao desequilíbrio dos elementos presentes. Além disso, substâncias tóxicas se acumulam nos vegetais, causando efeitos negativos em humanos e animais que deles se alimentam.

Para além disso, os fertilizantes também são contribuintes significativos para as fontes antropogênicas de gases de efeito estufa quando aplicados em excesso. Os fertilizantes nitrogenados podem causar poluição atmosférica por emissões de óxidos de nitrogênio (NO, N<sub>2</sub>O, NO<sub>2</sub>) (Savci, 2012). De acordo com o IPCC (2007), aproximadamente 17,8 Tg de N<sub>2</sub>O são produzidos anualmente em escala global, dos quais 38,2% têm origem antropogênica. Dentre essas fontes, a agricultura contribui com 25,3%, o esgoto com 1,2%, a queima de biomassa com 3,9%, os combustíveis fósseis com 3,9% e a atmosfera com 3,9%.

Conclui-se que é essencial implementar práticas eficazes para mitigar a poluição ambiental decorrente do uso de fertilizantes. Essas práticas podem ser alcançadas por meio do aumento da eficiência no uso dos nutrientes e da aplicação de dosagens ajustadas com precisão, levando em consideração as especificidades de cada ambiente e tipo de cultivo. Entretanto, é igualmente importante reconhecer que a utilização de fertilizantes foi um dos principais fatores responsáveis pelo aumento significativo da produtividade agrícola por unidade de área nas últimas décadas. Sem este insumo essencial, o atendimento às crescentes demandas nutricionais da população mundial poderia estar seriamente comprometido.

### **3.3 Economia circular e necessidade de reciclar e reutilizar**

O conceito de Economia Circular enquanto proposta inovadora de implementação de um novo sistema de processo produtivo, propõe profundas modificações estruturais e

assume um maior protagonismo ao contradizer o sistema usual da Economia Linear, este, já consolidado por suas práticas e aplicabilidades disseminadas na maioria dos países e que são definidas pelo paradigma de “ciclo fechado”: extrair-produzir-descartar. A Economia Circular visa, portanto, possibilitar um ideal aproveitamento e reaproveitamento sistemático de produtos industrializados, bens duráveis e não-duráveis, desde a etapa de concepção de projeto, até mesmo após a sua reutilização (ciclo de vida útil) (Abdalla et al., 2018).

Em 2015, a União Europeia adotou a Economia Circular como modelo a suportar e viabilizar o alcance das metas ambientais estabelecidas até 2050. Também na China, desde o início dos anos 2000, a Economia Circular vem sendo incorporada nos planos governamentais. Diante dessa nova visão estratégica, contemplar as alterações estruturais fundamentais para abraçar as novas demandas de circularidade pode conferir uma ótima oportunidade de formação de novas cadeias de valor. Há, desse modo, forte aposta numa simbiose industrial mais efetiva, em que um resíduo de uma operação pode ser insumo para outra operação, e assim sucessivamente (Berardi e Dias, 2018).

Este novo paradigma de sustentabilidade estimula novas práticas de gestão e descortina novas oportunidades, adicionando valor à organização e aos clientes, em harmonia com o meio ambiente. Enquanto fonte de inovação e permitindo a redução da procura de recursos naturais com a recuperação de desperdícios e resíduos, a Economia Circular abre excelentes perspectivas a serem encaradas pelas empresas como alavanca e motivação para um crescimento com bases sólidas e com futuro, além das vantagens competitivas no contexto de um mercado global altamente dinâmico (Leitão, 2015).

Abdalla et al. (2018) defendem que a aplicabilidade da Economia Circular possibilitaria não apenas minimizar a quantidade de descarte de produtos para a destinação final (lixo, sucatas etc.), mas também pretende oferecer alternativas significativas, minimizando a demanda pela extração de recursos naturais destinados a matéria-prima utilizada nos mais variados processos produtivos de fabricação.

Sendo assim, a Economia Circular demonstra ser uma excelente ferramenta para o aumento da sustentabilidade dos processos produtivos. Para isso, os processos de reutilização de materiais devem se tornar cada vez mais proeminentes, tendo em vista que uma vez que um material é utilizado e produz resíduos, estes podem ter 3 destinos distintos, segundo Souza (2011): (i) serem lançados diretamente na natureza, poluindo o ambiente, (ii) irem para um local de descarte seguro, como aterros sanitários e

depósitos específicos; ou (iii) submeterem-se a um processo de reciclagem, com reprocessamento e devolução ao mercado dos produtos antes descartados.

Pode-se definir o processo de reciclagem como um conjunto de técnicas que tem por finalidade aproveitar os “detritos” e reutilizá-los no ciclo de produção de que saíram ou em um ciclo de produção paralelo. A reciclagem é uma atividade pela qual, materiais que poderiam se tornar lixo, ou que já estão no lixo, são desviados, coletados, separados e processados para serem usados como matéria-prima na manufatura de novos produtos (Souza, 2011).

Dessa forma, fica clara a necessidade da reutilização de recursos para o estabelecimento de cadeias produtivas sustentáveis e menos extrativistas. De modo geral, como evidenciado por Oliveira Neto e Correia (2019) e Feo et al. (2019), a reciclagem de materiais traz benefícios tanto econômicos como ambientais, apontando reduções expressivas na emissão de gases de efeito estufa e economia de recursos quando comparados recursos oriundos de processos de reciclagem a recursos não reciclados.

Por fim, um dos possíveis destinos dos materiais orgânicos reciclados é o solo agrícola, onde sua aplicação pode representar uma alternativa sustentável e eficiente para o manejo de resíduos, promovendo a ciclagem de nutrientes e a melhoria da qualidade do solo. Essa prática contribui para o aumento da matéria orgânica, a melhoria das propriedades físico-químicas e biológicas do solo, além de reduzir a dependência de insumos químicos (Brito, 2005; Trannin, 2008). Dessa forma, a reutilização desses materiais na agricultura não apenas minimiza impactos ambientais associados ao descarte inadequado, mas também fortalece a adoção de sistemas produtivos mais sustentáveis e alinhados aos princípios da agroecologia.

### **3.4 Utilização de fertilizantes orgânicos na agricultura**

Segundo a Portaria 185/2022 publicada no Diário da República Portuguesa, entende-se que um adubo composto nada mais é do que: o adubo com um teor declarável de, pelo menos, dois dos macronutrientes principais, obtido por processos químicos, mistura ou uma combinação de ambos.

Já, pela legislação brasileira, um fertilizante orgânico composto pode ser definido como: produto obtido por processo físico, químico, físico-químico ou bioquímico, natural

ou controlado, a partir de matéria-prima de origem industrial, urbana ou rural, animal ou vegetal, isoladas ou misturadas, podendo ser enriquecido de nutrientes minerais, princípio ativo ou agente capaz de melhorar suas características físicas, químicas ou biológicas (Zonta, 2021).

Em seu trabalho, Oliveira (2004), define um composto orgânico como: “[...] o material obtido da compostagem. Possui cor escura, é rico em húmus e contém de 50% a 70% de matéria orgânica. É classificado como adubo orgânico, pois é preparado a partir de esterco de animais e/ou restos de vegetais que, em estado natural, não têm valor agrícola.”

A matéria orgânica pode ser definida como um conjunto de resíduos de origem vegetal ou animal que existe no solo em diferentes estados de decomposição. Pode incluir compostos como: i) moléculas de alto peso molecular, como proteínas; ii) substâncias simples, como açúcares e aminoácidos; iii) substâncias húmicas. O composto orgânico, quando adicionado ao solo se torna parte da matéria orgânica do solo. Entretanto, como durante o processo de compostagem a maior parte dos açúcares, aminoácidos e outros compostos menos resistentes à decomposição já foram mineralizados, a principal importância do composto no solo é sua fração húmica (Epstein, 1997).

As substâncias húmicas não apresentam características químicas e físicas bem definidas, e se dividem em ácidos húmicos, ácidos fúlvicos e huminas, com base nas suas características de solubilidade. As substâncias húmicas, naturalmente encontradas no solo, têm papel fundamental na produção das culturas. Elas representam fonte de lenta liberação de nutrientes para a nutrição de plantas (principalmente nitrogênio, fósforo e potássio), contribuem com a maior parte da Capacidade de Troca Catiônica dos solos, possuem a habilidade de formar complexos com vários íons metálicos e agem como tamponantes da reação do solo em uma ampla faixa de pH. Essas características as tornam um dos principais fatores que governam a dinâmica e disponibilidade dos nutrientes no solo (Borsari, 2013).

A compostagem pode ser entendida como um processo controlado de decomposição microbiana, de oxidação e oxigenação de uma massa heterogênea de matéria orgânica (Kiehl, 1985; Teixeira, 2002). Nesse processo ocorre uma aceleração da decomposição aeróbica dos resíduos orgânicos por populações microbianas, concentração das condições ideais para que os micro-organismos decompositores se desenvolvam (temperatura, umidade, aeração, pH, tipo de compostos orgânicos existentes e tipos de nutrientes disponíveis), pois utilizam essa matéria orgânica como alimento e

sua eficiência baseia-se na interdependência e inter-relacionamento desses fatores (Teixeira, 2002). O processo é caracterizado por fatores de estabilização e maturação que variam de poucos dias a várias semanas, dependendo do ambiente (Oliveira, 2004).

Na Figura 1, é possível observar a quantidade de resíduos tratados por habitante por ano em diversos países do continente europeu. Este processamento se dá por meio de tratamentos biológicos como a compostagem e digestão anaeróbica de materiais orgânicos, ressaltando a defasagem de Portugal em relação a outros países que compõem o bloco.

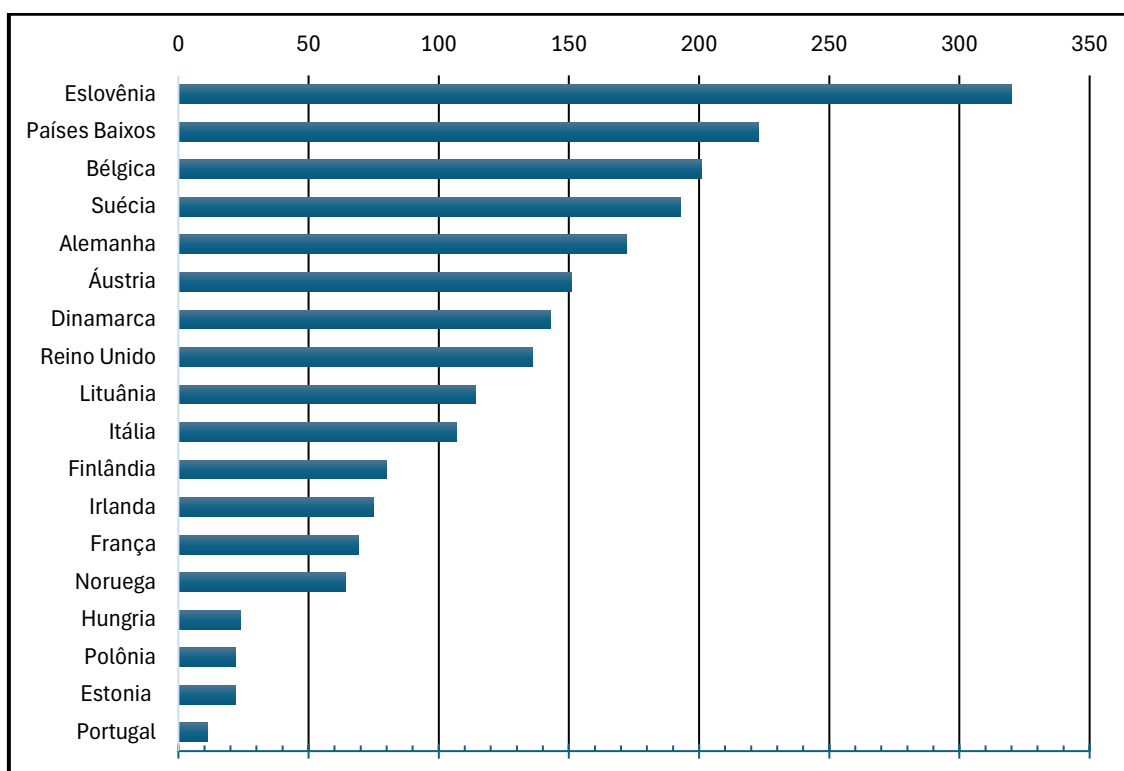


Figura 1. Quantidade de bioresíduos tratados em alguns países europeus (kg/habitante/ano) (Adaptado de ECN Status Report, 2019).

Os fertilizantes orgânicos melhoram a estrutura, a química e a atividade biológica do solo ao fornecer nutrientes e contribuem para a qualidade do solo. Eles são conhecidos pela liberação gradual de nutrientes e aumento do teor de matéria orgânica no solo (Sarkar et al., 2003).

Outro benefício do aumento do uso de materiais orgânicos é que isso pode ajudar a resolver problemas de poluição causados por resíduos agroindustriais (Siavoshi, 2011). No entanto, o solo não deve ser visto como um depósito de resíduos orgânicos. Se for aplicado excesso de fertilizante nitrogenado, seja na forma de matéria orgânica ou fertilizante químico, parte do nitrogênio excedente é convertida em nitratos ( $\text{NO}_3^-$ ), que são prejudiciais à saúde humana (Preap et al., 2002).

Dessa forma, assim como os fertilizantes químicos, os fertilizantes orgânicos devem ser utilizados com cautela, respeitando os limites de cada tipo de solo e do potencial de resposta de cada cultura.

### **3.5 Ciclo do Nitrogênio**

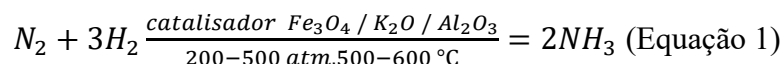
O nitrogênio é um elemento essencial requerido por todos os organismos vivos e, frequentemente, limita a produção primária em ecossistemas aquáticos e terrestres. Este elemento é necessário em grandes quantidades, uma vez que é componente essencial de proteínas, ácidos nucleicos e de outros constituintes celulares. As proteínas sozinhas compreendem 60 % ou mais do nitrogênio das plantas e de células microbianas (Vieira, 2017). Entre os 17 elementos considerados vitais para o desenvolvimento das plantas, o nitrogênio se destaca por ser um componente fundamental de macromoléculas celulares, como proteínas e ácidos nucleicos, que são indispensáveis para o crescimento e reprodução vegetal (YAGÜE, 1994).

Na litosfera, o nitrogênio encontra-se predominantemente incorporado às rochas, aos sedimentos e ao leito oceânico, compondo a crosta terrestre, que armazena cerca de 98% do nitrogênio disponível no planeta. Em contraste, a atmosfera terrestre, onde o elemento está presente majoritariamente na forma de gás diatômico ( $N_2$ ), representa cerca de 78% do volume do ar atmosférico e contém um volume de nitrogênio aproximadamente um milhão de vezes superior ao existente na biomassa viva. No entanto, apesar de sua abundância atmosférica, o nitrogênio constitui o nutriente mais limitante para o desenvolvimento das plantas. Isso se deve à grande estabilidade da molécula de  $N_2$ , cuja ligação tripla covalente ( $N\equiv N$ ) dificulta sua utilização direta pela maioria dos organismos vivos. A quebra dessa ligação exige um elevado aporte energético, sendo necessária sua conversão em formas assimiláveis para que o elemento possa ser incorporado aos sistemas biológicos (Vieira, 2017).

Após a Segunda Guerra Mundial, os fertilizantes nitrogenados foram amplamente utilizados para aumentar a produtividade das culturas. O uso de fertilizantes sintéticos de nitrogênio eliminou uma grande limitação em relação ao enriquecimento do estoque de carbono e nitrogênio orgânicos no solo, que anteriormente era manejado por meio da adição de esterco orgânico, culturas leguminosas e períodos de pousio. A formação de

amônia e, conseqüentemente, de fertilizantes sintéticos de nitrogênio pelo processo Haber–Bosch foi uma das invenções mais importantes do século XX, permitindo a produção de alimentos para quase metade da população mundial (Erisman et al., 2008; Martinelli et al., 2008).

A reação química do processo Haber-Bosch descoberta pelo cientista alemão Fritz Haber e patenteada em 1908 é descrita na equação 1, onde a amônia (NH<sub>3</sub>) é formada a partir do hidrogênio (H<sub>2</sub>) que pode ser proveniente do gás natural e o gás dinitrogênio atmosférico (N<sub>2</sub>), sob altas temperaturas e pressão.



Como consequência, houve uma escalada dramática no consumo global de nitrogênio sintético, passando de 11,6 Tg (1Tg = 10<sup>9</sup> kg) em 1961 para 104 Tg em 2006 (Hoang e Allaudin, 2010; Mulvaney et al., 2009).

Em 40 anos, a quantidade de fertilizantes minerais nitrogenados aplicados às culturas agrícolas aumentou 7.4 vezes, enquanto o aumento geral da produtividade foi de apenas 2.4 vezes (Tilman, 2004). Isso significa que a eficiência do uso do nitrogênio, que pode ser definida como o rendimento obtido por unidade de nitrogênio disponível no solo (nitrogênio fornecido pelo solo + fertilizante nitrogenado), diminuiu drasticamente (Hirel et al., 2011).

Conforme ilustrado na Figura 2, a FAO indica que os principais países dependentes da produção de fertilizantes inorgânicos nitrogenados para suas atividades agrícolas são China, Índia, Estados Unidos e Brasil, todos com um consumo superior a 5 Mt em 2022.

