

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA**

**Plantas de cobertura em cafeeiros terraceados: estratégias para o sequestro  
de carbono e otimização da  
adubação nitrogenada em agricultura de montanha**

Juan Xavier Valarezo Maldonado  
*Magister Scientiae*

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**JUAN XAVIER VALAREZO MALDONADO**

**Plantas de cobertura em cafeeiros terraceados: estratégias para o sequestro  
de carbono e otimização da  
adubação nitrogenada em agricultura de montanha**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Rafael da Silva Teixeira

Coorientadores: Edson Marcio Mattiello  
Julio Cesar Lima Neves

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

V137p  
2025

Valarezo Maldonado, Juan Xavier, 1995-

Plantas de cobertura em cafeeiros terraceados: estratégias para o sequestro de carbono e otimização da adubação nitrogenada em agricultura de montanha / Juan Xavier Valarezo Maldonado. – Viçosa, MG, 2025.

1 dissertação eletrônica (69 f.): il. (algumas color.).

Orientador: Rafael da Silva Teixeira.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Solos, 2025.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.383>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Solos - Conservação. 2. Sequestro de carbono.  
3. Fertilizantes nitrogenados. 4. Café - Rendimento. I. Teixeira, Rafael da Silva, 1988-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. III. Título.

CDD 22. ed. 631.84

**JUAN XAVIER VALAREZO MALDONADO**

**Plantas de cobertura em cafeeiros terraceados: estratégias para o sequestro de carbono e otimização da adubação nitrogenada em agricultura de montanha**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 28 de fevereiro de 2025.

Assentimento:

---

Juan Xavier Valarezo Maldonado  
Autor

---

Rafael da Silva Teixeira  
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 04/06/2025 às 09:19:31 e pelo orientador em 13/06/2025 às 17:10:19. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **MAZT.57KP.W8ZS** e clique no botão 'Validar documento'.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, pela infinita força, paciência, saúde, paz mental, sabedoria e capacidade que me permitiram chegar até aqui. Por abrir as portas e do caminho que me levaram até esta universidade, e no qual após me auxiliar na superação de cada desafio do trajeto me permitirá alcançar meu sonho de ter um título estrangeiro de Magister Scientiae em uma das melhores universidades do mundo.

A minha mãe, que do céu sempre me cuidou e me conduziu pelos caminhos corretos. Apesar de apenas 10 anos de convivência na terra, estes foram suficientes para me ensinar os valores do trabalho e responsabilidade. Este objetivo também é seu mãe e espero que sempre esteja orgulhosa de mim.

Ao meu pai, pelo apoio incondicional e pela preocupação mesmo estando em outro país. Por todos os valores e atitudes que me ensinou ao longo dos anos, os quais me permitiram ter a fortaleza e disciplina para superar cada etapa.

A minha esposa, por todo o amor e confiança que me entregou dia a dia, por me entregar paz e tranquilidade para me concentrar nos meus estudos e capacitação. Obrigado por acreditar em mim sempre, mesmo quando eu não acreditava; pelo apoio e paciência; e o mais importante, obrigado por compartilhar comigo esta aventura chamada vida.

Ao meu orientador Rafael Da Silva Teixeira, pela paciência, apoio e ânimo que sempre me deu, por me compreender ao longo do caminho e por todos os conhecimentos que me ensinou para chegar até este momento.

Aos meus coorientadores e docentes, que com paciência e entrega me compartilharam seus conhecimentos. Seus ensinamentos não só me formaram como profissional, também deixaram muito valores como ser humano, os quais irei levar comigo na vida profissional e pessoal.

Aos meus colegas e meu amigo Diego que conheci durante o mestrado, obrigado pelo ânimo e ajuda, por compartilhar ensinamentos e por fazer deste caminho uma experiência enriquecedora. Vocês foram uma parte fundamental deste capítulo inolvidável.

À Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade de realizar a pós-

graduação sem importar que seja estrangeiro, por me permitir cumprir meu sonho e por me formar de uma maneira muito diferenciada.

Finalmente agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos em nível de mestrado. Ao consórcio pesquisa em café – ConCafé da EMBRAPA pelo financiamento para a elaboração e execução do projeto de pesquisa e à Fundação Agrisus pelo apoio financeiro parcial na execução da pesquisa.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

## RESUMO

MALDONADO, Juan Xavier Valarezo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2025. **Plantas de cobertura em cafeeiros terraceados: estratégias para o sequestro de carbono e otimização da adubação nitrogenada em agricultura de montanha.** Orientador: Rafael da Silva Teixeira. Coorientadores: Edson Marcio Mattiello e Julio Cesar Lima Neves.

O Brasil é um dos maiores produtores e exportadores de café do mundo. No estado de Minas Gerais (MG), o cultivo de café arábica (*Coffea arabica*) representa mais de 70% da produção nacional. Na região das Matas de Minas, caracterizada por uma agricultura de montanha, diversos desafios limitam a sustentabilidade do sistema produtivo, como a impossibilidade de mecanização, elevados níveis de degradação do solo e baixa eficiência na utilização de fertilizantes, devido ao escoamento superficial. A construção de terraços em áreas de encosta tem se mostrado uma alternativa viável, por facilitar o tráfego de máquinas, permitir maior tecnificação e contribuir para a conservação do solo. No entanto, a implantação de terraços provoca um distúrbio inicial no solo, resultando em perdas de matéria orgânica, nutrientes e estrutura, principalmente nas camadas superficiais. Assim, estratégias eficazes de recuperação da fertilidade e qualidade do solo são essenciais para garantir a sustentabilidade e produtividade da cafeicultura em áreas montanhosas. Diante disso, este estudo avaliou o uso de plantas de cobertura (leguminosa e gramínea) nas entrelinhas de cafeeiros terraceados como estratégia para o restabelecimento e incremento do carbono (C) no solo e melhoria do manejo nutricional das plantas de café. O trabalho foi dividido em dois experimentos: Experimento 1 – Plantas de cobertura em cafeeiros terraceados como estratégia de sequestro de carbono em agricultura de montanha; e Experimento 2 – Plantas de cobertura na otimização da adubação nitrogenada em cafeeiros terraceados em agricultura de montanha. No Experimento 1, analisou-se o impacto da construção de terraços sobre os estoques de C, bem como o efeito do uso de *Brachiaria* (*Urochloa ruziziensis*-BR) e *Arachis pintoi* (amendoim forrageiro-AF) na recuperação e incremento dos estoques de C e N nas camadas 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm do solo, ao longo de quatro anos de cultivo. No Experimento 2, investigou-se a possibilidade de reduzir a adubação nitrogenada mineral com o uso de BR e AF, por meio da aplicação de diferentes doses de ureia (0, 100, 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup>), avaliando-se a decomposição da fitomassa (via método de litterbags), o status nutricional dos cafeeiros e a produtividade. Os resultados indicaram que a BR forneceu maior aporte de C via fitomassa na superfície, enquanto o AF

promoveu maior recuperação de carbono orgânico total (COT) no perfil do solo (0–60 cm). A decomposição da fitomassa de ambas as espécies liberou quantidades significativas de nutrientes em até 180 dias após o corte, impactando positivamente a nutrição dos cafeeiros, especialmente com AF. Houve aumento de produtividade de 22,5% (AF) e 14,45% (BR), com redução na necessidade de N-ureia em 70,0% e 66,74%, respectivamente, em comparação com o manejo convencional sem cobertura.

Palavras-chave: Matéria orgânica Particulada-MOP; Matéria orgânica associada aos minerais-MOAM; Déficit de saturação de carbono – DCS; CO<sub>2</sub> equivalente; Produtividade do café; Litterbags; Decomposição de fitomassa; DRIS; KW

## ABSTRACT

MALDONADO, Juan Xavier Valarezo, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2025. **Cover crops in terraced coffee plantations: strategies for carbon sequestration and optimization of nitrogen fertilization in mountain agriculture.** Adviser: Rafael da Silva Teixeira. Co-advisers: Edson Marcio Mattiello and Julio Cesar Lima Neves.