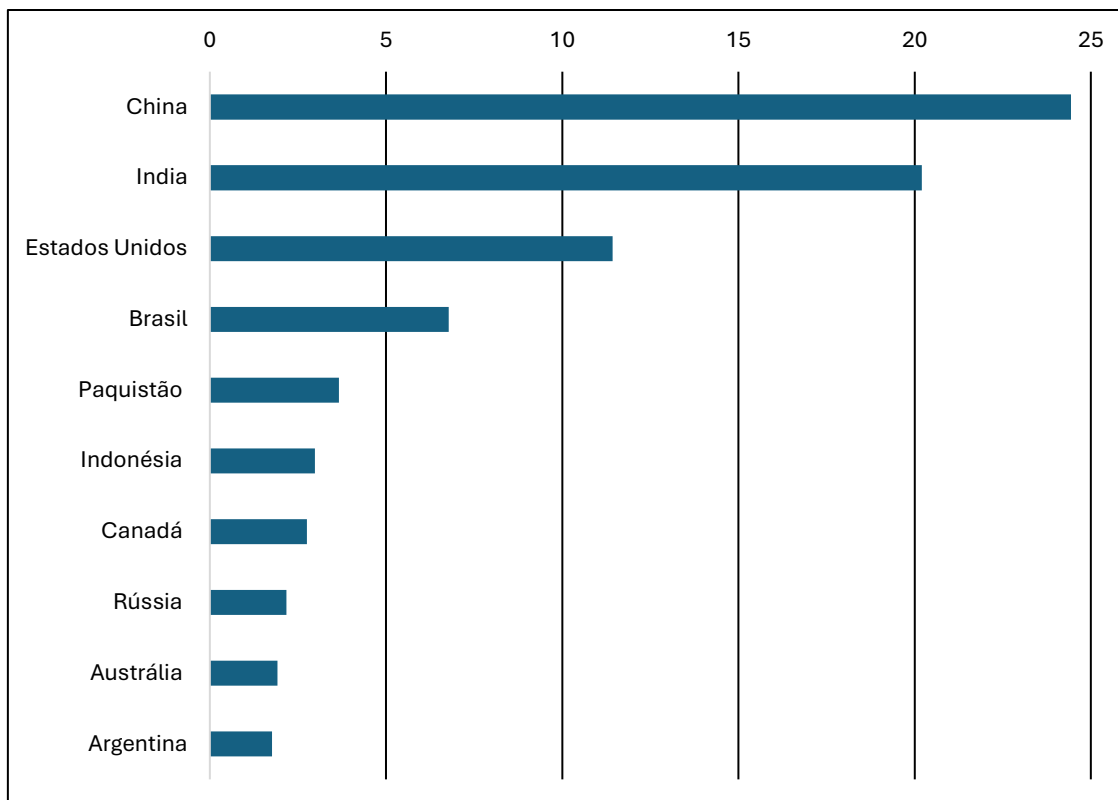


Figura 2. Quantidade total de fertilizantes nitrogenados utilizados no setor agrícola por país (Mt) (Adaptado de FAOSTAT, 2022)

No solo, o nitrogênio pode ser encontrado em duas formas principais, a orgânica e a inorgânica. A fração orgânica é predominante, correspondendo a aproximadamente 95% do nitrogênio total presente no solo. Esse nitrogênio está incorporado em resíduos de plantas e animais em diferentes estágios de decomposição, o que significa que não está imediatamente acessível para as plantas. Para que se torne disponível, é necessário que ocorra uma série de processos bioquímicos, como a decomposição e a mineralização, conduzidas por microrganismos (Yague, 1994). Assim, embora o nitrogênio orgânico não seja prontamente assimilável pelas plantas, ele atua como uma reserva de longo prazo desse nutriente no solo.

A mineralização do nitrogênio orgânico, também chamada de amonificação, é um processo enzimático no qual as formas orgânicas de nitrogênio são convertidas em formas inorgânicas disponíveis para as plantas, sendo desenvolvida por microrganismos heterotróficos, aeróbios e anaeróbios que fazem uso dos resíduos vegetais como fonte de carbono, nitrogênio e energia (Vieira, 2017).

As formas inorgânicas de nitrogênio estão presentes em menor quantidade nos solos. Dentre elas, as formas iônicas são as mais encontradas, sobretudo amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) (Malavolta, 2006).

No entanto, o amônio que é produzido pela mineralização do material orgânico não costuma se acumular nos solos, tendo em vista que após sua formação rapidamente decorre o processo de nitrificação, que oxida o íon amônio em nitrito e subsequentemente em nitrato (Lewis, 1986). Esse processo é realizado por microrganismos quimioautotróficos, que utilizam o gás carbônico como fonte de carbono e obtêm energia por meio da oxidação química. Durante a nitrificação, o amônio atua como doador de elétrons, enquanto o oxigênio (O<sub>2</sub>) funciona como acceptor de elétrons (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006; VIEIRA, 2017).

Para além dos processos de amonificação e nitrificação, também ocorre o processo de desnitrificação, que consiste na redução dissimilatória, realizada por bactérias essencialmente anaeróbicas, de um ou ambos os óxidos iônicos de nitrogênio (nitrato e nitrito) para os óxidos gasosos (óxido nítrico e óxido nitroso), que podem, por sua vez, ser ainda mais reduzidos a dinitrogênio (Knowles, 1982).

O interesse na desnitrificação existe por vários motivos. Primeiro, é um dos principais mecanismos de perda de nitrogênio de fertilizantes, reduzindo sua eficiência de uso. Segundo, tem grande potencial de aplicação na remoção de nitrogênio de resíduos com alto teor de nitrogênio, como os de origem animal. Terceiro, a desnitrificação é um processo importante que contribui para a liberação de óxido nitroso na atmosfera, onde participa de reações estratosféricas que levam à depleção do ozônio. Quarto, é o mecanismo pelo qual o ciclo global do nitrogênio se mantém equilibrado (Knowles, 1982).

A nitrificação e a desnitrificação podem ocorrer simultaneamente nos solos, atuando como fontes de óxido nitroso para a atmosfera. A emissão desse gás está diretamente relacionada às condições ambientais, incluindo temperatura, umidade, textura do solo, pH, aplicação de fertilizantes nitrogenados, entre outros fatores (Vieira, 2017).

Em contrapartida aos processos resultantes da degradação de resíduos orgânicos, a fixação biológica de nitrogênio é o processo pelo qual microrganismos procarióticos, que possuem o sistema enzimático nitrogenase, convertem o gás dinitrogênio atmosférico em amônia por meio de sua redução. Esses microrganismos podem viver de forma independente no solo ou estabelecer associações com plantas em diferentes níveis de complexidade. No caso das associações simbióticas, eles podem atender parcial ou totalmente às necessidades de nitrogênio das plantas hospedeiras (Vieira, 2017; Resende, 2002).

A família das plantas leguminosas é a mais reconhecida pela realização da fixação biológica de nitrogênio, sendo este um processo chave para a sustentabilidade agrícola, por conta do reduzido impacto ambiental deste processo biológico quando comparado a utilização de fertilizantes nitrogenados. A fixação biológica de nitrogênio em plantas da família Fabaceae ocorre pela associação simbiótica das plantas com bactérias coletivamente chamadas de rizóbio, que formam estruturas especializadas nas raízes denominadas de nódulos, capazes de transformar o nitrogênio atmosférico em amônia assimilável pelas plantas.

Por fim, além dos processos previamente mencionados, a volatilização da amônia, proveniente tanto da mineralização da matéria orgânica quanto da aplicação de fertilizantes, juntamente com a lixiviação e a erosão, são fatores fundamentais a serem considerados para o equilíbrio dos níveis do nitrogênio. Essa preocupação é particularmente relevante em solos agrícolas, onde a deposição de nitrogênio ocorre de forma mais intensa e onde o equilíbrio deste elemento impacta diretamente na produtividade das culturas.

### **3.6 Condicionadores de solo**

De acordo com a Sociedade Americana de Ciência do Solo (Soil Science Society of America, 2025), um condicionador de solo pode ser definido como um material que melhora de forma mensurável características físicas específicas do solo ou processos físicos para um determinado uso ou como meio de crescimento para plantas. Exemplos incluem serragem, turfa, composto, polímeros sintéticos e diversos materiais inertes. Oliveira et al. (2013) vai além do âmbito físico, definindo os condicionadores como materiais utilizados para a restauração da fertilidade dos solos desgastados, proporcionando equilíbrio físico, químico e biológico do solo.

Dentre os principais condicionadores de solo, podem ser citados a matéria orgânica, o calcário, o gesso agrícola, a hidroxiapatita e outras fontes solúveis de P, materiais ricos em Fe ou Mn, argilas, ou até mesmo biossólidos com concentrações reduzidas de metais (Almeida, 2008; Boisson et al., 1999; Hamon et al., 2002; Brown et al., 2005; Silveira et al., 2008).

Para além disso, Madari et al. (2006) citam o carvão vegetal como um promissor condicionador de solo, podendo reduzir a necessidade de fertilizantes químicos e aumentar a segurança na produção da cultura do arroz.

### 3.6.1 Biochar

Similar ao carvão vegetal, o biochar é um condicionador de solo que ganhou muita visibilidade nas últimas décadas, a partir da identificação da designada “Terra Preta” na Amazônia. Esta terra foi utilizada por algumas tribos, sendo caracterizada por grandes manchas de terras enriquecidas com biomassa carbonizada pelos agricultores. Algumas destas manchas negras e férteis presume-se que tenham 7000 anos, contendo três vezes mais N e P que os solos circundantes e 18 vezes mais matéria orgânica (Lal, 2009; Nóbrega, 2011), fazendo com que estas manchas possuíssem um potencial produtivo muito acima dos tipos de solos predominantes na região.

O biochar é produzido pela chamada decomposição térmica de material orgânico sob fornecimento limitado de oxigênio (O<sub>2</sub>) e em temperaturas relativamente baixas (<700 °C), em um processo denominado de pirólise (Lehmann e Joseph, 2003). Em contraste com o biochar rico em carbono orgânico, a queima de biomassa em uma fogueira gera cinzas, que contêm principalmente minerais como cálcio ou magnésio e carbonatos inorgânicos.

Por conta desta grande quantidade de carbono e do processo em que a biomassa é submetida, o biochar é altamente poroso, normalmente alcalino e apresenta grande área superficial específica. Seus poros são formados durante a decomposição térmica, principalmente quando a biomassa é perdida por volatilização dos compostos carbonáceos e podem ser classificados em: i) microporos, que contribuem para a elevada área superficial do material, aumentando a capacidade de adsorção de pequenas moléculas e gases; ii) mesoporos, que atuam na adsorção de sólido-líquidos; e iii) macroporos, que afetam o movimento de água e ar e servem de habitat para micro-organismos (Downie et al, 2009; Verheijen et al., 2010).

Por conta desta alta porosidade, há um aumento na área de superfície específica de um solo quando o biochar é aplicado, tendo em vista que este valor pode atingir até 400 m<sup>2</sup> g<sup>-1</sup> (Petter et al., 2016). A capacidade de troca catiônica está relacionada à área de

superfície específica, mas é altamente dependente de sítios quimicamente reativos (Petter et al., 2016). No caso do biochar, esses sítios vão se formando ao longo dos anos ao passo que as partículas são atacadas por microrganismos no solo, alterando as características químicas e físicas de superfície (Ofri et al., 2006). Essas alterações segundo estes autores, se dão pelo aumento de cargas elétricas oriundas da oxidação dos compostos bioquímicos, levando a um aumento no número de compostos fenólicos, hidroxílicos, carbonílicos e quinonas e, conseqüentemente, a um aumento no número de cargas negativas resultante da substituição pelas cargas positivas no processo de oxidação. Esta é uma das teorias para o aumento da CTC ao longo do tempo em solos onde o biochar é aplicado.

Além disso, o biochar possui uma forte estrutura aromática e é por isso bioquimicamente mais recalcitrante (de difícil degradação) que muitas outras formas de matéria orgânica no solo (Nóbrega, 2011), podendo chegar em uma estabilidade de até mil anos em ambiente natural (Beesley et al., 2010).

### **3.7 PLANTAS INDICADORAS**

As plantas indicadoras escolhidas para este trabalho foram a aveia e o trevo-encarnado. A escolha se baseou nas marcantes diferenças morfológicas entre as duas espécies, o que possibilita uma avaliação mais abrangente dos efeitos dos tratamentos e torna os resultados potencialmente aplicáveis a uma maior diversidade de sistemas agrícolas.

#### **3.7.1 Aveia e suas necessidades específicas de fertilização**

As gramíneas são plantas constituídas por um conjunto de órgãos (inflorescência, folha, colmo e raiz), cada um formado por tecidos específicos. Estes, por sua vez, são constituídos por um conjunto de células com características químicas e estruturais próprias (Paciullo, 2002).

A aveia-comum (*Avena sativa* L.), também conhecida como aveia-branca, é uma gramínea anual pertencente à família Poaceae, tribo Aveneae e gênero *Avena*. Tal gênero compreende várias espécies silvestres, daninhas e cultivadas distribuídas em seis continentes (Gutkoski e Pedó, 2000). A aveia é cultivada ao redor de todo o mundo para alimentação humana, alimentação animal, como planta forrageira, como planta de cobertura e planta de rotação (Bai et al., 2018).

Mundialmente, a produção deste cereal atingiu 19,46 milhões de toneladas métricas (USDA, 2025), tendo como principais regiões produtoras a União Europeia, Rússia, Canadá, Austrália e Brasil. O cultivo da aveia acontece principalmente em regiões de alta latitude ou em áreas expostas a condições adversas como baixa fertilidade, baixa oferta hídrica e salinidade de solos, por conta do menor potencial de lucratividade da cultura quando comparada a cereais como o trigo ou milho, como evidenciado em Bai et al. (2018). A alimentação humana baseada em aveia é considerada saudável pelos altos índices de fibra em sua composição, especialmente o beta-glucano (Villaluenga e Peñas, 2017).

A aveia continua sendo uma cultura de grão importante para populações em ecologias marginais em todo o mundo em desenvolvimento e, em economias desenvolvidas, para usos especializados. Em muitas partes do mundo, a aveia é cultivada tanto para o uso como grão quanto para forragem e ração, além de palha para cama de animais, feno, pré-secado e silagem (Ahmad, 2014).

De forma geral, o fator que mais influencia a produtividade das pastagens é a adubação nitrogenada, pois o nitrogênio é o nutriente mais limitante ao crescimento das plantas (Malavolta, 1980). Quando outros elementos não são limitantes, as gramíneas temperadas podem apresentar resposta à adubação nitrogenada (Moreira et al., 2001).

Para sua fertilização, esperando uma produção média de 4 toneladas por hectare de cultivo, o Manual de Fertilização das Culturas, publicado em Portugal (Veloso et al., 2022), recomenda doses de 140 kg de N por hectare, além de 0 a 120 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por hectare e 0 a 70 kg de K<sub>2</sub>O por hectare, de acordo com os níveis destes nutrientes no solo. A adubação com nutrientes não mencionados acima é duvidosa para os níveis de produção normalmente atingidos, dessa forma, só se faz necessária a aplicação caso os sintomas de deficiência de nutrientes estejam claros. Além disso, o manual ressalva que se deve sempre dar atenção ao parcelamento da adubação nitrogenada, evitando possíveis perdas do nutriente. Para isso, na semeadura não se deve exceder a dose de 30 kg de N por

hectare, parcelando o restante da adubação em uma ou duas coberturas, nos estádios de afilamento e encanamento da cultura.

Para o sul do Brasil, a adubação nitrogenada para produção de grãos de aveia considera a expectativa de rendimento e a cultura anterior (gramínea ou leguminosa). Para tetos de rendimento superiores a 4 t/ha, a dose de N pode atingir 70 kg/ha, sendo que parte disso é aplicado na semeadura e o restante no perfilhamento da aveia. As adubações fosfatadas e potássicas variam de 0 a 100 kg/ha de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e de 0 a 70 kg/ha de K<sub>2</sub>O, respectivamente (NEPAR-SBCS, 2019).

### 3.7.2 Trevo-encarnado e suas necessidades específicas de fertilização

As leguminosas constituem uma família da classe das Dicotiledôneas, muito rica em espécies úteis ao homem. Abrigam plantas de pequeno porte, arbustos e árvores com folhas compostas. Entre as plantas de pequeno porte estão alfafa (*Medicago sativa* L.), cornichão (*Lotus corniculatus* L.), ervilha (*Pisum sativum* L.), ervilhaca (*Vicia sativa* L.), soja [*Glycine max* (L.) Merrill.] e trevos (*Trifolium* spp.), além de outras espécies. As flores podem ser hermafroditas, pentâmeras (na maioria), tetrâmeras ou trímeras, com cálice persistente e corola caduca. O fruto é um legume. O embrião tem dois cotilédones, por ocasião da germinação (Fontanelli, 2009).

As leguminosas possuem o mecanismo simbiótico mais sofisticado e eficiente entre as associações de plantas superiores com bactérias fixadoras de N<sub>2</sub> e as leguminosas de grão e forrageiras têm papel importante na agricultura (Döbereiner, 1990). A fixação biológica de nitrogênio é um processo crítico e fundamental na gestão sustentável do solo, sendo o nitrogênio o nutriente que mais frequentemente limita a produção agrícola (Hungria, 2000).

O trevo-encarnado (*Trifolium incarnatum* L.) é uma planta herbácea da família das leguminosas (Fabaceae), sendo uma espécie de crescimento ereto e adaptada a climas temperados. Geralmente atinge uma altura de 60 cm, com o período de crescimento mais ativo ocorrendo no início e no meio da primavera. O trevo-encarnado também possui uma raiz pivotante com muitas raízes laterais finamente ramificadas, o que lhe permite extrair água das camadas mais profundas do perfil do solo e ajudá-lo a superar períodos de estresse hídrico (Hackney, 2007; Mathews, 2013).

Com seu crescimento rápido e vigoroso, o trevo-encarnado pode fornecer nitrogênio no início da primavera para culturas de ciclo completo, quando semeado antes do inverno. O rápido crescimento no outono, ou no verão em áreas de clima frio, também o torna uma excelente opção para nichos de rotação curta, atuando como adubo verde e supressor de ervas daninhas, além de também poder atuar como planta de cobertura, no enriquecimento da alimentação animal e na redução da erosão e degradação dos solos (Clark, 2007; Mathews, 2013).

Por conta de sua capacidade de fixação biológica de nitrogênio, por meio de bactérias do gênero *Rhizobium* que inoculam suas raízes, formando nódulos, a fertilização nitrogenada na cultura normalmente não é necessária, visto que as plantas conseguem obter nitrogênio suficiente por meio da fixação biológica, além de que a adubação nitrogenada pode suprimir a formação de nódulos (Gardner et al, 1983; Hungria e Vargas, 2000).

Para os demais nutrientes essenciais, a manutenção destes em níveis médios tipicamente trabalhados em cultivos anuais tende a ser suficiente para o bom desenvolvimento da cultura. No entanto, como evidenciado por Shaefer et al. (2023) e Garcia et al. (2013), é necessário prestar atenção no micronutriente molibdênio, essencial para a formação dos nódulos fixadores de nitrogênio nas raízes das plantas e, consequentemente, o bom desenvolvimento das mesmas. Para além do molibdênio, os mesmos autores destacam a importância do cobalto, que apesar de não ser um elemento essencial as plantas, é considerado como benéfico (Costa, 2024).

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização do local de estudo

O experimento foi realizado na área exterior das estufas da Escola Superior Agrária de Bragança (ESAB), com coordenadas geográficas de latitude  $41^{\circ}47'50''\text{N}$ , longitude de  $6^{\circ}45'42''\text{W}$  e altitude de 686 metros. Como pode ser visto na Figura 3, por mais que o ensaio tenha sido desenvolvido em vasos, estes ficaram ao ar livre, sobre a ação do clima local.



Figura 3. Localização do local onde se decorreu o ensaio (Fonte: Google Earth)

### 4.2 Caracterização do solo e clima

#### 4.2.1 Solo

O solo utilizado no experimento foi coletado manualmente no dia 24 de outubro de 2024 na área adjacente as estufas em profundidade de 0 a 20 cm, sendo misturado e

passado por um crivo de modo a retirar as partículas grosseiras, para então ser colocado em vasos de 16 centímetros de diâmetro (Figura 4).



*Figura 4. Crivo (esquerda) e vasos utilizados para a coleta de solo (direita)*

#### 4.2.2 Clima

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger, a região de Bragança tem um clima classificado como Csb, caracterizado por invernos chuvosos e úmidos e verões frescos, com forte influência mediterrânica. A temperatura média anual é de 12,3°C e a precipitação média é de 772,7 mm ao ano (IPMA, 2024).

Para uma melhor descrição das condições climáticas as quais o ensaio foi submetido, dados coletados da Estação Climatológica da Escola Superior Agrária de Bragança foram compilados na Figura 5, compondo os meses em que o experimento se desenvolveu ao ar livre (novembro a abril).

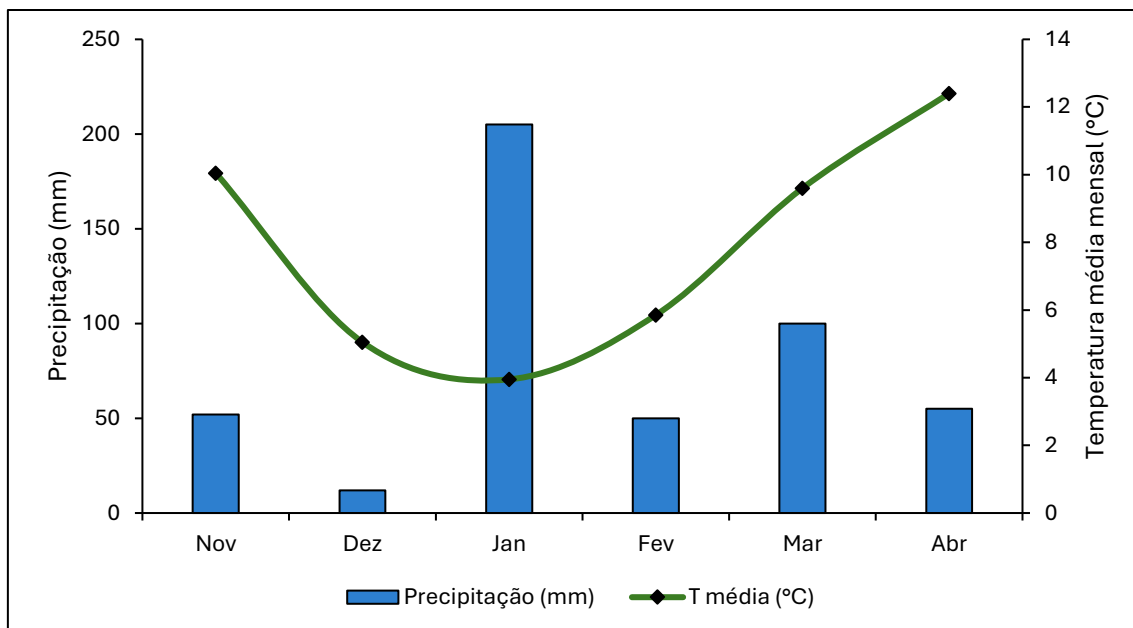


Figura 5. Climograma do período de novembro de 2024 a abril de 2025 do local de estudo (Fonte: Estação Climatológica da ESAB)

### 4.3 Descrição do experimento

Neste experimento foram utilizadas duas diferentes plantas, o trevo-encarnado e a aveia, com quatro tratamentos, além da testemunha, sendo eles: (1) composto orgânico isolado, (2) nitrato de amônio 20,5% isolado, (3) biochar isolado e (4) biochar associado ao nitrato de amônio. As doses de composto orgânico e biochar foram calculadas para serem equivalentes a  $10 \text{ t ha}^{-1}$ , já o nitrato de amônio 20,5% foi calculado para equivaler a  $60 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrogênio, dividido em duas aplicações, sendo a primeira com dosagem equivalente de  $20 \text{ kg de N ha}^{-1}$  e a segunda na dosagem de  $40 \text{ kg de N ha}^{-1}$ .

### 4.4 Análises laboratoriais do solo, composto orgânico e biochar

Por se tratar de um solo onde comumente são realizados cultivos de plantas hortícolas, de forma geral, o mesmo apresenta características de boa fertilidade, como pH de 6,44, teor médio de matéria orgânica e disponibilidade de nutrientes equilibrada. O solo está classificado como Regossolo êutrico, de textura franco-arenosa, com suas

características detalhadas sendo descritas na Tabela 1. Os resultados expostos são a média de três análises realizadas.

Tabela 1. Propriedades iniciais do solo utilizado no ensaio

Propriedade	Média $\pm$ desvio padrão
pH (H <sub>2</sub> O)	6,44 $\pm$ 0,03
pH (KCl)	5,49 $\pm$ 0,06
Matéria Orgânica (g kg <sup>-1</sup> )	20,02 $\pm$ 0,08
Areia (%)	57,10
Limo (%)	24,60
Argila (%)	18,30
Textura (USDA)	Franco-arenoso
Fósforo extraível (mg kg <sup>-1</sup> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	71,81 $\pm$ 4,48
Potássio extraível (mg kg <sup>-1</sup> , K <sub>2</sub> O)	134,33 $\pm$ 6,66
Sódio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,20 $\pm$ 0,04
Cálcio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	11,42 $\pm$ 0,49
Magnésio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	4,13 $\pm$ 0,27
Alumínio (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	0,30 $\pm$ 0,00
CTCe (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> )	16,37 $\pm$ 0,81
Boro (mg kg <sup>-1</sup> )	0,84 $\pm$ 0,39
Ferro (mg kg <sup>-1</sup> )	108,31 $\pm$ 2,47
Zinco (mg kg <sup>-1</sup> )	3,40 $\pm$ 0,18
Cobre (mg kg <sup>-1</sup> )	82,40 $\pm$ 8,76
Manganês (mg kg <sup>-1</sup> )	125,36 $\pm$ 10,86

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise do composto orgânico utilizado, originado da planta jacinto-de-água (*Eichhornia crassipes*). Os valores correspondem à média de duas análises laboratoriais realizadas.

Tabela 2. Propriedades do composto orgânico utilizado

Propriedade	Média ± desvio padrão
Carbono (%)	36,66 ± 1,28
Nitrogênio (%)	2,36 ± 0,07
Fósforo (%)	0,36 ± 0,05
Potássio (%)	2,48 ± 0,69
Cálcio (%)	2,46 ± 0,74
Magnésio (%)	0,37 ± 0,08
Boro (mg kg <sup>-1</sup> )	43,78 ± 5,62
Cobre (mg kg <sup>-1</sup> )	54,94 ± 15,70
Ferro (mg kg <sup>-1</sup> )	4805,14 ± 732,84
Zinco (mg kg <sup>-1</sup> )	217,29 ± 109,54
Manganês (mg kg <sup>-1</sup> )	610,30 ± 110,51
Níquel (mg kg <sup>-1</sup> )	10,32 ± 0,94
Chumbo (mg kg <sup>-1</sup> )	3,84 ± 0,31
Cromo (mg kg <sup>-1</sup> )	14,57 ± 0,30
Cádmio (mg kg <sup>-1</sup> )	0,31 ± 0,12
Condutividade (µS)	3,04 µS ± 0,01
pH (H <sub>2</sub> O)	7,45 ± 0,42
Umidade (%)	22,06 ± 0,26

Em relação ao biochar, as análises seguiram o mesmo protocolo adotado para o composto orgânico. Suas propriedades estão descritas na

Tabela 3, e os resultados correspondem à média de duas determinações laboratoriais.

Além do composto orgânico e do biochar, o delineamento experimental incluiu tratamentos com nitrato de amônio. Por se tratar de um fertilizante mineral de síntese de composição conhecida, contendo exclusivamente nitrogênio na concentração de 20,5%, não foi necessária a realização de análises laboratoriais para esse insumo, uma vez que as empresas responsáveis pela sua produção garantem a pureza e a conformidade do produto com os padrões estabelecidos.

Tabela 3. Propriedades do biochar utilizado

Propriedade	Média ± desvio padrão
Carbono (%)	49,06 ± 3,83
Nitrogênio (%)	0,55 ± 0,07
Fósforo (%)	0,08 ± 0,01
Potássio (%)	0,38 ± 0,03
Cálcio (%)	0,45 ± 0,04
Magnésio (%)	0,18 ± 0,02
Boro (mg kg <sup>-1</sup> )	31,53 ± 4,32
Cobre (mg kg <sup>-1</sup> )	47,64 ± 34,73
Ferro (mg kg <sup>-1</sup> )	4634,00 ± 1476,64
Zinco (mg kg <sup>-1</sup> )	34,60 ± 10,59
Manganês (mg kg <sup>-1</sup> )	376,81 ± 16,52
Níquel (mg kg <sup>-1</sup> )	697,16 ± 294,29
Chumbo (mg kg <sup>-1</sup> )	12,89 ± 5,55
Cromo (mg kg <sup>-1</sup> )	16,16 ± 10,19
Cádmio (mg kg <sup>-1</sup> )	2,59 ± 0,18
Condutividade (mg kg <sup>-1</sup> )	284,00 µS ± 8,49
pH (H <sub>2</sub> O)	9,24 ± 0,11
Umidade (%)	34,68 ± 1,06

#### 4.5 Instalação e condução do experimento

Inicialmente, nos tratamentos com aplicação de biochar e composto orgânico, todo o conteúdo dos vasos foi transferido para um balde de maior volume, permitindo a incorporação completa desses materiais ao solo, conforme ilustrado na Figura 6. Já o nitrato de amônio foi distribuído e incorporado de forma homogênea sobre a superfície dos vasos. Considerando sua alta solubilidade e propensão à lixiviação, essa estratégia foi adotada para favorecer uma maior absorção do nutriente pelas plantas nas fases iniciais de seus desenvolvimentos.

Após a aplicação dos diferentes tratamentos ao solo, os vasos foram identificados e organizados em uma bancada aquecida, dentro de uma estufa com aclimação controlada, para favorecer a germinação das sementes (Figura 6).



Figura 6. Incorporação dos tratamentos no solo (esquerda) e organização dos vasos em bancada aquecida (direita)

A experiência foi organizada no modelo de delineamento inteiramente casualizado, com três repetições, totalizando 30 vasos, sendo 15 vasos para cada espécie (Figura 7).

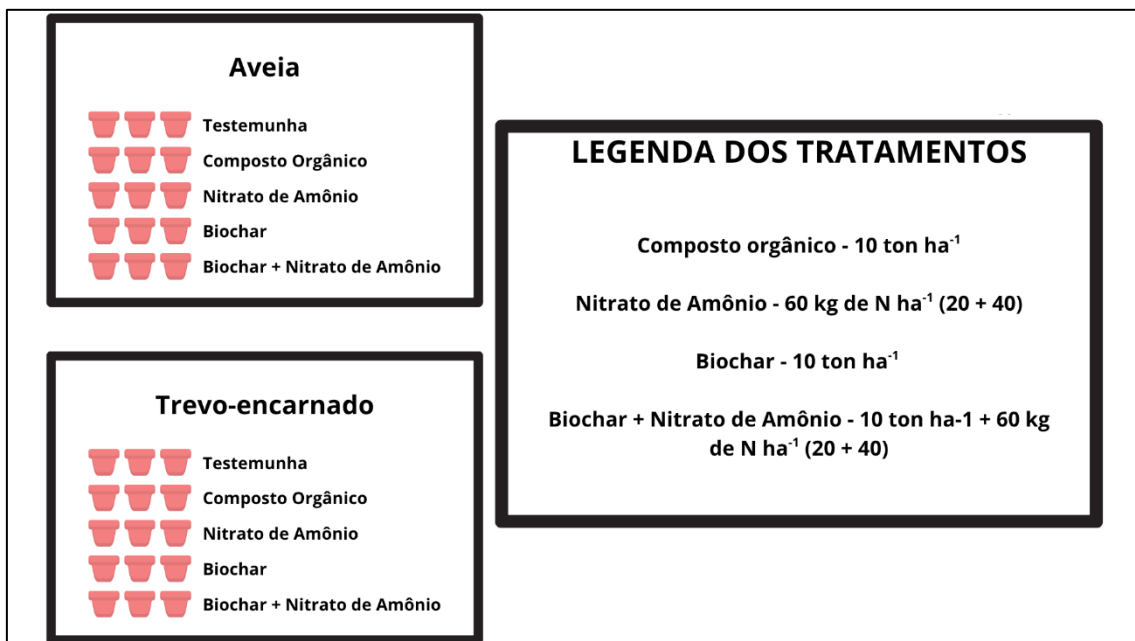


Figura 7. Croqui do experimento

O plantio das espécies aconteceu no dia 25 de outubro de 2024, sendo realizado de forma manual. As sementes foram dispostas homogeneamente sobre os vasos e enterradas conforme as recomendações de cada cultura, ou seja, de 0,5 a 1 cm para o trevo e de 3 a 4 cm para a aveia. Após o plantio, os vasos foram regados até a saturação do solo e a bancada de aquecimento foi ativada na temperatura de 20 °C. Além disso, as bandejas dos vasos foram colocadas sobre os mesmos para evitar perdas excessivas da umidade na camada superficial do solo e favorecer a germinação das culturas (Figura 8).



*Figura 8. Semeadura das espécies (esquerda) e colocação das bandejas sobre os vasos (direita).*

Assim, as bandejas foram retiradas de cima dos vasos logo após o início da germinação das espécies, com o objetivo de evitar o estiolamento das plântulas. Durante uma semana, os vasos permaneceram em ambiente controlado dentro da estufa, até que a maioria das sementes completasse o processo de germinação, neste período foi realizada a irrigação das culturas através dos aspersores presentes na bancada, evitando o desenvolvimento de crostas na camada superior do solo dos vasos.

Logo após a germinação da maior parte das sementes, os vasos foram organizados em uma área próxima as estufas sob a ação das condições climáticas locais, onde permaneceram até o fim do ensaio. Assim que as plantas se aclimataram com as condições

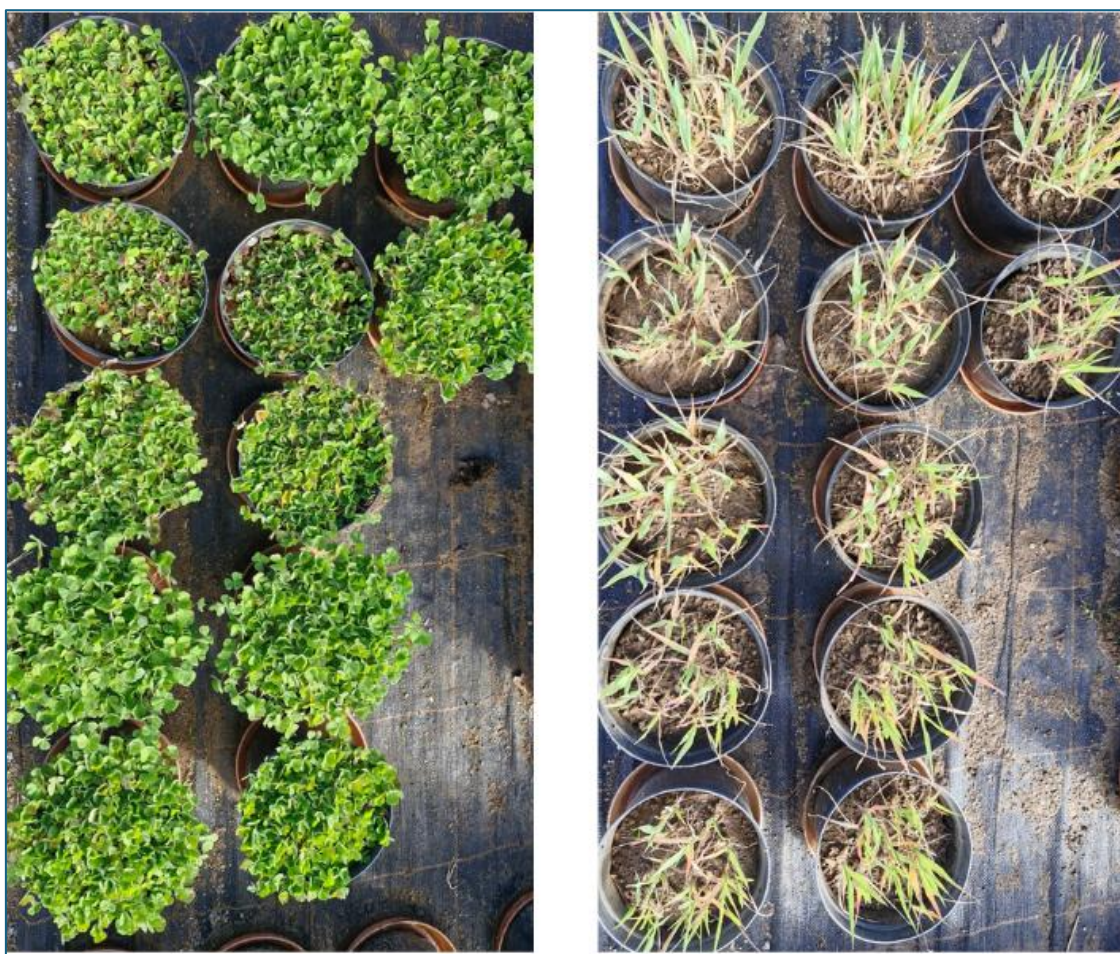
fora da estufa, as mesmas foram homogeneizadas quanto as suas quantidades em cada vaso (Figura 9).



*Figura 9. Condição das plantas no dia 11 de dezembro de 2024 (trevo-encarnado na esquerda e aveia na direita).*

Ao longo do ensaio, as irrigações foram realizadas de forma manual sempre que se constatava que o solo apresentava umidade insuficiente. A quantidade de água aplicada variava entre as plantas, considerando fatores ambientais e o porte de cada uma, uma vez que esses aspectos influenciam diretamente a taxa de transpiração. Além disso, plantas daninhas emergidas nos vasos eram prontamente removidas, a fim de evitar a competição por água e nutrientes com as espécies de interesse.

A segunda etapa de aplicação do nitrato de amônio decorreu no dia 24 de março de 2025, com adição do equivalente a  $40 \text{ kg de N ha}^{-1}$ , que quando somado aos  $20 \text{ kg de N ha}^{-1}$  utilizados inicialmente, totalizam  $60 \text{ kg de N ha}^{-1}$ . A condição das plantas no dia da segunda aplicação de nitrato pode ser observada na Figura 10.



*Figura 10. Condição das plantas no dia 24 de março de 2025 (trevo-encarnado na esquerda e aveia na direita).*

Assim, após a segunda aplicação de nitrato de amônio, as plantas continuaram a serem conduzidas até o dia 30 de abril, onde então foram cortadas para a realização das análises de matéria seca em laboratório.

#### **4.6 Parâmetros avaliados**

Neste experimento, foram avaliadas a produção de matéria seca vegetal das culturas do trevo-encarnado e aveia, bem como sua composição mineral. Além disso, foi avaliado também o efeito dos tratamentos sobre as características químicas do solo.

#### 4.6.1 Parâmetros avaliados no solo

##### 4.6.1.1 pH

O pH do solo foi determinado com a utilização de água e cloreto de potássio (KCl) na concentração de 1 M. Para sua determinação, utilizou-se uma relação de 1:2,5, ou seja, foram pesadas 10 gramas de solo para 25 mililitros de água e 10 gramas de solo para 25 mililitros de KCl. As suspensões foram agitadas durante duas horas para então serem analisadas pelo método da potenciometria, utilizando um potenciômetro de Mettler Toledo. Os resultados são o valor da acidez ativa do solo, tanto em H<sub>2</sub>O como em KCl.