Brazil is one of the largest coffee producers and exporters in the world. In the state of Minas Gerais (MG), Arabica coffee (*Coffea arabica*) accounts for over 70% of the national production. In the Matas de Minas region, characterized by mountainous agriculture, several challenges hinder sustainable production, such as the impossibility of mechanization, high levels of soil degradation, and low fertilizer use efficiency due to surface runoff. Terracing in sloped areas has emerged as a viable strategy to address these issues, as it facilitates machinery traffic, allows for greater technification, and contributes to soil conservation. However, the implementation of terraces causes initial soil disturbance, leading to losses in organic matter, nutrients, and structure, especially in surface layers. Therefore, effective strategies for restoring soil fertility and quality are essential to ensure the sustainability and productivity of mountain coffee farming systems. This study aimed to evaluate the use of cover crops (legume and grass species) in the inter-rows of terraced coffee plantations as a strategy to restore and enhance soil carbon (C) stocks and improve nutrient management in coffee plants. The research was divided into two experiments: Experiment 1 – Using cover crops on terraced coffee plantations as a carbon sequestration strategy in mountain agriculture; and Experiment 2 – Cover crops for optimizing nitrogen fertilization in terraced coffee plantations in mountain agriculture. In Experiment 1, the impact of terrace construction on C stocks was assessed, along with the effects of *Brachiaria* (*Urochloa ruziziensis*-BR) and *Arachis pintoi* (forage peanut-AF) on the recovery and increase of C and N stocks in the 0–10, 10–20, 20–40, and 40–60 cm soil layers over a four-year cultivation period. In Experiment 2, the possibility of reducing mineral nitrogen fertilization through the use of BR and AF was evaluated by applying different urea doses (0, 100, 150, and 300 kg ha<sup>-1</sup>). Litter decomposition (via the litterbag method), the nutritional status of coffee plants, and coffee yield were assessed across treatments. Results showed that BR contributed greater surface C input via biomass, while AF was more effective in recovering total organic carbon (TOC) throughout the soil profile (0–60 cm). Biomass decomposition from both species released substantial amounts of nutrients within 180 days post-cutting, positively influencing the nutritional status of coffee plants, particularly under AF.

Coffee

productivity increased by 22.5% (AF) and 14.45% (BR), with reductions in N-urea requirements of 70.0% and 66.74%, respectively, compared to coffee plants without cover crops under conventional management.

Keywords: Particulate organic matter-MOP; Mineral-associated organic matter-MOAM; Carbon saturation deficit – DCS; CO<sub>2</sub> equivalent; Coffee productivity; Litterbags; Phytomass decomposition; DRIS; KW

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL .....	11
Capítulo 1 - Plantas de cobertura em cafeeiros terraceados como estratégia de sequestro de carbono em agricultura de montanha.....	13
1. INTRODUÇÃO .....	14
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
2.1. Caracterização da área experimental .....	15
2.2. Terraceamento e preparo do solo.....	18
2.3. Plantio do cafeeiro .....	18
2.4. Desenho experimental .....	19
2.5. Manejo e amostragem da fitomassa das plantas de cobertura. ....	19
2.6. Coleta e análise do solo .....	20
2.6.1. Fracionamento da Matéria Orgânica do solo.....	20
2.6.2. Densidade do Solo (Ds).....	21
2.6.3. Estoque de carbono (C) e Nitrogênio (N).....	21
2.6.4. Déficit de saturação de C (DSC), Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) removido e Potencial de remoção de CO <sub>2</sub> .....	22
2.7. Produtividade do café .....	23
2.8. Análise estatística .....	24
3. RESULTADOS .....	24
3.1. Produção de fitomassa e carbono aportado pelas plantas de cobertura.....	24
3.2. Estoque de carbono (COT) e nitrogênio (NT) nas camadas do solo .....	26
3.3. Déficit de saturação de C (DSC), Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) removido e Potencial de remoção de CO <sub>2</sub> .....	29
3.4. Produtividade do café do ano 2024 .....	32
4. DISCUSSÃO .....	33
4.1. Efeito da confecção do terraço na perda de carbono do solo .....	33
4.2. Efeito das plantas de cobertura para a recuperação do C do solo.....	33
4.3. Produção do café .....	35
5. CONCLUSÕES .....	36
6. REFERÊNCIAS .....	38
7. APÊNDICES .....	41
CAPÍTULO 2 – Plantas de cobertura na otimização da adubação nitrogenada em cafeeiros terraceados em agricultura de montanha .....	43
1. INTRODUÇÃO.....	44