##### 4.6.1.2 Determinação do carbono facilmente oxidável e do teor de matéria orgânica

Para a determinação do carbono facilmente oxidável foi utilizada a metodologia de Walkley-Black. Sendo assim, uma grama de solo foi pesada e depositada em um Erlenmeyer de 250 mililitros. Após isso, foi adicionado 10 mililitros de uma solução de dicromato de potássio e 20 mililitros de ácido sulfúrico. Após 30 minutos, foram adicionados 200 mililitros de água destilada, além de 4 gotas de fenantrolina, que serviu como indicador para se realizar a titulação. Na titulação, foi utilizada uma solução de ferro amoniacal na concentração de 0,5 M até que a cor da solução sofresse alteração.

Através deste método, é possível ser realizada a determinação do carbono facilmente oxidável e, conseqüentemente, o teor de matéria orgânica, que é resultado da multiplicação do valor do carbono facilmente oxidável pelo fator de 1,724. A utilização deste fator está associada a suposição de que a matéria orgânica do solo contém por volta de 58% de carbono.

##### 4.6.1.3 Determinação do fósforo e potássio

Para a determinação do fósforo e potássio disponíveis no solo utilizou-se a metodologia de Égner-Riehm. Sendo assim, inicialmente foram pesadas 2 gramas de solo as quais foram adicionados 40 mililitros de uma solução extrativa a base de lactato de amônio e ácido acético (proporção de 1:20 p/v). Após agitação por duas horas, a suspensão foi filtrada para a determinação do fósforo por espectrofotometria a 882 nanômetros utilizando um espectrofotômetro UV/VIS após o desenvolvimento de cor

pelo método do ácido ascórbico. O potássio por sua vez foi determinado por fotometria de chama, utilizando um equipamento espectrofotômetro de chama Jenway.

#### 4.6.1.4 Determinação do boro

A determinação do boro foi realizada através do método de água fervente na presença de cloreto de cálcio ( $\text{CaCl}_2$ ) na concentração de 0,1 M. Para isso, 10 gramas de solo foram pesadas e adicionadas a um saco plástico, onde então foram adicionados 20 mililitros da solução de cloreto de potássio. Após isso, os sacos plásticos foram selados e colocados em uma panela com água fervente por 10 minutos. Após o tempo determinado passar, os sacos foram retirados da água e colocados em uma bancada para arrefecer até que sua temperatura se equalizasse com a temperatura ambiente. Então, o conteúdo dos sacos foi filtrado para frascos de polietileno com a utilização de papel de filtro. Por fim, a determinação da concentração de boro no solo foi feita após o desenvolvimento de cor com Azometina-H e um espectrofotômetro no comprimento de onda de 420 nanômetros.

#### 4.6.1.5 Capacidade de troca catiônica

Para a determinação das bases de troca, foram pesadas 2,5 gramas de solo as quais foram adicionadas uma solução de acetato de amônio tamponizada ao pH de 7,0. Então, esta suspensão foi agitada por 30 minutos e logo após foi realizada sua filtragem. Através desta solução filtrada, os cátions  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Na}^+$  foram determinados utilizando um espectrofotômetro de absorção atômica Perkin Elmer.

A determinação do teor dos íons  $\text{Al}^+$  e  $\text{H}^+$  (acidez de troca) foi feita através da pesagem de 10 gramas de solo as quais foram adicionadas uma solução de 100 mililitros de cloreto de potássio a uma concentração de 1 M. Esta suspensão foi agitada durante 30 minutos e depois filtrada. A quantificação dos íons  $\text{Al}^+$  e  $\text{H}^+$  foi realizada após a titulação com uma solução de hidróxido de sódio na concentração de 0,1 M, tendo como indicador a fenolftaleína.

Por fim, o valor capacidade de troca de catiônica do solo pode ser obtido através da somatória dos centimols de cargas positivas dos íons  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Al}^+$  e  $\text{H}^+$ .

#### 4.6.1.6 Micronutrientes

A quantificação de micronutrientes foi realizada conforme o método proposto por Lindsay e Norvell (1978). Para a extração, foram utilizados 10 g de solo, que foram

homogeneizados com uma solução de DTPA e submetidos à agitação por um período de duas horas. Após esse tempo, a suspensão foi filtrada e os cátions presentes foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica. Todos os procedimentos analíticos adotados correspondem aos protocolos atualmente vigentes no Laboratório de Análises de Solos e Plantas da ESAB, conforme descrito pela FAO (2022).

#### 4.6.2 Parâmetros avaliados nos tecidos vegetais

As plantas foram cortadas em sua base no dia 30 de abril de 2025 e suas massas frescas foram pesadas em balança de precisão. Então, passaram por duas etapas de secagem, a primeira de dois dias em temperatura ambiente e a segunda em uma estufa de ventilação forçada a 60° C por 3 dias. Após a secagem, os tecidos vegetais foram pesados e triturados em um moinho FOSS Cyclotec 1093, com um crivo de 1 milímetro de malha, para então as análises subsequentes serem realizadas.

##### 4.6.2.1 Nitrogênio

Para a determinação do nitrogênio nos tecidos vegetais foi utilizada a metodologia química descrita por Bremner (1996), que consiste na pesagem de 1 grama de matéria seca dos tecidos e sua deposição em tubos de digestão. A estes tubos foram adicionados 15 mililitros de ácido sulfúrico concentrado (95%) e duas pastilhas de sulfato de cobre, que atuam como catalisador para a reação. A seguir, o equipamento aquece os tubos a 420 °C durante 80 minutos (transformação dos íons  $\text{NH}_4^+$  em  $\text{NH}_3$ ), após este período de digestão e arrefecimento, inicia-se o processo de leitura dos tubos de digestão no equipamento de Kjeldahl, com o processo de determinação do nitrogênio totalmente automatizado. Uma quantidade de hidróxido de sódio é adicionada ao tubo, juntamente com vapor de água. A amônia formada é arrastada pela corrente de vapor e conduzida a um frasco contendo uma solução receptora de ácido bórico, na qual está presente uma mistura de indicadores (verde de bromocresol e vermelho de metilo). Posteriormente, realiza-se a titulação com ácido clorídrico (Bremner, 1996).

#### 4.6.2.2 Fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, zinco, manganês

A determinação dos teores dos elementos fósforo, potássio, cálcio, magnésio, cobre, ferro, zinco e manganês foi dada por digestão com ácido nítrico. Para isso, 0.25 gramas de matéria seca do tecido vegetal foram pesadas e colocadas em tubos de digestão, onde então foram adicionados 10 mililitros de ácido nítrico, para então acontecer a digestão no equipamento de micro-ondas MARSXpress, que atinge temperaturas por volta dos 200°C. Esta digestão ocorre por um período de 30 minutos divididos em dois ciclos, com 5 minutos entre os ciclos para arrefecimento.

Então, os teores dos cátions dos nutrientes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$  e  $\text{Mn}^{2+}$ , foram determinados através da espectrofotometria de absorção atômica, no equipamento PYE Unicam PU 9100X. O fósforo por sua vez, foi determinado através da adição de uma solução de molibdato de amônio com ácido ascórbico, que induz o desenvolvimento da cor azul, para então ser determinado através das leituras de absorbância em um espectrofotômetro Genesys com um comprimento de onda de 882 nanômetros.

#### 4.6.2.3 Boro

A metodologia utilizada para a determinação de boro baseou-se na metodologia utilizando azometina, conforme descrito por Jones (2001). Essa metodologia consiste na pesagem de uma grama de matéria seca dos tecidos vegetais, que então foram adicionadas a cadinhos de porcelana, onde então 0,1 gramas de óxido de cálcio foram adicionadas e homogeneizadas. Em seguida, realizou-se a incineração do material, onde o mesmo foi colocado em uma mufla a 500°C por um período de 110 minutos. Após a incineração, os cadinhos foram colocados a temperatura ambiente para arrefecer e então 10 mililitros de ácido sulfúrico foram adicionados. A mistura foi agitada durante 30 minutos e filtrada para um tubo de ensaio. Em seguida, um mililitro da amostra filtrada foi pipetado para tubos de polipropileno, onde 2 mililitros de uma solução tampão a base de acetato de amônio e EDTA dissódico foram adicionados, além de mais 2 mililitros de uma solução de azometina-H para o desenvolvimento de cor. Estes tubos foram agitados durante 30 minutos e então foi possível se determinar o teor de boro através da leitura com um espectrofotômetro de absorção molecular com um comprimento de onda de 420 nanômetros.

#### 4.6.3 Análise estatística dos dados

Os dados obtidos foram tabulados e então submetidos aos testes de homogeneidade de variância (teste de Bartlett) e de normalidade (teste de Lilliefors). Atendido estes pressupostos, foi realizada uma análise de variância fatorial 2x5 (2 espécies e 5 tratamentos) utilizando o software RStudio. As variáveis que apresentaram diferenças estatisticamente significativas foram avaliadas pelo teste de comparações múltiplas de Tukey HSD. Todas as análises estatísticas foram conduzidas com nível de significância de 5% ( $p < 0,05$ ), ou seja, diferenças com probabilidade inferior a 5% de ocorrência ao acaso foram consideradas significativas. As tabelas e gráficos foram elaborados no programa Microsoft Excel.

## 5 RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir das análises laboratoriais dos parâmetros avaliados. Os dados são organizados com base nas respectivas análises estatísticas, acompanhados de sua interpretação e posterior discussão, de forma a sustentar as conclusões desenvolvidas ao longo do estudo.

### 5.1 Produção de matéria seca das culturas

A produção de matéria seca das culturas avaliadas está representada na Figura 11. Observa-se uma diferença expressiva entre as espécies, com média geral de 7,7 g por vaso para a aveia e 29,5 g por vaso para o trevo-encarnado, considerando todos os tratamentos. Como ocorreu interação significativa, os dados foram também tratados para cada uma das espécies de forma isolada.

Para a aveia, os tratamentos que apresentaram maior produção de matéria seca foram os que continham o nitrato de amônio em sua composição, tanto isolado, com 11,31 g vaso<sup>-1</sup>, como associado com o biochar, com 11,42 g vaso<sup>-1</sup>. Os demais tratamentos não apresentaram diferença significativa entre si.

Para o trevo-encarnado, o maior valor de produção de matéria seca foi observado no tratamento com composto orgânico, com média de 20,9 g por vaso. Esse resultado não diferiu estatisticamente dos demais tratamentos, exceto do biochar isolado, que apresentou a menor média, com 15,5 g por vaso.

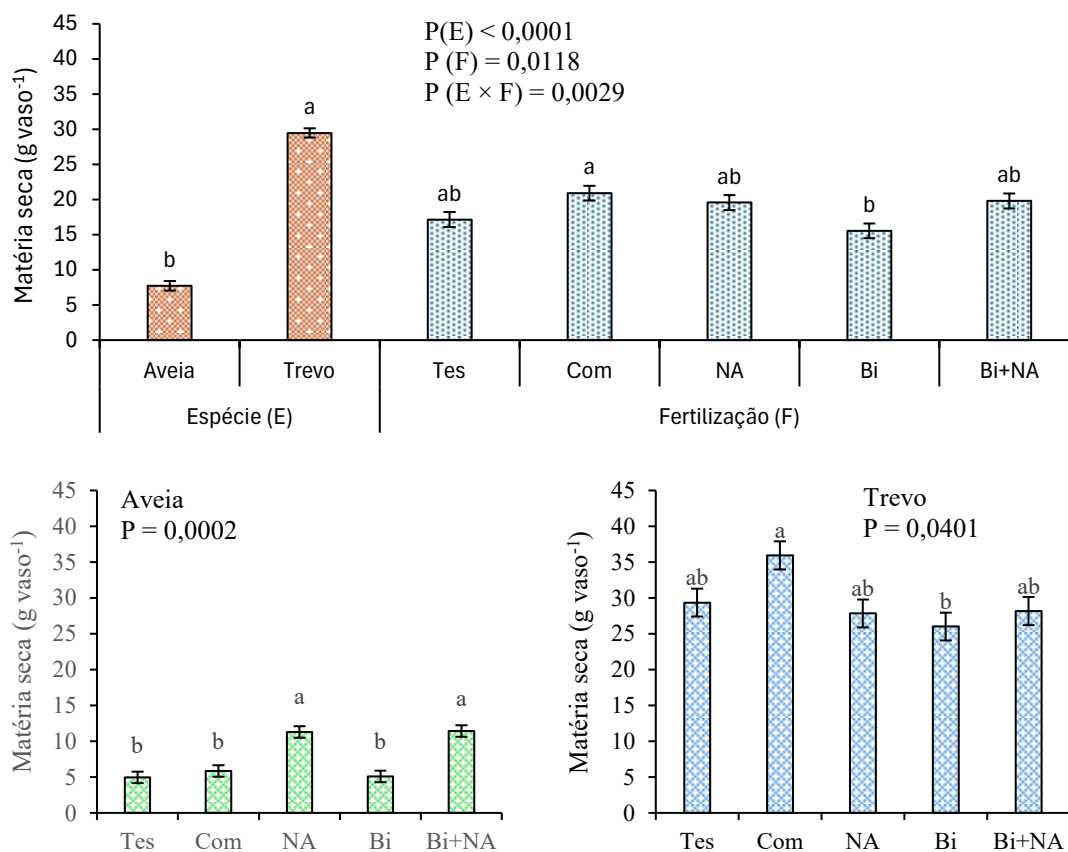


Figura 11. Produção de matéria seca por espécie e por tratamento. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. Médias com as mesmas letras não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ ). Os segmentos de reta sobre as barras representam o erro padrão das médias.

## 5.2 Concentração de nutrientes no tecido vegetal

### 5.2.1 Macronutrientes

A concentração dos macronutrientes nos tecidos variou de forma significativa apenas entre espécies (Tabela 4), não se observando interação significativa entre fatores nem diferenças significativas entre tratamentos fertilizantes (Tabela 4). Isso indica que os tratamentos de fertilização não influenciaram significativamente a concentração de macronutrientes no tecido vegetal, sendo essa concentração influenciada apenas pelo fator espécie vegetal.

Em relação ao fósforo, a aveia apresentou maior concentração do nutriente no tecido vegetal, com 14,41 g kg<sup>-1</sup>, enquanto o trevo-encarnado registrou 12,19 g kg<sup>-1</sup>. Para os demais macronutrientes analisados, o trevo-encarnado destacou-se com os maiores valores. As concentrações de nitrogênio, potássio, cálcio e magnésio no trevo foram, respectivamente, 199,40, 158,92, 50,81 e 22,40 g kg<sup>-1</sup>, ao passo que na aveia foram 62,68, 139,71, 19,63 e 14,70 g kg<sup>-1</sup>.

Tabela 4. Concentração dos macronutrientes analisados no tecido vegetal

		Nitrogênio g kg <sup>-1</sup>	Fósforo g kg <sup>-1</sup>	Potássio g kg <sup>-1</sup>	Cálcio g kg <sup>-1</sup>	Magnésio g kg <sup>-1</sup>
Espécie (E)	Aveia	62,68 b	14,41 a	139,71 b	19,63 b	14,70 b
	Trevo	199,40 a	12,19 b	158,92 a	50,81 a	22,40 a
Fertilização (F)						
	Tes	131,25 a	13,95 a	144,31 a	35,36 a	18,91 a
	Com	129,42 a	14,65 a	145,07 a	36,71 a	17,96 a
	NA	134,77 a	12,11 a	152,10 a	34,05 a	17,86 a
	Bi	120,78 a	12,51 a	146,36 a	34,88 a	19,45 a
	Bi+NA	138,98 a	13,29 a	158,73 a	35,10 a	18,58 a
Prob. (E)		< 0,0001	0,0021	0,0028	< 0,0001	< 0,0001
Prob. (F)		0,1007	0,0984	0,4660	0,2143	0,4941
Prob. (E x F)		0,0879	0,4980	0,5277	0,1871	0,4204

Dentro do fator Espécie ou Fertilização, médias seguidas da mesma letra na coluna não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ )

### 5.2.2 Micronutrientes

A concentração de micronutrientes no tecido vegetal para os quais não ocorreu interação significativa pode ser visualizado na Tabela 5. O trevo-encarnado se destacou por concentrar de forma significativa o boro, com uma concentração de 19,63 mg kg<sup>-1</sup> enquanto a aveia acumulou 9,26 mg kg<sup>-1</sup>. O zinco não teve diferença significativa entre as espécies, com o trevo obtendo um valor de 25,56 mg kg<sup>-1</sup> enquanto a aveia obteve 11,36 mg kg<sup>-1</sup>. A aveia atingiu as maiores concentrações de manganês, obtendo os valores médios de 83,08 mg kg<sup>-1</sup> enquanto o trevo registrou 43,55 mg kg<sup>-1</sup>.

Tabela 5. Concentração dos micronutrientes analisados no tecido vegetal (Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio).

		Boro mg kg <sup>-1</sup>	Manganês mg kg <sup>-1</sup>	Zinco mg kg <sup>-1</sup>
Espécie (E)	Aveia	9,26 b	83,08 a	11,36 a
	Trevo	19,63 a	43,55 b	25,56 a
Fertilização (F)	Tes	16,08 a	70,15 ab	18,09 a
	Com	15,60 a	60,41 ab	14,43 a
	NA	17,07 a	56,08 b	13,46 a
	Bi	15,55 a	82,85 a	31,76 a
	Bi+NA	7,91 b	47,08 b	14,55 a
Prob. (E)		<0,0001	<0,0001	0,0639
Prob. (F)		0,0029	0,0075	0,4870
Prob. (E x F)		0,0560	0,0572	0,5270

Dentro do fator Espécie ou Fertilização, médias seguidas da mesma letra na coluna não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ )

A bioacumulação de ferro destacou-se na cultura da aveia, conforme apresentado na Figura 12. Os tratamentos influenciaram significativamente a concentração do micronutriente, sendo o maior valor registrado no tratamento com biochar isolado, com 2616,74 mg kg<sup>-1</sup>, enquanto o menor valor foi observado na combinação de biochar com nitrato de amônio, com 941,90 mg kg<sup>-1</sup>. Não houve diferença estatisticamente significativa entre os demais tratamentos, com valores de 2101,30, 1507,09 e 1155,25 mg kg<sup>-1</sup> para os tratamentos de testemunha, composto orgânico e nitrato de amônio, respectivamente. Por outro lado, para o trevo-encarnado, não se observou influência significativa dos tratamentos sobre a concentração de ferro nos tecidos vegetais, como indicado pela baixa correlação entre os fatores ( $P = 0,893$ ).