2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
2.1. Caracterização de área experimental.....	45
2.2. Desenho experimental .....	46
2.3. Manejo e amostragem da fitomassa das plantas de cobertura. ....	46
2.4. Decomposição da fitomassa das plantas de cobertura e liberação de nutrientes.....	47
2.5. Status nutricional das plantas de café.....	48
2.6. Produtividade do café.....	48
2.7. Análise estatística .....	49
3. RESULTADOS .....	49
3.1. Produção de fitomassa e nutrientes das plantas de cobertura.....	49
3.2. Decomposição dos resíduos e liberação de nutrientes.....	51
3.3. Status nutricional das plantas de café.....	56
3.3.1. Sistema Integrado de Diagnose e recomendação (DRIS) e Índices balanceados de Kenworthy (BIK).....	57
3.4. Produtividade do café.....	59
4. DISCUSSÃO.....	61
4.1. Fitomassa e liberação de nutrientes das plantas de cobertura. ....	61
4.2. Status nutricional e produtividade das plantas de café.....	63
5. CONCLUSÕES.....	65
6. REFERÊNCIAS .....	66
CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	69

## INTRODUÇÃO GERAL

O café é uma cultura com maior relevância no Brasil, sendo produzido em maior quantidade no estado de Minas Gerais (MG) (BREGAGNOLI; NETO, 2017). Dentro de MG, às regiões Sul e Zona da Mata são os maiores produtores de café do estado, conhecidas também pelas características similares de relevo acidentado (agricultura de montanha). Este cenário impõe restrições ao desenvolvimento de uma agricultura mais mecanizada, a qual é agravada pela dificuldade de realizar as principais práticas agrícolas (VILELA; RUFINO, 2010). Adicionalmente, encontram-se outros problemas pontuais da agricultura de montanha como o potencial de agravamento dos processos erosivos o que provoca perda de solo, nutrientes e matéria orgânica, impactando na produtividade da cultura (DURÁN et al., 2020).

Neste contexto, existem diferentes práticas conservacionistas que nos permite reduzir as perdas de nutrientes e matéria orgânica do solo geradas pelo relevo acidentados das áreas de cultivo. Dentro destas praticas a construção de terraços (pratica mecânica) e o uso de plantas de cobertura (pratica vegetativa) são, talvez, as mais populares e conhecidas na agricultura (GOMES et al., 2009). A construção de terraços, quando bem manejados, é eficiente no controle de processos erosivos, promovendo a redução de escoamento e conservação da água (DENG et al., 2021). Entretanto, no momento da construção dos terraços e quando mal manejados provocam diminuição dos estoques de carbono total no solo (COT) (VOGEL; CONEDERA, 2020; ZHOU et al., 2015).

As plantas de cobertura (PC) podem ser consideradas como uma boa estratégia aliadas à construção dos terraços, já que ajudam na redução dos efeitos negativos (POESEN et al., 2003). O aporte de fitomassa acima do solo ajudam na recuperação do COT, além de outros benefícios como o fornecimento e ciclagem de nutrientes (BLANCO-CANQUI; RUIS, 2020). Mas o uso de PC deixa vários pontos importantes por considerar, como por exemplo, a competição por nutrientes com a cultura de café e os nutrientes necessários para a decomposição da fitomassa aportada ao sistema, o que pode afetar o status nutricional do café nesse ambiente de competição.

Dentro desses nutrientes em competência, o nitrogênio é de grande relevância por ser o nutriente mais demandado pelas plantas e, portanto, mais restrigente para a produção agrícola (GARCÍA et al., 2010), por tanto seu adequado manejo é essencial para obter altas produtividades. No entanto, além de ser importante para a cultura, ele é importante nos momentos iniciais da decomposição de fitomassa aportada ao solo. Isso é chave porque, além da perturbação inicial na confecção dos terraços provocando perda da MOS, quando existe uma

alteração do resíduo orgânico aportado ao solo (uso de plantas de cobertura e mudança de cultivo na área) essa perda aumenta (BALESDENT; CHENU; BALABANE, 2000), e enquanto o sistema não chegar ao equilíbrio entre imobilização e mineralização, os nutrientes necessários para mineralizar os novos compostos serão adquiridos do solo, o que pode provocar efeitos negativos ao cultivo presente nessa situação.

Diante o exposto, o presente estudo visa avaliar o uso de plantas de cobertura no cultivo terraceado de cafeeiro com a finalidade de conhecer o comportamento na recuperação de C e a otimização do uso de fertilizante nitrogenado. Portanto a pesquisa foi dividida em dois capítulos, o capítulo 1. *Plantas de cobertura em cafeeiros terraceados como estratégia de sequestro de carbono em agricultura de montanha* e o capítulo 2. *Plantas de cobertura na otimização da adubação nitrogenada em cafeeiros terraceados em agricultura de montanha* têm como objetivo avaliar os estoques de C, produção e aporte de fitomassa de parte aérea das plantas de cobertura (Amendoim Forrageiro e Braquiária), e o déficit de saturação de C nos solos dos cafezais terraceados sem e com plantas de cobertura. Assim como avaliar o padrão de liberação de nutrientes pela fitomassa das plantas de cobertura, o efeito no status nutricional das plantas de café e a produtividade das plantas de café quando aplicadas diferentes doses de N-Ureia e com ou sem plantas de cobertura nas entrelinhas.

## Capítulo 1 - Plantas de cobertura em cafeeiros terraceados como estratégia de sequestro de carbono em agricultura de montanha

### RESUMO

A região das Matas de Minas (MG) é caracterizada pela prática de agricultura de montanha, em solos altamente intemperizados e ácidos. Nessa condição, práticas adequadas de manejo e conservação do solo são fundamentais para garantir a sustentabilidade da produção agrícola. Este estudo teve como objetivo avaliar os estoques e o déficit de saturação de carbono (C) ao longo de quatro anos de manejo com plantas de cobertura (*Arachis pintoi* e *Urochloa ruziziensis*) nas entrelinhas de cafeeiros cultivados em terraços na região das Matas de Minas. O experimento foi conduzido no município de Viçosa-MG, em delineamento em blocos casualizados com três repetições e três tratamentos: i) ausência de plantas de cobertura (SP – vegetação espontânea), ii) *Arachis pintoi* (AF), e iii) *Urochloa ruziziensis* (BR). Foram monitorados os estoques de C e nitrogênio (N) totais nas profundidades de 0–10, 10–20, 20–40 e 40–60 cm, durante quatro anos. Também foram calculados o déficit de saturação de carbono (DSC), o CO<sub>2</sub> removido pelo solo e o potencial de remoção de CO<sub>2</sub> acumulado ao final do período experimental. Além disso, quantificaram-se o aporte de C via fitomassa aérea das plantas de cobertura e a produtividade dos cafeeiros no quarto ano. A produção de fitomassa aérea e o aporte de C foram maiores com BR; entretanto, o uso de AF promoveu maiores estoques de C e N nas camadas 0–10, 20–40 e 40–60 cm, em comparação com o tratamento SP. O DSC foi consistentemente menor com o uso de AF nas entrelinhas, em todas as profundidades analisadas. A presença de AF também resultou em maior quantidade de CO<sub>2</sub> removido e menor potencial remanescente de remoção de CO<sub>2</sub> em relação ao manejo sem plantas de cobertura. No que se refere à produtividade, o uso de BR e AF proporcionou aumentos expressivos de 105,70% (36,66 sacas ha<sup>-1</sup>) e 102,60% (36,11 sacas ha<sup>-1</sup>), respectivamente, em comparação ao tratamento SP (17,82 sacas ha<sup>-1</sup>) no ano de 2024. Os resultados demonstram que o manejo com AF e BR nas entrelinhas de cafeeiros terraceados é uma estratégia promissora para o incremento do C no solo, mitigação do déficit de saturação de carbono e aumento da produtividade em sistemas de agricultura de montanha.

**Palavras-chave:** Déficit de saturação de carbono – DCS; Estoques de carbono no solo; Sequestro de carbono; Conservação do solo.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil figura entre os principais produtores e exportadores de café do mundo, sendo que o estado de Minas Geras (MG) responde por cerca de 53 % da produção nacional (BREGAGNOLI; NETO, 2017). Em Minas Gerais, cerca de 70 % da produção corresponde às regiões Sul e Zona da Mata, as quais apresentam características similares de relevo acidentado (agricultura de montanha). Este cenário impõe restrições ao desenvolvimento de uma agricultura mais mecanizada, a qual é agravada pela dificuldade em encontrar mão de obra para as principais práticas agrícolas (VILELA; RUFINO, 2010). Adicionalmente, outros aspecto relevante na agricultura de montanha é o maior potencial de agravamento dos processos erosivos, ocasionando perda de solo e escoamentos superficiais que impacta na produtividade da cultura (DURÁN et al., 2020).