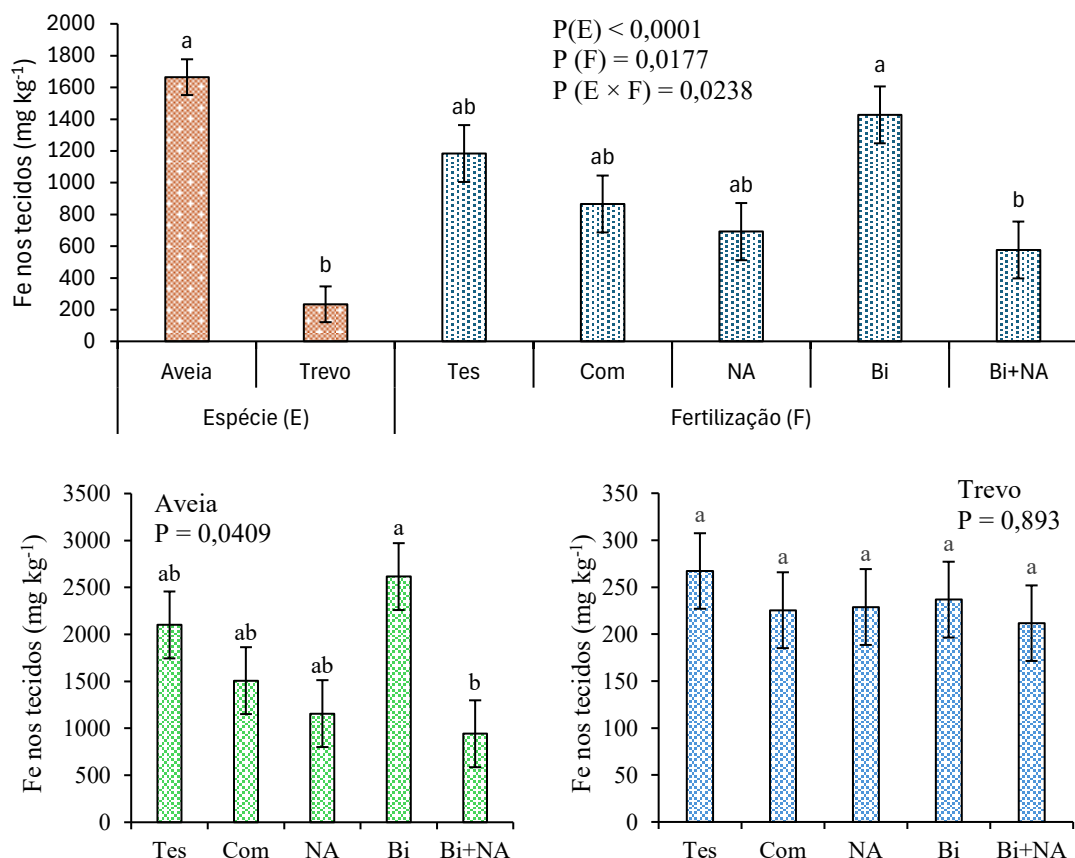


Figura 12. Concentração de ferro (Fe) nos tecidos vegetais por espécie e por tratamento em miligramas por quilograma. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. Médias com as mesmas letras não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ ). Os segmentos de reta sobre as barras representam o erro padrão das médias.

A concentração de cobre nos tecidos vegetais está apresentada na Figura 13, na qual se observa interação estatisticamente significativa entre os fatores espécie x fertilização ( $P < 0,05$ ). Contudo, na análise isolada dos fatores espécie e fertilização, não se observaram diferenças significativas entre tratamentos.

Na cultura do trevo-encarnado não houve diferença significativa entre os tratamentos, mas o maior valor médio foi observado na testemunha, com  $6,65 \text{ mg kg}^{-1}$  e o menor valor na fertilização com biochar, com  $5,20 \text{ mg kg}^{-1}$ . Para a aveia, embora a análise estatística também não tenha apontado diferenças significativas entre os tratamentos, os valores apresentaram maior variação. A concentração mais elevada foi verificada também na testemunha, com  $23,76 \text{ mg kg}^{-1}$  e o menor valor na fertilização com nitrato de amônio, com  $9,70 \text{ mg kg}^{-1}$ .

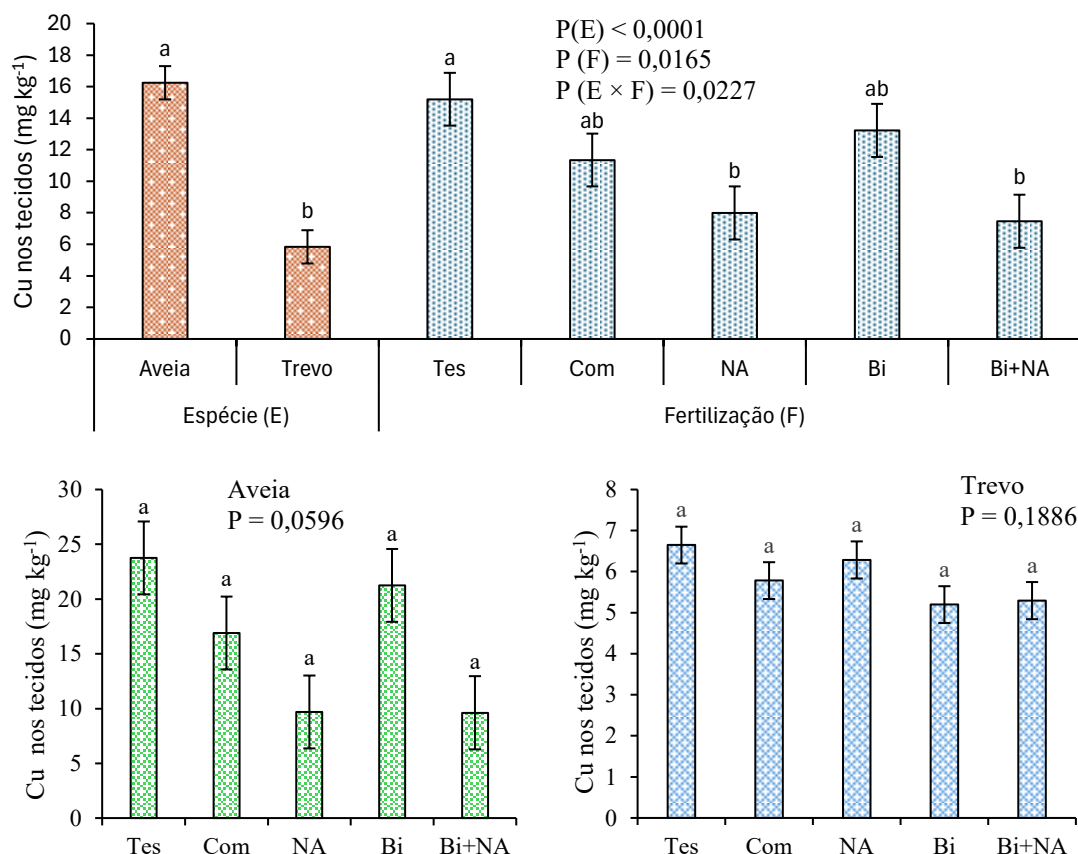


Figura 13. Concentração de cobre (Cu) nos tecidos vegetais por espécie e por tratamento em miligramas por quilograma. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. Médias com as mesmas letras não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ ). Os segmentos de reta sobre as barras representam o erro padrão das médias.

### 5.3 Nutrientes recuperados

Os nutrientes recuperados referem-se à quantidade total de cada elemento absorvido pelas plantas, sendo calculados a partir da multiplicação entre a produção de matéria seca e a concentração do respectivo nutriente no tecido vegetal. Esse parâmetro fornece uma estimativa mais completa da absorção de nutrientes pelas culturas, permitindo uma avaliação mais integrada da eficiência dos tratamentos aplicados. Assim, os valores obtidos complementam as análises isoladas de concentrações de nutrientes e matéria seca produzida, contribuindo para uma melhor interpretação dos resultados.

### 5.3.1 Macronutrientes recuperados

Na Tabela 6 são apresentados os valores dos macronutrientes recuperados por espécie e em cada tratamento para os elementos em que não ocorreu interação significativa. É possível observar que o trevo obteve maiores valores para todos os macronutrientes avaliados. Isso acontece por conta da grande disparidade entre a produção total de matéria seca das culturas, com média de 29,5 g para o trevo e 7,7 g para a aveia.

Tabela 6. Macronutrientes recuperados (Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio).

		Nitrogênio mg vaso <sup>-1</sup>	Cálcio mg vaso <sup>-1</sup>	Magnésio mg vaso <sup>-1</sup>
Espécie (E)	Aveia	49,35 b	14,53 b	10,92 b
	Trevo	589,44 a	150,62 a	66,09 a
Fertilização (F)	Tes	303,31 a	76,20 a	35,07 a
	Com	377,68 a	101,37 a	43,50 a
	NA	317,10 a	80,03 a	38,85 a
	Bi	260,90 a	70,31 a	34,01 a
	Bi+NA	337,98 a	84,98 a	41,11 a
Prob. (E)		<0,0001	<0,0001	<0,0001
Prob. (F)		0,1007	0,2143	0,4941
Prob. (E x F)		0,0879	0,1871	0,4204

Dentro do fator Espécie ou Fertilização, médias seguidas da mesma letra na coluna não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ )

A Figura 14 apresenta os dados do fósforo recuperado. Como é possível se observar na mesma, o tratamento que corresponde a maior quantidade de nutriente recuperado foi o composto orgânico, com uma média de 28,22 g vaso<sup>-1</sup>, sem diferença estatisticamente significativa para os tratamentos de testemunha, nitrato de amônio isolado e biochar associado ao nitrato de amônio, com valores de 22,12, 23,69 e 25,05 g vaso<sup>-1</sup>, respectivamente. Já para o tratamento com o biochar isolado, houve uma diferença estatisticamente significativa, com o menor resultado, de 18,34 g vaso<sup>-1</sup>.

Para a cultura do trevo-encarnado, os tratamentos não tiveram influência significativa na quantidade de fósforo recuperado. Contudo, o maior valor observado foi o da fertilização com o composto orgânico, de 47,39 g vaso<sup>-1</sup>, seguido por 36,75, 33,85, 33,24 e 29,71 g vaso<sup>-1</sup>, correspondentes aos tratamentos de testemunha, nitrato de amônio, biochar + nitrato de amônio e biochar isolado, respectivamente.

Já para a aveia, os maiores números de fósforo recuperado, estatisticamente significativos, foram observados nas fertilizações que continham o nitrato de amônio, tanto isolado como associado ao biochar, com valores de 13,53 e 16,87 g vaso<sup>-1</sup>, respectivamente. Os demais tratamentos não apresentaram diferença significativa entre si, com valores de 7,49, 9,04 e 6,97 g vaso<sup>-1</sup>, para os tratamentos de testemunha, composto orgânico e biochar, respectivamente.

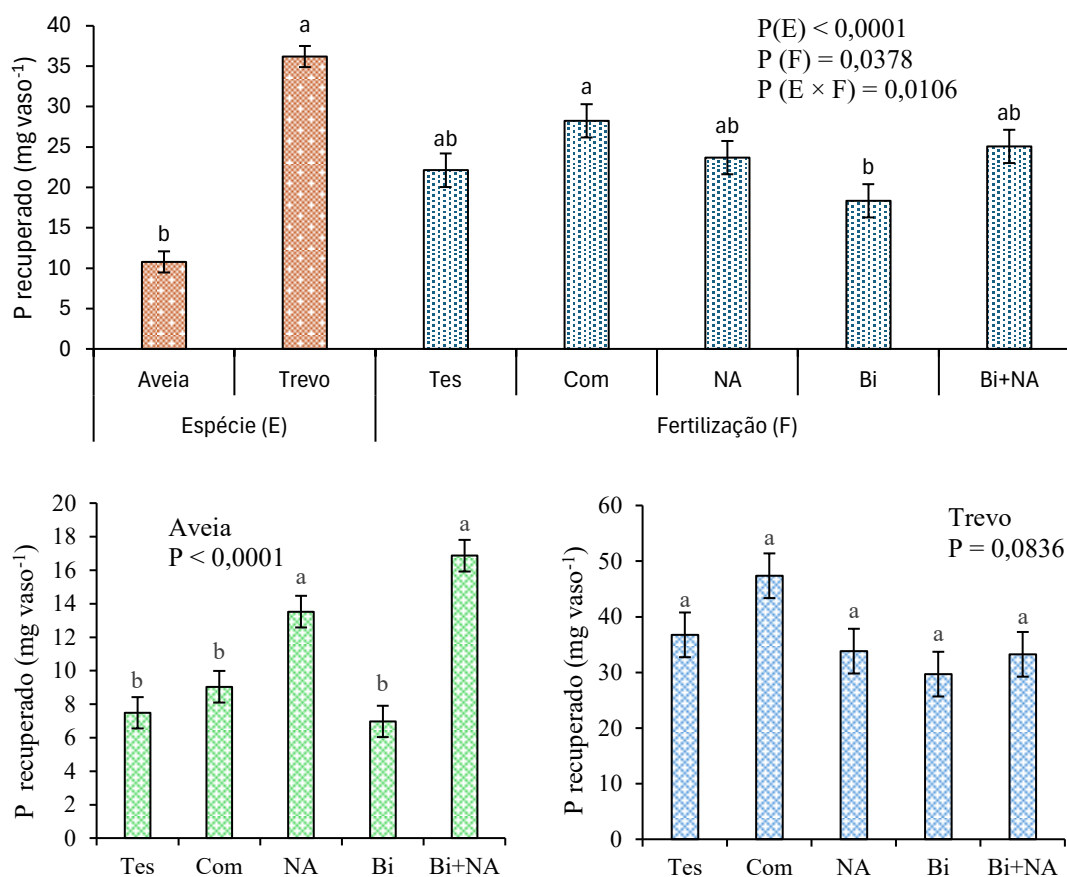


Figura 14. Fósforo (P) recuperado por espécie e por tratamento em miligramas por vaso. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. Médias com as mesmas letras não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ ). Os segmentos de reta sobre as barras representam o erro padrão das médias.

Os valores de potássio recuperado são apresentados na Figura 15. É possível observar que os tratamentos não influenciaram significativamente nos valores, como evidenciado pela baixa correlação do fator fertilização ( $P = 0,0983$ ).

No entanto, para a aveia, os resultados tiveram forte dependência do fator fertilização ( $p < 0,0001$ ). Sendo assim, da mesma forma que o fósforo, os maiores valores foram observados nas fertilizações com o nitrato de amônio, com valores de 170,35 mg vaso<sup>-1</sup> a associação de nitrato de amônio e biochar e 166,65 mg vaso<sup>-1</sup> para o nitrato de

amônio isolado. Os demais tratamentos não diferiram estatisticamente entre si, com valores de 67,75, 78,28 e 65,58 mg vaso<sup>-1</sup>, para os tratamentos da testemunha, composto orgânico e biochar, respectivamente.

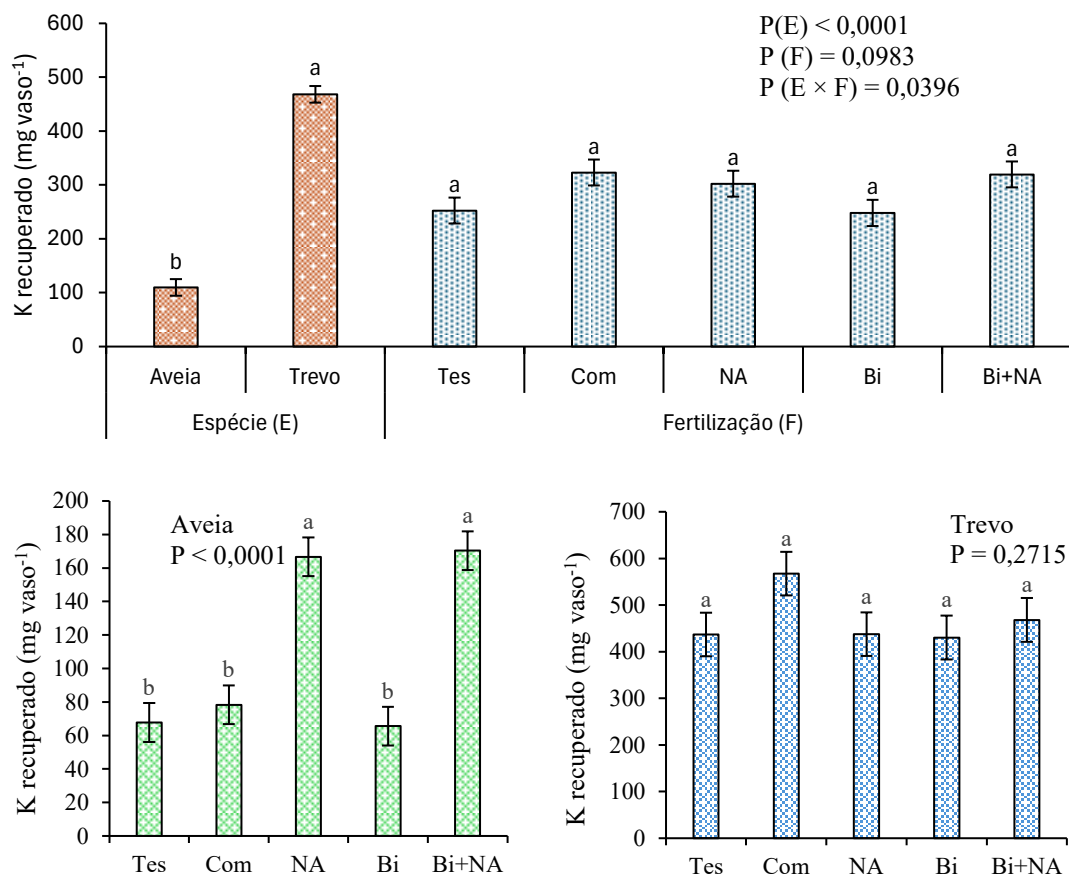


Figura 15. Potássio (K) recuperado por espécie e por tratamento em miligramas por vaso. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. Médias com as mesmas letras não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ ). Os segmentos de reta sobre as barras representam o erro padrão das médias.

### 5.3.2 Micronutrientes recuperados

A Tabela 7 apresenta os valores dos micronutrientes recuperados para os quais não ocorreu interação significativa entre fatores. Da mesma forma que os macronutrientes, o trevo-encarnado tem uma diferença significativa dos nutrientes recuperados, por sua maior produção de matéria seca, com exceção do ferro, que por ter teores

significativamente maiores no tecido vegetal da cultura da aveia, foi mais recuperado do que na cultura do trevo-encarnado.

Tabela 7. Micronutrientes recuperados (Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio).

		Ferro mg vaso <sup>-1</sup>	Manganês mg vaso <sup>-1</sup>	Zinco mg vaso <sup>-1</sup>	Cobre mg vaso <sup>-1</sup>
Espécie (E)	Aveia	11,54 a	0,59 b	14,53 b	0,11 b
	Trevo	6,79 b	1,26 a	150,62 a	0,17 a
Fertilização (F)	Tes	9,39 a	252,42 a	0,91 a	0,16 a
	Com	9,01 a	323,03 a	0,92 a	0,15 a
	NA	9,64 a	302,13 a	1,03 a	0,14 a
	Bi	9,64 a	248,03 a	0,93 a	0,12 a
	Bi+NA	8,15 a	319,33 a	0,84 a	0,13 a
Prob. (E)		0,0038	<0,0001	0,0099	0,0005
Prob. (F)		0,9621	0,8345	0,6397	0,4358
Prob. (E x F)		0,7172	0,5781	0,5725	0,5041

Dentro do fator Espécie ou Fertilização, médias seguidas da mesma letra na coluna não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ )

A Figura 16 apresenta os valores para o boro recuperado. Para este micronutriente, a cultura da aveia não apresentou diferenças significativas na recuperação do nutriente entre os tratamentos, com o maior valor sendo observado na fertilização com nitrato de amônio, de 0,10 mg vaso<sup>-1</sup> e o menor valor sendo observado na testemunha, com 0,05 mg vaso<sup>-1</sup>.