Neste contexto, a implantação de terraços constitui uma estratégia conservacionista para o controle de processos erosivos, promovendo a redução de escoamento e conservação da água, controle da erosão e conservação do solo, além do possível aumento no rendimento das culturas (DENG et al., 2021). Entretanto, no momento da confecção dos terraços há um impacto promovido pela movimentação do solo, como a remoção da camada fértil superficial do solo (LIANG et al., 2018), com conseqüente diminuição dos estoques de carbono total no solo (COT) (VOGEL; CONEDERA, 2020; ZHOU et al., 2015), além da área permanecer imediatamente descoberta pela eliminação da coberta vegetal, provocando uma estrutura instável e susceptível à erosão.

Neste sentido, o manejo de plantas de cobertura (PC's) aliadas a confecção dos terraços constituem estratégias potencias em amortecer os impactos deletérios no solo, uma vez que elas permitem a cobertura do solo minimizando o impacto das gotas da chuva na superfície e reduzindo a erosão hídrica (POESEN et al., 2003). Além disso, o grande aporte de fitomassa das PC's na superfície do solo aliado ao crescimento radicular liberando rizodeposições em subsuperfície, auxiliam no aumento dos estoques de C e N (quando presente leguminosas), conseqüentemente estabilizando agregados, aumentando a porosidade e reduzindo a densidade do solo (BLANCO-CANQUI; RUIS, 2020), e por fim desenvolvendo papel importante no controle de plantas espontâneas e ciclagem de nutrientes no sistema (MUÑOZ et al., 2014).

Um fator importante que tem que se considerar para a recuperação dos estoques de COT é a capacidade que os solos apresentam de estabilizar a matéria orgânica do solo (MOS). Embora cada solo tenha um nível de "Saturação de C" diferentes (SIX et al., 2002), baseados em processos físico-químicos que estabilizam ou protegem os compostos orgânicos do solo, todos apresentam três mecanismos principais de estabilização da MOS: estabilização química,

estabilização bioquímica e proteção física. Por sua vez, a estabilização química e física possui estreita relação com a quantidade de silte e argila que o solo possui, assim, solo com maiores teores de silte e argila possuem maior capacidade de estabilização de MOS (SIX et al., 2002). Desta forma, o entendimento do potencial de saturação de C de um solo e o quanto ainda falta para a sua saturação (“Déficit de Saturação de C – DSC”) é extremadamente importante para nortear práticas de manejo mais adequadas.

Assim, espécies das famílias de gramíneas (Poaceae) e leguminosas (Fabaceae) são as mais comumente utilizadas como PC's. Plantas gramíneas apresentam não apenas um expressivo input de C via produção de fitomassa de parte aérea para a superfície do solo, mas também com grande aporte de C via rizodeposições (LANGE et al., 2015), os quais auxiliam grandemente na estrutura do solo e redução da erosão (MANDAL et al., 2017). Em contrapartida, plantas leguminosas por serem capazes de formar associações com microrganismos fixadores de N<sub>2</sub> (CHAER et al., 2011), favorece um aumento da disponibilidade de N no solo (LANGE et al., 2015) estimulando a atividade microbiana e vias de formação de MOS (COTRUFO et al., 2015).

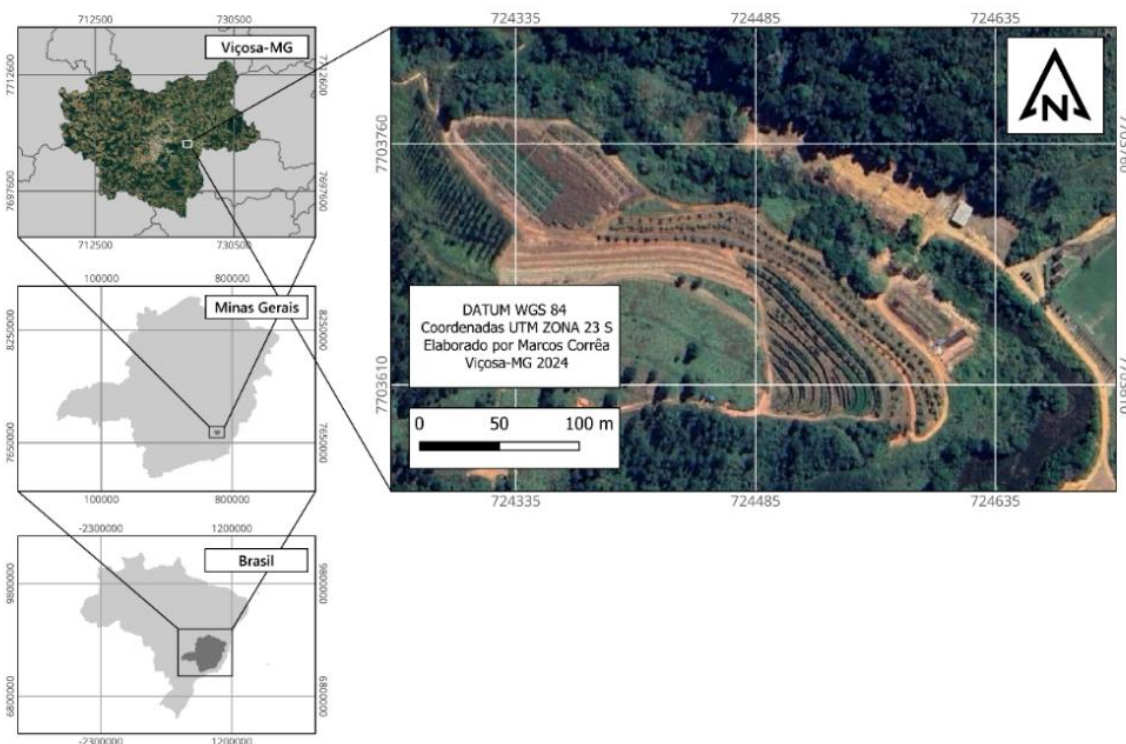
Apesar disso, ainda carecemos de informações sobre a eficácia da combinação de práticas vegetativas (plantas de cobertura) e mecânicas (terraços) na recuperação e estocagem de C em solo cultivados com cafeeiros em agricultura de montanha. Desta forma, a hipótese do presente estudo é que: i) o manejo de uma planta leguminosa (Amendoim forrageiro – AF) na entrelinha do cafeeiro terraceado irá promover maiores incrementos nos estoques de C no solo em relação a cafeeiros manejados com plantas gramíneas (Braquiária – BR) ou sem plantas (plantas espontâneas - SP). Para isso, o objetivo do estudo foi avaliar a dinâmica dos estoques de C e N totais nas profundidades de 0-10, 10-20, 20-40 e 40-60 cm ao longo de 48 meses do cultivo de cafeeiro. Além disso, calcular o DSC, CO<sub>2</sub> removido no solo e o potencial de remoção de CO<sub>2</sub> no solo, o C advindo da fitomassa acumulada das plantas de AF e BR e a produtividade dos cafeeiros 48 meses após o plantio.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### *2.1. Caracterização da área experimental*

O experimento foi conduzido na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão (UEPE) do Departamento de Solos (DPS) da Universidade Federal de Viçosa (UFV), localizada no município de Viçosa-MG (20°45'12,82"S; 42°50'37,22"O, 705 m de elevação) (Figura 1). A precipitação média anual é de 1251 mm, sendo novembro, dezembro e janeiro os meses com maiores precipitações, e uma temperatura média de 20,4 °C (Figura 2).