Por outro lado, o trevo-encarnado demonstrou variação significativa em função da fertilização, com o maior valor de recuperação observado no tratamento com composto orgânico, de 0,77 mg vaso<sup>-1</sup>, seguido sem diferença estatística para os valores de 0,70, 0,66 e 0,53 mg vaso<sup>-1</sup>, dos tratamentos de nitrato de amônio, testemunha e biochar isolado, respectivamente. O menor resultado, que se diferenciou estatisticamente dos demais, foi observado na fertilização com biochar associado ao nitrato de amônio, com valor de 0,26 mg vaso<sup>-1</sup>.

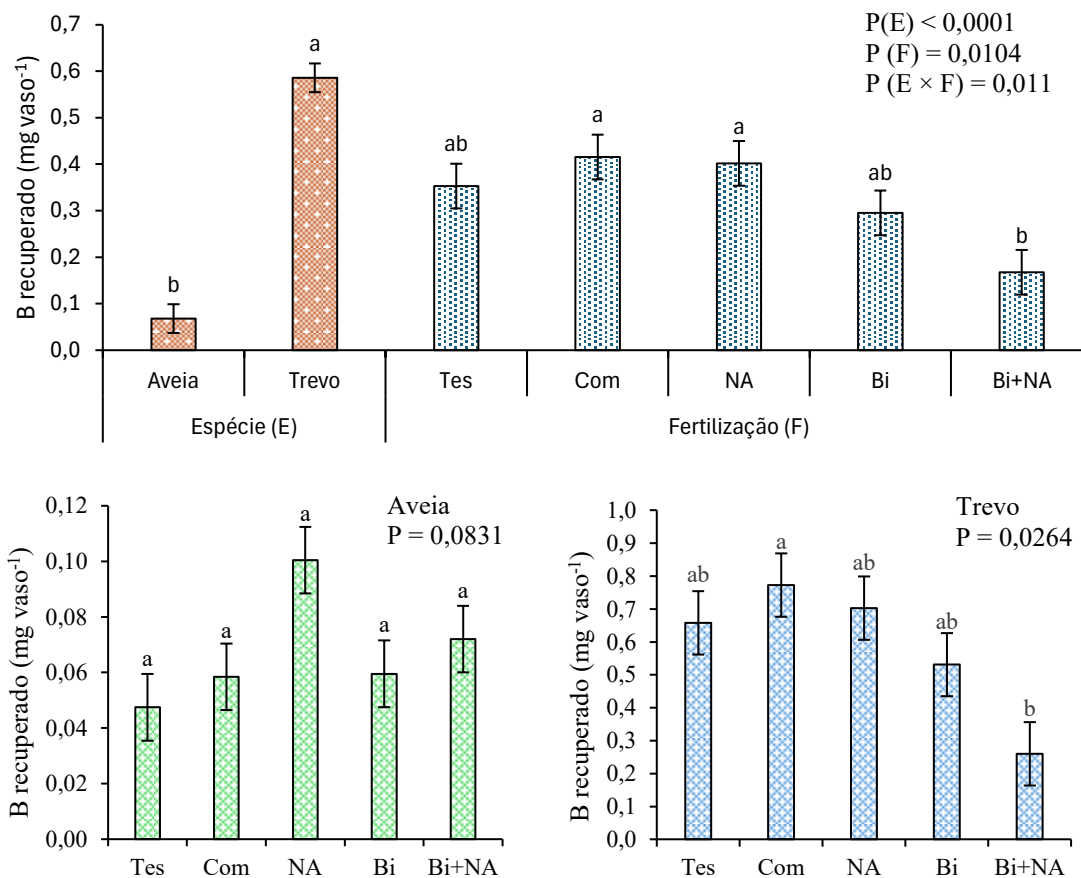


Figura 16. Boro (B) recuperado por espécie e por tratamento em miligramas por vaso. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. Médias com as mesmas letras não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ ). Os segmentos de reta sobre as barras representam o erro padrão das médias.

#### 5.4 Efeito dos tratamentos no solo

Esta seção apresenta os efeitos das interações entre as diferentes espécies vegetais e os tratamentos aplicados sobre alguns atributos químicos do solo, com o objetivo de avaliar as alterações decorrentes das distintas combinações experimentais.

### 5.4.1 Carbono e pH

Na Figura 17 são apresentados os valores de carbono no solo em função das diferentes espécies vegetais e dos tratamentos utilizados. Neste aspecto, a cultura do trevo-encarnado se destaca por apresentar um valor significativamente maior, de 12,6 g kg<sup>-1</sup>, enquanto a aveia apresentou um valor de 11,6 g kg<sup>-1</sup>. Para os tratamentos, não houve diferença significativa, com o maior valor sendo observado na fertilização com biochar + nitrato de amônio, de 12,8 g kg<sup>-1</sup>, seguido por valores de 12,4, 12,2, 11,6 e 11,4 g kg<sup>-1</sup> para os tratamentos de composto orgânico, biochar, nitrato de amônio e testemunha, respectivamente.

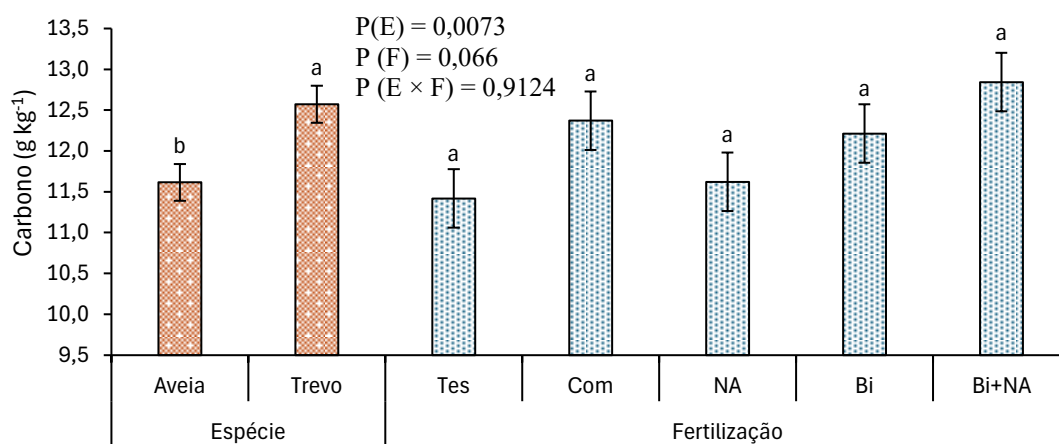


Figura 17. Teor de carbono no solo ao final do experimento por espécie e por tratamento em gramas por quilograma de solo. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. Médias com as mesmas letras não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ ). Os segmentos de reta sobre as barras representam o erro padrão das médias.

A variação de pH no solo é apresentada na Figura 18. É possível observar que tanto o fator espécie como o fator fertilização não tiveram influência significativa no valor do pH. Para as espécies, a aveia apresentou um pH de 6,9 enquanto o trevo-encarnado apresentou um pH de 6,6.

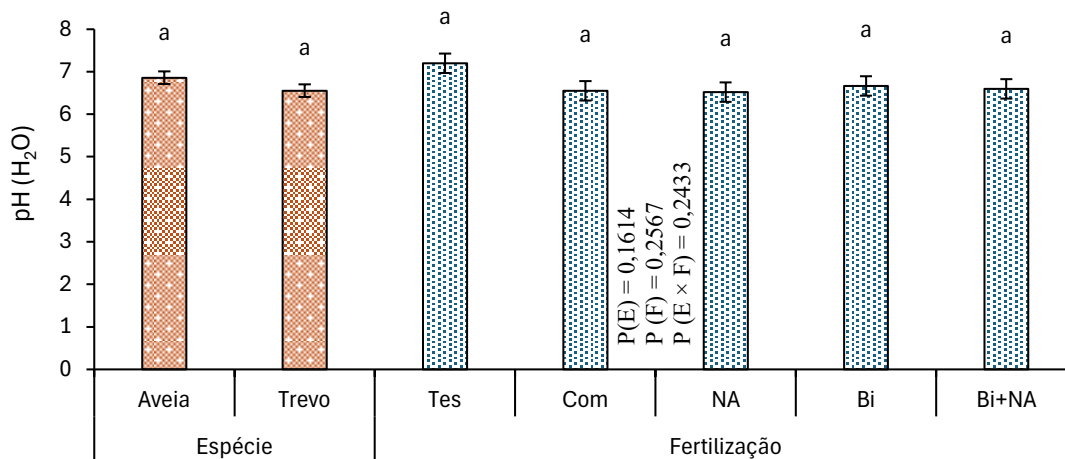


Figura 18. pH em água do solo ao final do experimento por espécie e por tratamento. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. Médias com as mesmas letras não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ ). Os segmentos de reta sobre as barras representam o erro padrão das médias.

#### 5.4.2 Nutrientes no solo

A Figura 19 apresenta os valores da concentração de fósforo (expresso em  $P_2O_5$ ) no solo ao término do experimento. Nos solos onde a cultura da aveia foi cultivada houve uma diferença significativa, com valor de  $72,9 \text{ mg kg}^{-1}$ , quando comparado aos solos onde o trevo-encarnado foi cultivado, com valor de  $58,0 \text{ mg kg}^{-1}$ . Para os tratamentos, não houve diferença significativa, com o maior valor sendo observado na fertilização com nitrato de amônio + biochar, de  $67,9 \text{ mg kg}^{-1}$  e o menor valor observado na testemunha, com  $61,5 \text{ mg kg}^{-1}$ .

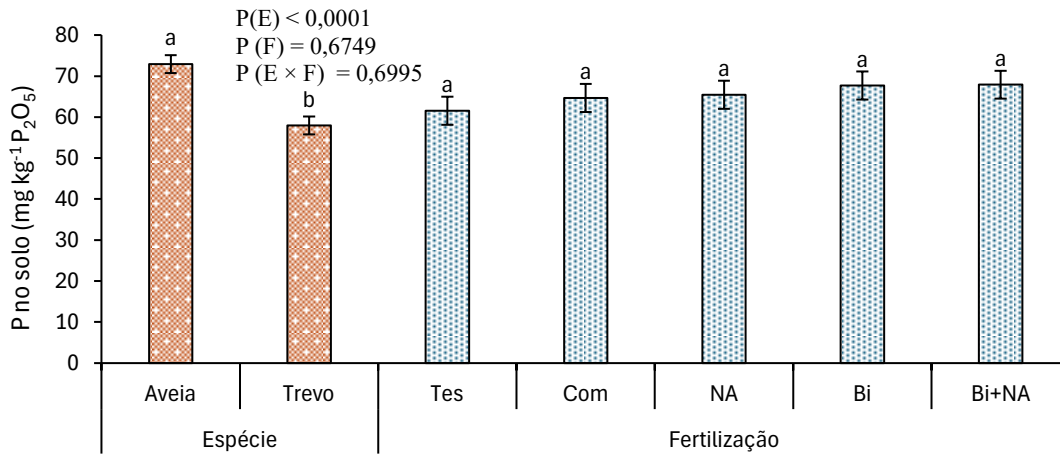


Figura 19. Teor de fósforo (P, expresso em  $P_2O_5$ ) no solo ao final do experimento por espécie e por tratamento em miligramas por quilograma de solo. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. Médias com as mesmas letras não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ ). Os segmentos de reta sobre as barras representam o erro padrão das médias.

A concentração de potássio (expresso em  $K_2O$ ) no solo ao fim do experimento é apresentada na Figura 20. Para este nutriente, a cultura do trevo-encarnado se sobressai pela capacidade significativamente superior de absorção, com um valor final no solo de  $118,5 \text{ mg kg}^{-1}$ , enquanto a aveia resultou em um valor de  $128,5 \text{ mg kg}^{-1}$ . Para este nutriente, houve diferença significativa entre os tratamentos, com o menor valor sendo observado na fertilização com nitrato de amônio, de  $119,7 \text{ mg kg}^{-1}$  e o maior valor na fertilização com o composto orgânico, de  $130,7 \text{ mg kg}^{-1}$ .

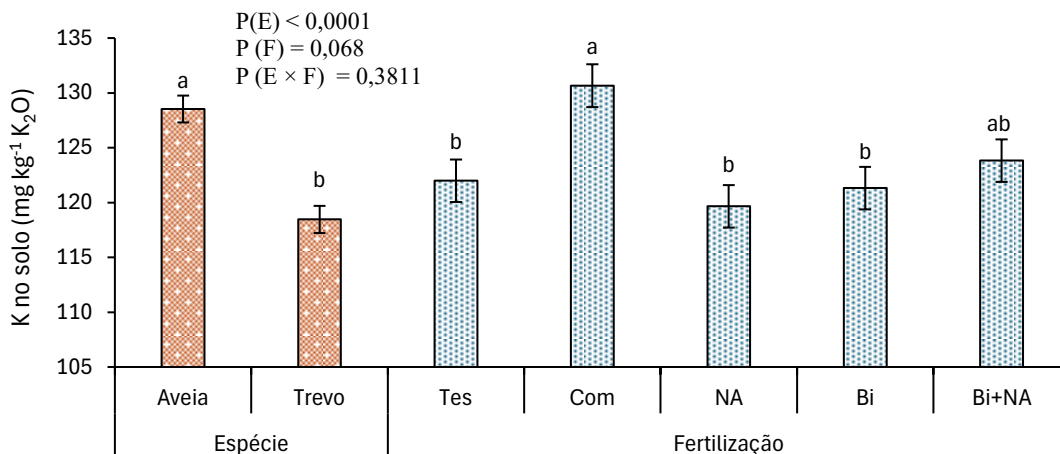


Figura 20. Teor de potássio (K, expresso em  $K_2O$ ) no solo ao final do experimento por espécie e por tratamento em miligramas por quilograma de solo. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. Médias com as mesmas letras não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ ). Os segmentos de reta sobre as barras representam o erro padrão das médias.

A Figura 21 apresenta as concentrações de boro no solo ao fim do experimento. Para o boro, a cultura do trevo-encarnado também se destaca por conseguir retirar mais do nutriente, com um valor de  $0,57 \text{ mg kg}^{-1}$ , enquanto os solos onde a aveia foi cultivada resultaram em uma média de  $0,74 \text{ mg kg}^{-1}$ .

O tratamento com nitrato de amônio destacou-se por apresentar o menor valor, com diferença significativa em relação ao maior valor da testemunha, registrando  $0,44 \text{ mg kg}^{-1}$ . Em seguida, foram observados os valores de  $0,59$ ;  $0,67$ ;  $0,77$  e  $0,81 \text{ mg kg}^{-1}$  nos tratamentos com composto orgânico, biochar, biochar + nitrato de amônio e na testemunha, respectivamente.

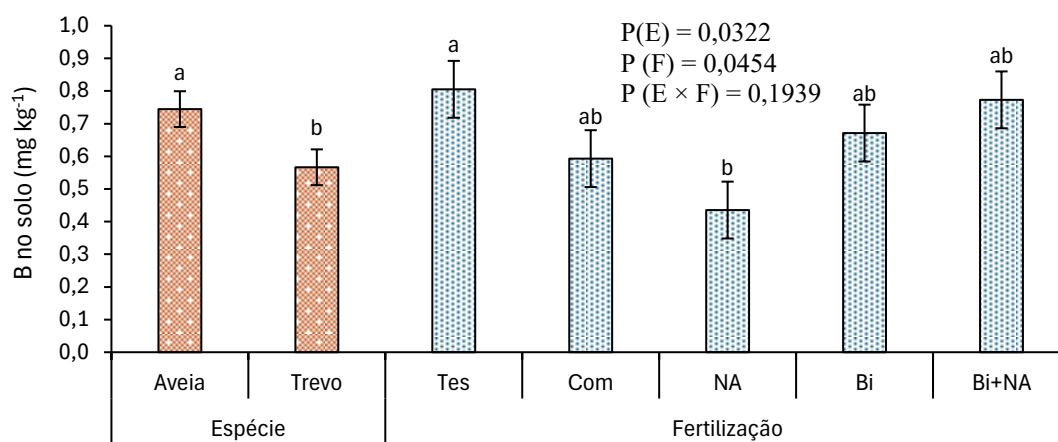


Figura 21. Teor de boro (B) no solo ao final do experimento por espécie e por tratamento em miligramas por quilograma de solo. Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio. Médias com as mesmas letras não se diferenciam estatisticamente pelo teste de Tukey HSD ( $\alpha = 0,05$ ). Os segmentos de reta sobre as barras representam o erro padrão das médias.

## 5.5 Nitrogênio derivado da atmosfera

Considerando que a aveia não se beneficia da fixação biológica de nitrogênio, por não estabelecer associações simbióticas com bactérias fixadoras, ao contrário do trevo-encarnado, a Tabela 8 apresenta as diferenças entre as médias das concentrações de nitrogênio no tecido vegetal dessas duas culturas, de acordo com os diferentes tratamentos. Essas diferenças refletem a quantidade estimada de nitrogênio derivado da atmosfera (Ndfa), ou seja, o nitrogênio que foi fixado biologicamente a partir do  $\text{N}_2$

atmosférico por meio da simbiose entre o trevo-encarnado e bactérias do gênero *Rhizobium*.

Tabela 8. Valores de nitrogênio derivado da atmosfera (Ndfa) (Tes, testemunha; Com, composto; NA, nitrato de amônio; Bi, biochar; Bi+NA, biochar + nitrato de amônio).

	Tes	Com	NA	Bi	Bi+NA
N da atmosfera (mg vaso <sup>-1</sup> )	542,0	688,5	477,3	469,0	523,6
N da atmosfera (%)	94,4	95,4	85,9	94,7	87,3

Ndfa = (N no trevo – N na aveia) / N no trevo. Valores expressos em mg vaso<sup>-1</sup> e %.

O Ndfa foi estimado pelo método da diferença, que se baseia na comparação entre os teores de nitrogênio de uma planta fixadora (trevo-encarnado) e uma planta não fixadora (aveia).

## 6 DISCUSSÃO

### 6.1 Produção de biomassa

A análise dos resultados evidencia que a cultura do trevo-encarnado apresentou um desempenho significativamente superior em relação à aveia na produção de matéria seca, atribuível à capacidade reconhecida às leguminosas noduladas de fixar nitrogênio atmosférico (Hungria e Nogueira, 2023). A superioridade competitiva do trevo-encarnado refletiu-se diretamente na produção de biomassa seca, registrando, em média, um acréscimo de 21,8 g vaso<sup>-1</sup> em relação à aveia, considerando todos os tratamentos. Esse incremento corresponde a uma produção aproximadamente 280% superior à obtida pela aveia.

Quando as espécies são analisadas isoladamente, a aveia destaca os tratamentos com a utilização do nitrato de amônio, com produções de biomassa cerca de 115% superiores aos tratamentos sem a utilização de fertilizantes nitrogenados de síntese. Essa produção evidencia a importância do nitrogênio para a cultura. Esses resultados corroboram os achados de Assann et al. (2004), que observaram uma forte correlação entre o aumento das doses de nitrogênio aplicadas e a elevação na produção de biomassa em pastagens. Os autores concluíram que, devido ao longo período de crescimento das gramíneas e a sua capacidade de rebrotar após o corte, essas espécies apresentam respostas mais expressivas à adubação nitrogenada do que quaisquer outras culturas.

O trevo-encarnado apresentou sua maior produção de biomassa no tratamento com fertilização à base de composto orgânico, evidenciando a eficácia desse insumo como uma alternativa sustentável para a adubação de leguminosas. Tal resultado pode ser atribuído à maior concentração de nutrientes presente no composto em relação ao biochar, cujo desempenho foi o mais baixo entre os tratamentos, com produção cerca de 28% inferior ao composto. O composto contém nutrientes como fósforo e boro que favorecem a nodulação e o funcionamento dos nódulos (Reguera et al. 2010; Somavilla et al. 2021; McLachlan et al. 2024), beneficiando a leguminosa. Por outro lado, o biochar contém elevado teor de carbono, mas numa forma recalcitrante (Arrobas et al., 2022). Para além de não libertar nutrientes, parece ter contribuído para a sua imobilização, tal como observado em estudos anteriores (Rodrigues et al., 2021).

A maior disponibilidade de nutrientes proporcionada pelo composto orgânico melhorou as condições do solo e favoreceu a nutrição das plantas, refletindo em um desempenho superior da cultura. Sinaj et al. (2002) reportaram resultados ainda mais expressivos, atendendo a que seus estudos foram realizados em solos arenosos e com um pH ácido. Hepperly et al. (2009) demonstraram que a utilização de compostos orgânicos, além de sustentar altas produtividades das culturas, contribuem para o aumento dos teores de carbono e nitrogênio no solo e, quando aplicados de forma adequada, apresentam a vantagem de não requererem correções de pH, ao contrário dos fertilizantes químicos.

Outro fator relevante a ser considerado não diz respeito apenas à biomassa em termos quantitativos, mas também à sua qualidade, especialmente às características químicas da matéria seca produzida pelas plantas. Dentre esses parâmetros, a relação carbono/nitrogênio (C/N) tem sido amplamente utilizada em modelos que buscam prever a disponibilidade de nitrogênio no solo durante o processo de decomposição de resíduos orgânicos (Nicolardot et al., 2001).

Nesse sentido, estudos como o de Giacomini et al. (2003) identificaram valores médios de relação C/N em torno de 35 para a aveia-preta, uma gramínea, e de 14 para a ervilhaca-comum, uma leguminosa, evidenciando a influência da composição das espécies vegetais sobre a dinâmica do nitrogênio no solo.

## **6.2 Concentração de nutrientes no tecido vegetal e estado nutricional das culturas**

A cultura da aveia apresentou uma porcentagem cerca de 18% maior na concentração de fósforo em seus tecidos vegetais, além de aproximadamente 91% em manganês, 179% em cobre e 611% em ferro. Os valores mais elevados destes nutrientes nos tecidos de aveia pode dever-se ao efeito de concentração pela menor produção de biomassa, fenômeno frequentemente reportado em bibliografia da especialidade (Bell et al., 2023).

O trevo-encarnado por sua vez, apresentou uma concentração 220% maior de nitrogênio em seu tecido vegetal, 14% em potássio, 159% em cálcio, 52% em magnésio, 112% em boro e 125% em zinco, apesar de ter produzido em média, quase o triplo da matéria seca. Isso pode ser explicado por sua capacidade de fixação de nitrogênio atmosférico que, conseqüentemente, permite a espécie explorar mais nutrientes do solo.

Por outro lado, as dicotiledôneas, são tipicamente diferentes das gramíneas, contendo nos seus tecidos concentrações bastante mais elevadas de nutrientes como cálcio e boro, com importantes papéis na estrutura e funcionamento das paredes celulares (Hawkesford et al., 2023; Cakmak et al., 2023).

Para os tratamentos, não houve diferenças significativas para nenhum macronutriente analisado, sendo estas, reclusas apenas aos micronutrientes ferro, manganês, cobre e boro.

Na cultura da aveia, em relação ao ferro, os tratamentos que se diferenciaram estatisticamente foram o biochar isolado e o biochar associado ao nitrato de amônio. O resultado pode ser explicado pela grande diferença na produção de matéria seca entre estes dois tratamentos, fazendo com que o nutriente fosse diluído em uma maior quantidade de biomassa no tratamento com o nitrato de amônio, como anteriormente referido.

Para o manganês, os tratamentos com a utilização de nitrato de amônio se diferiram dos demais por apresentarem menores concentrações na matéria seca. Para o cobre, os mesmos tratamentos se diferenciaram da testemunha por apresentarem menores concentrações. Por fim, para o boro, o único tratamento que se diferenciou estatisticamente foi a associação de biochar com nitrato de amônio, que apresentou uma concentração consideravelmente menor do nutriente no tecido vegetal.

A interpretação dos resultados das análises foliares da aveia foi realizada com base no Manual de Fertilização das Culturas (Veloso, 2022). Com exceção do zinco, todos os nutrientes avaliados apresentaram concentrações nos tecidos vegetais dentro ou acima dos intervalos recomendados. O zinco, por sua vez, apresentou uma concentração média de  $11,4 \text{ mg kg}^{-1}$ , não atingindo o valor mínimo recomendado de  $15 \text{ mg kg}^{-1}$  e não tendo uma resposta significativa dos tratamentos utilizados.

O único nutriente que teve uma alteração significativa nos tecidos vegetais da aveia por conta dos tratamentos utilizados foi o ferro, apresentando seu maior resultado no tratamento com biochar ( $2614,74 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e seu menor resultado no tratamento com biochar associado ao nitrato de amônio ( $941,90 \text{ mg kg}^{-1}$ ).

Para a cultura do trevo, os tratamentos utilizados não influenciaram significativamente na concentração de nutrientes no tecido vegetal.

### 6.3 Nutrientes recuperados e efeito sobre as características do solo

O fator espécie vegetal apresentou efeito significativo para todos os nutrientes analisados, com destaque para o trevo-encarnado, que apresentou recuperação substancialmente superior na maioria dos casos. A única exceção foi o ferro, cuja absorção foi maior na aveia, com um valor aproximadamente 70% superior. Para os demais nutrientes, o trevo-encarnado demonstrou uma recuperação significativamente maior, resultado que pode ser atribuído à sua substancial maior produção de matéria seca.

No solo, a cultura do trevo-encarnado também se destacou por conseguir adicionar uma quantia significativamente maior de carbono, 8,6% maior do que a aveia. Este resultado já era esperado por sua maior produção de matéria seca e como exposto por Prakash et al. (2002), a contribuição das raízes ao aporte orgânico das culturas no solo é de 23 a 45% da matéria seca da parte aérea, conforme a cultura e o manejo utilizados.

A concentração de nutrientes no solo ao final do cultivo também deu destaque para a cultura do trevo-encarnado. Para o fósforo, a cultura da aveia não apresentou resultados significativos de extração do nutriente, com valor de 72,9 mg kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> após o cultivo. O trevo-encarnado por sua vez, teve o resultado de 58,0 mg kg<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> após o cultivo, ou seja, uma redução de mais de 19% do conteúdo total de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> do solo inicial.

Da mesma forma, para o potássio, a cultura da aveia apresentou o valor de 128,5 mg kg<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, uma redução de pouco mais de 4% quando comparada a concentração do solo inicial, enquanto o trevo teve como resultado 118,5 mg kg<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, ou seja, quase 12% de redução do teor inicial.

Por fim, para o boro, a aveia teve um valor de concentração final no solo de 0,74 mg kg<sup>-1</sup>, representando uma redução de cerca de 12% do teor inicial, enquanto o trevo, 0,57 mg kg<sup>-1</sup>, representando mais de 32% de redução do teor inicial.

Esses resultados refletem a importância das culturas leguminosas, em especial os trevos, como espécies com grande capacidade de ciclar nutrientes nos sistemas agrícolas. Os resultados obtidos neste estudo são corroborados pelos trabalhos de Pereira et al. (2017) e Silva et al. (2006), os quais observaram que as espécies leguminosas apresentam um acúmulo significativamente maior de macro e micronutrientes, bem como uma capacidade superior de ciclagem de nutrientes, quando comparadas às espécies gramíneas.

Dentre os tratamentos avaliados, observou-se um aumento significativo nos teores de  $K_2O$  ao final do experimento nos solos que receberam fertilização com composto orgânico. Esse resultado pode ser atribuído à elevada concentração desse nutriente no insumo, que apresentou 2,48% de  $K_2O$  em sua composição. Tal valor destaca o potencial agrônomo do composto utilizado, produzido a partir da planta invasora jacinto-de-água, como uma fonte viável de potássio para diferentes sistemas produtivos. Além disso, sua composição é comparável à de fertilizantes orgânicos amplamente utilizados, como a cama de frango (2,5% de  $K_2O$ ) e o composto de dejetos suínos (2,9% de  $K_2O$ ), e superior ao esterco sólido de bovinos (1,5% de  $K_2O$ ), conforme descrito por CQFS (2016). Esses dados reforçam a viabilidade do aproveitamento de resíduos orgânicos alternativos como fontes eficientes de nutrientes na agricultura sustentável.

## 7 CONCLUSÃO

A cultura do trevo-encarnado demonstrou um potencial significativamente superior à aveia na produção de biomassa vegetal, especialmente quando associada a tratamentos que promovem a melhoria das condições do solo, como a aplicação de composto orgânico. Além disso, o trevo-encarnado apresentou matéria seca de maior qualidade, caracterizada por uma menor relação C/N, o que favorece sua rápida degradação.

No caso da aveia, o nitrogênio destacou-se como nutriente essencial para o incremento da produção de biomassa, não apresentando resultados estatisticamente significativos para a fertilização com biochar ou composto orgânico para essa variável.

Além disso, nos tratamentos com utilização do nitrato de amônio, foram observadas menores concentrações dos micronutrientes manganês, cobre e ferro nos tecidos vegetais das culturas. Para o boro, a associação de nitrato de amônio e biochar resultou em um valor substancialmente menor da concentração do nutriente nos tecidos vegetais.

Ademais, a utilização de biochar não apresentou efeitos benéficos significativos sobre o desenvolvimento e nutrição das culturas, indicando baixa eficiência desse insumo nas condições avaliadas, inclusive reduzindo significativamente a produção de biomassa, eventualmente por imobilização de nutrientes.

O trevo-encarnado também se destacou pelo aumento nos teores de carbono no solo e pela maior capacidade de extração de nutrientes em comparação à aveia, reforçando seu potencial como espécie de elevado interesse agrônômico, especialmente no que se refere à ciclagem de nutrientes nos sistemas produtivos.

O composto orgânico destacou-se como uma alternativa viável para o aumento dos teores de  $K_2O$  no solo, demonstrando eficácia na elevação da concentração de potássio residual ao final do experimento. Embora não tenham sido observados benefícios nutricionais expressivos para as plantas nas condições avaliadas, o insumo mostrou potencial como fonte de potássio para o solo, contribuindo para a melhoria da fertilidade em médio e longo prazo.

Por fim, recomenda-se a continuidade deste experimento por um período mais prolongado, a fim de aprofundar a compreensão dos efeitos dos condicionadores de solo sobre as propriedades químicas do solo, bem como sua interação com a dinâmica de disponibilidade de nutrientes às plantas.

Ademais, pressupõe-se que, em solos de menor qualidade (com maiores limitações químicas e físicas), os efeitos dos tratamentos tendam a se manifestar de forma mais expressiva, possibilitando análises mais precisas sobre suas eficácias e potenciais de uso em diferentes contextos agrícolas.

## 8 REFERÊNCIAS

Abdalla, F.; Sampaio, A. Os novos princípios e conceitos inovadores da Economia Circular. Entorno Geográfico. 2018, pp. 82-102.

Ahmad, M.; Dar, Z. A.; Habib, M. A review on oat (*Avena sativa* L.) as a dual-purpose crop. Scientific Research and Essays. 2014, 9, pp. 52-59.

Almeida, B.G. Métodos alternativos de determinação de parâmetros físicos do solo e uso de condicionadores químicos no estudo da qualidade do solo. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 2008.

Arrobas, M. Fertilização. *In* Manual de Boas Práticas em Espaços Verdes. Azevedo, J.C.; Gonçalves, A.; Câmara Municipal de Bragança; Bragança, Portugal. 2010, pp. 87–91.

Arrobas, M.; Decker, J.V.; Feix, B.L.; Godoy, W.I.; Casali, C.A.; Correia, C.M.; Rodrigues, M.A. Biochar and zeolites did not improve phosphorus uptake or crop productivity in a field trial performed in an irrigated intensive farming system. *Soil Use and Management*. 2022, 38, pp. 564–575.

Arrobas, M.; Rodrigues, M.A. Fertilização. *In* Manual de Boas Práticas do Castanheiro; Bento, A., Ribeiro, A.C., Eds.; Terras de Trás-os-Montes; Bragança, Portugal. 2020, pp. 131–148.

Assann, A.L.; Pelissari, A.; Moraes, A.; Assmann, T.S.; Oliveira, E.B.; Sandini, I. Produção de gado de corte e acúmulo de matéria seca em sistema de integração lavoura-pecuária em presença e ausência de trevo-branco e nitrogênio. *Revista Brasileira de Zootecnia*. 2004, 33, pp. 37-44.

Ayoub, A.T. Fertilizers and the environment. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 1999, 55, pp. 117–121.

Bai, J.; Yan, W.; Wang, Y.; Yin, Q.; Liu, J.; Wight, C.; Ma, B. Screening Oat Genotypes for Tolerance to Salinity and Alkalinity. *Frontiers in Plant Science*. 2018, 9, pp. 1302.

Baird, R.B., Eaton, A.D., Rice, E.W. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed. American Public Health Association. 2017.

Beesley, L.; Jiménez, E.M.; Eyles, L.J.G. Effects of biochar and greenwaste compost amendments on mobility, bioavailability and toxicity of inorganic and organic contaminants in a multi-element polluted soil. *Environmental Pollution*. 2010, 158, pp. 2282-2287.

Bell, R. Diagnosis and prediction of deficiency and toxicity of nutrients. *In* Marschner's mineral nutrition of plants. Eds. Z Rengel, I Cakmak, PJ White. Elsevier: London, United Kingdom. 2023, pp. 477-495.

Berardi, P.; Dias, J.M. O mercado da economia circular. GV-Executivo. 2018, pp. 34-37.

- Borsari, F. Substâncias húmicas. *Revista Agro BDO*. 2013, pp. 44.
- Bremner, J.M. Nitrogen-total. *In* Sparks, D.L. Ed., *Methods of soil analysis Part 3: Chemical Methods*. Soil Science Society of America: Madison, Wisconsin, 1996, pp. 1085-1122.
- Brito, O.R.; Vendrame, P.R.S.; Brito, R.M. Alterações das propriedades químicas de um latossolo vermelho distroférico submetido a tratamentos com resíduos orgânicos. *Seminário das Ciências Agrárias*. 2005, 26, pp. 33-39.
- Brodth, S.; Six, J.; Feenstra, G.; Ingels, C; Campbell, D. Sustainable Agriculture. *Nature Education Knowledge*. 2011, 3, pp. 1.
- Cakmak, I; Brown, P.; Colmenero-Flores, J.M.; Husted, S.; Kutman, B.Y.; Nikolic, M.; Rengel, Z.; Schmidt, S.B.; Zhao, F.J. Micronutrients. *In* Marschner's mineral nutrition of plants. Eds. Z Rengel, I Cakmak, PJ White. Elsevier: London, United Kingdom. 2023, pp. 283-385.
- Clark, A. *Managing cover crops profitably*, 3rd ed. National Agricultural Laboratory, Beltsville, MD. 2007.
- CQFS - Comissão de Química e Fertilidade do Solo. *Manual de calagem e adubação para os Estados de Rio Grande do Sul e de Santa Catarina*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa. 2016.
- Costa, A. Agricultura sustentável I: Conceitos. *Revista de Ciências Agrárias*. 2010, pp. 61-74.
- Costa, M.M.M.N. *Micronutrientes na Agricultura*. Embrapa Algodão. 2024.
- Culleton, N.; Tunney, H.; Coulter, B. Sustainability in Irish agriculture. *Irish Geography*. 1994, 27, pp. 36-47.
- De Feo, G.; Ferrara, C.; Finelli, A.; Grosso, A. Environmental and economic benefits of the recovery of materials in a municipal solid waste management system. *Environmental Technology*. 2019, 40, pp. 903-911.
- Döbereiner, J. Avanços recentes na pesquisa em fixação biológica de nitrogênio no Brasil. *Estudos Avançados*. 1990, 4, pp. 1-9.
- Downie, A.; Crosky, A.; Munroe, P. Physical Properties of Biochar. *In*: Lehmann, J. and Joseph, S., Eds. *Biochar for Environmental Management: Science and Technology*. Earthscan: London, Sterling, VA. 2003, pp. 13-32.
- Epstein, E. *The Science of Composting*, 1st ed. CRC Press LLC. Florida, 1997.
- Erismann, J.W.; Sutton, M.A.; Galloway, J.N.; Klimont, Z.; Winiwarter W. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nature Geoscience*. 2008, 1, pp. 636-639.

FAO - FESLM: An international framework for evaluating sustainable land management. 1993. Available online: <https://www.fao.org/4/t1079e/t1079e00.htm> (accessed on 14 January 2025).

FAO. Standard Operating Procedure for Soil Available Micronutrients (Cu, Fe, Mn, Zn) and Heavy Metals (Ni, Pb, Cd), DTPA Extraction Method. 2022. Available online: <https://www.fao.org/3/cc0048en/cc0048en.pdf> (accessed on 10 April 2025).

Fontanelli, R.S.; Santos, H.P.; Baier, A.C. Morfologia de leguminosas forrageiras. *In* Forrageiras para integração lavoura-pecuária-floresta na região sul-brasileira. Embrapa Trigo. Passo Fundo, RS. 2009, pp. 209-305.

Galloway, J.N.; Townsend, A.R.; Erisman, J.W.; Bekunda, M.; Cai, Z.; Freney, J.R.; Martinelli, L.A.; Seitzinger, S.P.; Sutton, M.A. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions. *Science*. 2008, 320, pp. 889-892.

Garcia, J.L.N.; Marques, R.R.; Maeda, A.S.; Neto, J.P.; Vicente, L.F.O.; Fernandes, D.M. Nodulação da cultura da soja em função da aplicação de micronutrientes via semente. XXXIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. 2013.

Gardner, E.H.; Doerge, T.A.; Hannaway, D.B.; Youngberg, H.; McGuire, W.S. Crimson clover, vetch, field peas. Western Oregon-west of the Cascades. *Fertilizer guide* 30. 1983.

Giacomini, S.J.; Aita, C.; Vendruscolo, E.R.O.; Cubilla, M.; Nicoloso, R.S.; Fries, M.R. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. 2003, 27, pp. 325-334.

Gomes, M.L.; Marcelino, M.M.; Espada, M.G. SIDS - Sistema de indicadores de desenvolvimento sustentável. Amadora: Direção Geral do Ambiente. Lisboa, Portugal. 2000.

Glossary of Soil Science Terms. Soil Science Society of America. 2025. Available online: [www.soils.org/publications/soils-glossary?q=publications/soils-glossary/](http://www.soils.org/publications/soils-glossary?q=publications/soils-glossary/) (accessed on 20 January 2025).

Gutkoski, L.C.; Pedó, I. Aveia: composição química, valor nutricional e processamento. Varela. São Paulo, 2000.

Hackney, B.; Crocker, G.; Dear, B. Crimson clover. *Primefacts*. 2007, 382, pp. 1-4.

Hawkesford, M.J.; Cakmak, I.; Coskun, D.; De Kok, L.J.; Lambers, H.; Schjoerring, J.K.; White, P.J. Functions of macronutrients. *In* Marschner's mineral nutrition of plants. Eds. Z Rengel, I Cakmak, PJ White. Elsevier: London, United Kingdom. 2023, pp. 201-281.

Hepperly, P.; Lotter, D.; Ulsh, C. Z.; Seidel, R.; Reider, C. Compost, Manure and Synthetic Fertilizer Influences Crop Yields, Soil Properties, Nitrate Leaching and Crop Nutrient Content. *Compost Science and Utilization*. 2009, 17, pp. 117-126.

Hirel, B.; Tétu, T.; Lea, P.J.; Dubois, F. Improving Nitrogen Use Efficiency in Crops for Sustainable Agriculture. *Sustainability*. 2011, 3, pp.1452-1485.

Hoang, V.N.; Alauddin, M. Assessing the eco-environmental performance of agricultural production in OECD countries: The use of nitrogen flows and balance. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2010, 87, pp. 353-36.

Hungria, M.; Nogueira, M.A. Nitrogen fixation. *In* Marschner's mineral nutrition of plants. Eds. Z Rengel, I Cakmak, PJ White. Elsevier: London, United Kingdom. 2023, pp. 615-650.

Hungria, M.; Vargas M.A. Environmental factors affecting N<sub>2</sub> fixation in grain legumes in the tropics, with an emphasis on Brazil. *Field crops research*. 2000, 1, pp. 151-164.

IPCC. Climate Change: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on climate change. 2007. Available online: [www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4\\_syr.pdf](http://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr.pdf) (accessed on 20 January 2025).

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Acompanhamento do clima: mapas e gráficos. 2023. Available online: [www.ipma.pt/pt/oclima/monitorizacao/](http://www.ipma.pt/pt/oclima/monitorizacao/) (accessed on 18 May 2025).

IPMA – Instituto Português do Mar e da Atmosfera. Atlas climático ibérico. 2024. Available online: [www.ipma.pt/resources.www/docs/publicacoes.site/atlas\\_clima\\_iberico.pdf](http://www.ipma.pt/resources.www/docs/publicacoes.site/atlas_clima_iberico.pdf) (accessed on 18 May 2025).

Jones Jr, J.B. Laboratory guide for conducting soil test and plant analysis. CRC Press: Boca Raton, Florida. 2001.

Knowles, R. Denitrification. *Microbiological reviews*. 1982, 46, pp. 43-70.

Kiehl, E.J. Fertilizantes orgânicos. *Ceres*. São Paulo. 1985.

Kumar, A.; Bhattacharya, T. Biochar: a sustainable solution. *Environment, Development and Sustainability*. 2021, 23, pp. 6642–6680.

Lal, R. Soils and sustainable agriculture. A review. *Agronomy for Sustainable Development*. 2008, 28, pp. 57–64.

Laurett, R.; Paço, A.; Mainardes, E. W. Sustainable Development in Agriculture and its Antecedents, Barriers and Consequences – An Exploratory Study. *Sustainable Production and Consumption*. 2021, 27, pp. 298-311.

Lehmann, J.; Joseph, S. Biochar for Environmental Management: Science and Technology. Earthscan. London, Sterling, VA. 2003.

Leitão, A. Economia circular: uma nova filosofia de gestão para o século XXI. *Portuguese Journal of Finance, Management and Accounting*. 2015, pp. 149-171.

Lewis, O.A.M. Plants and Nitrogen. The Institute of Biology's. Studies in Biology no. 166. Ed. Edward Arnold. USA. 1986.

Lindsay, W.L.; Norvell, W.A. Desenvolvimento de um teste de solo Dtpa para zinco, ferro, manganês e cobre. Soil Science Society of America Journal. 1978, 42, pp. 421-428.

MacRae, R.J.; Hill, S.B.; Henning, J.; Mehuys, G.R. Agricultural Science and Sustainable Agriculture: A Review of the Existing Scientific Barriers to Sustainable Food Production and Potential Solutions. Biological Agriculture and Horticulture. 1989, 6, pp. 173–219.

Madari, B.E.; Costa, A.R.; Castro, L.M.; Santos, J.L.S.; Benites, V.M.; Rocha, A.O.; Machado, P.L.O.A. Carvão vegetal como condicionador de solo para arroz de terras altas (cultivar Primavera): um estudo prospectivo. Embrapa Arroz e Feijão. Santo Antônio de Goiás. 2006, 125, pp. 6.

Malavolta, E. Os elementos minerais. *In*: Elementos de nutrição mineral de plantas. Malavolta, E. Agronômica Ceres. São Paulo. 1980, pp. 104-219.

Malavolta, E. Manual de nutrição mineral de plantas. Editora Ceres. Piracicaba. 2006.

Marshall, A.; Cowan, S.; Edwards, S.; Griffiths, I.; Howarth, C.; Langdon, T.; White, E. Crops that feed the world 9. Oats-a cereal crop for human and livestock feed with industrial applications. Food Security. 2013, pp. 13-33.

Mathews, A.Y. Plant guide for crimson clover (*Trifolium incarnatum*). USDA-Natural Resources Conservation Service. Plant Materials Center. Corvallis, OR. 2013.

McClellan, T.; Deenik, J.; Singleton, P. Soil Management. College of Tropical Agriculture and Human Resources. University of Hawaii at Manoa. 2007.

McLachlan, J.W.; Flavel, R.J.; Guppy, C.N. Preferential phosphorus placement improves the productivity and competitiveness of tropical pasture legumes. Legume Science. 2025, 6.

Moreira, A.; Motta, A.C.V.; Costa, A.; Muniz, A.S.; Cassol, L.C.; Zanao, L.A., Jr.; Batista, M.A.; Muller, M.M.L.; Hager, N.; Pauletti, V. (Eds.). Manual de Adubação e Calagem para o Estado do Paraná, Segunda Edição. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo - Núcleo Estadual Paraná. Curitiba, Brasil. 2019.

Moreira, F.B.; Cecato, U.; Prado, I.D.; Wada, F.Y.; Rego, F.D.A.; Nascimento, W.D. Avaliação de aveia preta cv Iapar 61 submetida a níveis crescentes de nitrogênio em área proveniente de cultura de soja. Acta Scientiarum. 2001, 23, pp. 815-821.

Mulvaney, R.L.; Khan, S.A.; Ellsworth, T.R. Synthetic nitrogen depleted soil nitrogen: A global dilemma for sustainable cereal production. Journal of Environmental Quality. 2009, 38, pp. 2295-2314.

Navarro, A.R. Sustainable Agriculture Characterization. La Prática de la Agricultura y Ganadería Ecológicas. Comité Andaluz de Agricultura Ecológica, Sevilla. 2002, pp. 357-371.

Neto, G.C.O.; Correia, J.M.F. Environmental and economic advantages of adopting reverse logistics for recycling construction and demolition waste: a case study of brazilian construction and recycling companies. Waste Management and Research. 2019, 37, pp. 176–185.

Nicolardot, B.; Recous, S.; Mary, B. Simulation of C and N mineralisation during crop residue decomposition: A simple dynamic model based on the C/N ratio of the residues. Plant Soil. 2001, 228, pp.83-103.

Nóbrega, I.P.C. Efeitos do Biochar nas propriedades físicas e químicas do solo: - Sequestro de carbono no solo. Dissertação de mestrado. Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa. 2011.

Ofri, I.C.; Weiner, L.; Boaretto, E.; Mintz, G.; Weiner, S. Modern and fossil charcoal: aspects of structure and diagenesis. Journal of Archaeological Science. 2006, 3, pp. 428-439.

Oliveira, C.P.; Alvarez, R.C.F; Lima, S.F.; Contardi, L.M. Produtividade e Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar com o uso de condicionador de solos bioestimulantes. Agrarian. 2013, 6, pp. 245-51.

Oliveira, F.N.S.; Lima, H.J.M.; Cajazeira, J.P. Uso da compostagem em sistemas agrícolas orgânicos. Embrapa Agroindústria Tropical. Fortaleza, CE. 2004.

Paciullo, D.S.C. Características Anatômicas Relacionadas Ao Valor Nutritivo De Gramíneas Forrageiras. Ciência Rural. 2002, 32, pp. 357–364.

Parikh, S.J.; James, B.R. Soil: The Foundation of Agriculture. Nature Education Knowledge. 2012, 3, pp. 2.

Pereira, A.P.; Schoffel, A.; Koefender, J.; Camera, J.N.; Golle, D.P.; Horn, R.C. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura de verão. Revista de Ciências Agrárias. 2017, 40, pp. 120-129.

Petter, F.A.; Lima, L.B.; Morales, M.M.; Júnior, B.H.M.; Morais, L.A. Biocarvão no solo: aspectos agronômicos e ambientais. In: Simpósio brasileiro de agropecuária sustentável, Sinop, 2016. Anais: Ciência, tecnologia e inovação para o desenvolvimento sustentável das novas fronteiras agrícolas. Sinop: Embrapa Florestas. 2016. pp. 73-81.

Portaria n.º 185/2022, de 21 de julho. Available online: [www.diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/185-2022-186429710](http://www.diariodarepublica.pt/dr/detalhe/portaria/185-2022-186429710) (acessado em 20 Janeiro 2025).

Prakash, V.; Kundu, S.; Ghosh, B.N.; Singh R.D.; Gupta, H.S. Annual carbon input to soil through rainfed soybean (*Glycine max*)-wheat (*Triticum aestivum*) cropping sequence in

mid-hills of Northwest Himalaya. *Indian Journal of Agricultural Sciences*. 2002, 72, pp.14-17.

Preap, V.; Zalucki, M.P.; Jhan, G.C. Effect of Fertilizer, Pesticide Treatment, and Plant Variety on the Realized Fecundity and Survival Rates of Brown Planthopper, *Nilaparvata lugens* (Stal) (Homoptera: Delphacidae) - Generating Outbreaks in Cambodia. *Journal of Asia-Pacific Entomology*. 2002, pp. 163-180.

Pretty, J. N. Participatory learning for sustainable agriculture. *World development*. 1995, 23, pp. 1247-1263.

Reguera M.; Bonilla, I.; Bolanos, L.; Boron deficiency results in induction of pathogenesis-related proteins from the PR-10 family during the legume-rhizobia interaction. *Journal of Plant Physiology*. 2010, 167, pp. 625-632.

Resende, A.V. Agricultura e qualidade da água: Contaminação da água por Nitrato. Embrapa Cerrado, Planaltina, DF. 2002.

Rodrigues, M.Â.; Torres, L.N.D.; Damo, L.; Raimundo, S.; Sartor, L.; Cassol, L.C.; Arrobas, M. Nitrogen Use Efficiency and Crop Yield in Four Successive Crops Following Application of Biochar and Zeolites. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*. 2021, 21, pp. 1053-1065.

Sarkar, S.; Singh, S.R.; Singh, R.P. The Effect of Organic and Inorganic Fertilizers on Soil Physical Condition and the Productivity of a Rice–Lentil Cropping Sequence in India. *The Journal of Agricultural Science*. 2003, pp. 419–425.

Sarwar, M. Harmful Effects of Intensive Nitrogen Fertilizer Usage to Humans and Managing of Risks. *Specialty Journal of Agricultural Sciences*. 2018, pp. 9-15.

Savci, S. Investigation of Effect of Chemical Fertilizers on Environment, APCBEE *Procedia*, 2012, 1, pp. 287-292.

Schaefer, R.M.; Magano, D.A.; Spinelli, V.M.; Martins, A.B.; Bratz, I.S.; Fabião, M.B.; Panozzo, L.E.; Aplicação de micronutrientes e seus efeitos na produtividade e qualidade fisiológica de sementes de soja. *Revista Estudo & Debate*. 2023, pp. 20-30.

Semida, W.M.; Beheiry, H.R.; Sétamou, M.; Simpson, C.R.; El-Mageed, T.A.A.; Rady, M.M. Nelson, S.D. Biochar implications for sustainable agriculture and environment: a review. *South African Journal of Botany*. 2019, 127, pp. 333–347.

Siavoshi, M.; Alireza N.; Shankar, L.L. Effect of organic fertilizer on growth and yield components in rice (*Oryza sativa* L.). *Journal of Agricultural Science*. 2011, 3, pp. 217.

Silva, E.C.; Muraoka, T.; Guimarães, G.L.; Buzetti, S. Acúmulo de nutrientes em plantas de cobertura e no milho cultivado em sucessão sob diferentes doses de nitrogênio em Plantio direto. *Revista Brasileira de Milho e Sorgo*. 2006, 5, pp. 202-217.

Sinaj, S.; Traore, O.; Frossard, E. Effect of compost and soil properties on the availability of compost phosphate for white clover (*Trifolium repens* L.). *Nutrient Cycling in Agroecosystems*. 2002, 62, pp. 89-102.

Somavilla, A.; Ramos Marques, A.C.; Caner, L.; Oliveira, L.B.; Quadros, F.L.F.; Chabbi, A.; Tiecher, T.; Santos, D.R.; Phosphate fertilization and liming in a trial conducted over 21 years: A survey for greater forage production and Pampa pasture conservation. *European Journal of Agronomy*. 2021, 125, pp. 126259.

Souza, J.C. Reciclagem e Sustentabilidade Ambiental: A importância Dos Processos logísticos. *Transportes*. 2011, 19, pp. 43-48.

Stevenson, F.J. Cycles of soil. Carbon, Nitrogen, Phosphorus, Sulfur, Micronutrients. John Wiley & Sons, New York. 1986.

Teixeira, R.F.F. Compostagem. *In: Educação ambiental para o desenvolvimento sustentável*. Hammes, V.S. (Org.). Embrapa Informação Tecnológica, Brasília. 2002, pp. 120-123.

Tilman, D.; Balzer, C.; Hill, J.; Befort, B.L. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2011, 108, pp. 20260–20264.

Tilman, D.; Cassman, K.G.; Matson, P.A.; Naylor, R.; Polasky, S. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature*. 2002, 418, pp. 671-677.

Trannin, I.C.B.; Siqueira, J.O.; Moreira, F.M.S. Atributos químicos e físicos de um solo tratado com bio-sólido industrial e cultivado com milho. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 2008, 12, pp. 223-230.

U.S. Congress. Food, Agriculture, Conservation, and Trade Act of 1990. Public Law 101–624: U.S. Farm Bill, 28 November 1990. Available online: [www.govinfo.gov/app/details/COMPS-10649/#:~:text=Title,prices%2C%20and%20for%20other%20purposes](http://www.govinfo.gov/app/details/COMPS-10649/#:~:text=Title,prices%2C%20and%20for%20other%20purposes) (accessed on 14 January 2025).

United Nations, Department of Economic and Social Affairs, Population Division. *World Population Prospects 2024: Summary of Results*. 2024. Available online: [https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2024\\_Summary-of-Results.pdf](https://population.un.org/wpp/assets/Files/WPP2024_Summary-of-Results.pdf) (accessed on 12 January 2025).

United States Department of Agriculture - Foreign Agricultural Service. *Production: Oats*. 2025. Available online: [www.fas.usda.gov/data/production/commodity/0452000](http://www.fas.usda.gov/data/production/commodity/0452000) (Accessed on 14 January 2025).

Varenes, A. *Produtividade dos solos e ambiente*. Escolar Editora, Lisboa. 2003.

Veloso, A.; Sempiterno, C.; Calouro, F.; Rebelo, F.; Pedra, F.; Castro, I.V.; Gonçalves, M.C.; Marcelo, M.E.; Pereira, P.; Fareleira, P.; Jordão, P.; Mano, R.; Fernandes, R. Manual de fertilização das culturas. 3rd ed. Oeiras: Instituto Nacional de Investigação Agrária e Veterinária, 2022. Available online: [www.iniav.pt/divulgacao/publicacoes-bd/manual-fertilizacao-das-culturas](http://www.iniav.pt/divulgacao/publicacoes-bd/manual-fertilizacao-das-culturas) (accessed on 20 January 2025).

Verheijen, F.; Jeffery, S.; Bastos, A.C.; Velde, M.V.D.; Diafas, I. Biochar application to soils: a critical scientific review of effects on soil properties processes and functions. JRC Scientific and Technical Reports. 2010.

Vieira, R.F. Ciclo do nitrogênio em sistemas agrícolas. Embrapa, Brasília, DF. 2017.

Villaluenga, C.M.; Peñas, E. Health benefits of oat: Current evidence and molecular mechanisms. *Current Opinion in Food Science*. 2017, 14, pp. 26-31.

World Commission on Environment and Development (WCED). *Our Common Future* (Oxford and New York: Oxford University Press). 1987. Available online: [www.sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf](http://www.sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf) (accessed on 14 January 2025).

Wetzel, R.G. *Limnologia*. Fundação Calouste Gulbenkian. Espanha. 1993.

Xiong, Z.; Wang, J.; Xu, X.; Huang, Q.; Shen, Q. Mitigating net global warming potential and greenhouse gas intensities by substituting chemical nitrogen fertilizers with organic fertilization strategies in rice–wheat annual rotation systems in China: A 3-year field experiment. *Ecological Engineering*. 2015, 81, pp. 289-297.

Yagüe, J.L.F. *El nitrogeno. El suelo y los fertilizantes*. 4ª Ed, Mundi-prensa, Madrid. 1994.

Zahm, F.; Viaux, P.; Vilain, L.; Girardin, P.; Mouchet, C.; Hani, F. J.; Pintér, L.; Herren, H.R. Farm Sustainability Assessment using the IDEA Method. From the concept of farm sustainability to case studies on French farms. INFASA Symposium. International Institute for Sustainable Development: Winnipeg, MB, Canada. 2006, 14, pp. 77–110.

Zonta, E.; Stafanato, J.B.; Pereira, M.G. Fertilizantes minerais, orgânicos e organominerais. *In* *Recomendações de calagem e adubação para abacaxi, acerola, banana, citros, mamão, mandioca, manga e maracujá*. Borges, A.L.; Embrapa, Brasília. 2021, pp. 263-303.