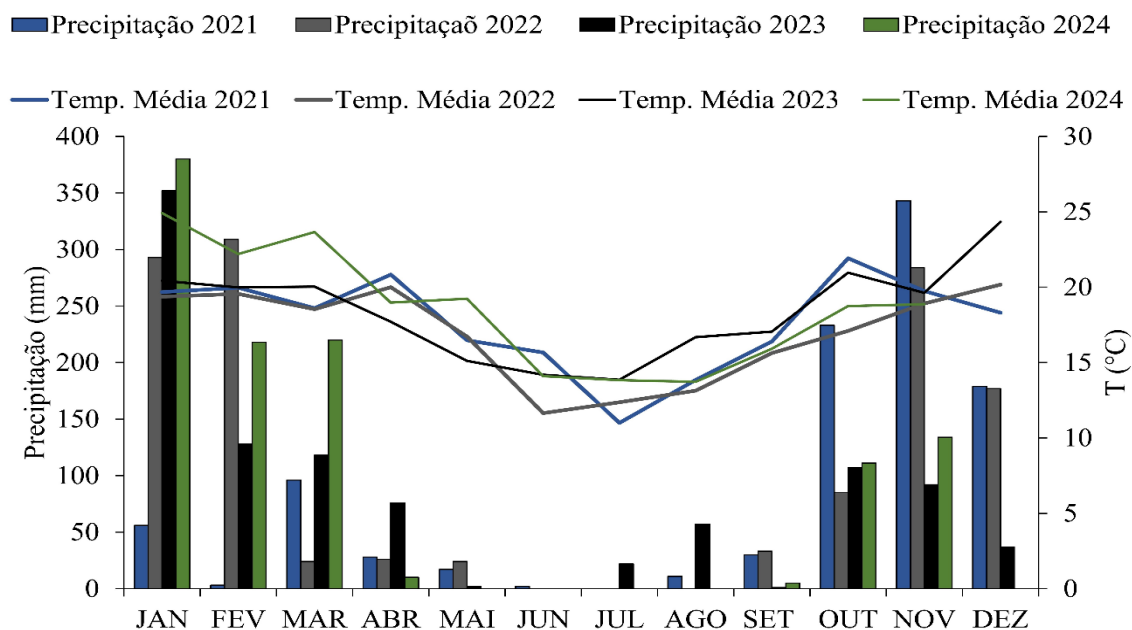
**Figura 1** - Localização da área experimental na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão do Departamento de Solos – DPS da Universidade Federal de Viçosa – UFV (UEPE Solos)



Fonte: elaborado por Marcos Corrêa

Nota: Imagem coletada de Google Earth (2024)

**Figura 2** - Precipitação e temperatura média ao longo do período experimental



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Nota: Os dados foram coletados em IMET (2024).

**Tabela 1** - Características químicas e físicas do Latossolo Vermelho-Amarelo da área experimental

Profundidade	pH	P	K	S	Zn	Cu	Mn	Fe	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	t	T	V	m	MO	P-rem	Areia grossa	Areia fina	Silte	Argila
cm	H <sub>2</sub> O	mg dm <sup>-3</sup>							cmolc dm <sup>-3</sup>							%	dag kg <sup>-1</sup>	mg L <sup>-1</sup>	kg kg <sup>-1</sup>				
0-10	6.54	66.38	257.75	30.50	4.41	1.63	24.20	21.65	3.48	1.26	0.00	1.93	5.40	5.40	7.33	74.10	0.00	2.40	22.70	0.22	0.16	0.09	0.53
10-20	5.95	21.60	210.75	54.70	3.56	1.75	21.00	25.13	2.68	0.86	0.15	2.68	4.08	4.08	6.75	59.60	0.00	2.43	19.40	0.18	0.15	0.10	0.56
20-40	5.29	2.93	104.50	59.43	0.61	1.68	7.25	21.35	1.39	0.47	0.05	3.43	2.12	2.17	5.15	41.20	2.60	1.57	13.95	0.15	0.14	0.09	0.63
40-60	4.82	2.23	61.00	17.18	0.51	1.54	5.63	18.80	1.01	0.35	0.15	2.85	1.52	1.66	4.37	34.38	9.78	1.27	10.45	0.14	0.13	0.09	0.65

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

## 2.2. Terraceamento e preparo do solo

O experimento foi instalado em área terraceada, na qual a confecção dos terraços foi realizada em outubro de 2019 com uma retroescavadeira, sendo construídos terraços do tipo patamar, com 4 metros de largura, seguindo as curvas de nível do terreno. Em seguida foi aplicado calcário na dose de  $4 \text{ Mg ha}^{-1}$ , sendo incorporado com uma grade. Para promover a estabilização dos terraços, foi realizado o semeio à lanço de *Urochloa ruziziensis* (Figura 3).

**Figura 3** - Preparo dos terraços: Construção dos terraços (A); aplicação do calcário (B); semeio da *Urochloa ruziziensis* em terraço gradeado (C); terraços estabilizados (D)



Fonte: Banco de dados do grupo Gefert.

## 2.3. Plantio do cafeeiro

Em abril de 2020, foram realizados sulcos de 60 cm de profundidade, com o sulcador de 3 pontos, no centro do terraço e realizado o plantio de mudas de café da variedade Paraíso, pertencente a *Coffea arabica* L, no espaçamento de  $0,5 \times 6,0$  m. Adicionalmente, foi plantado uma área não terraceada, no qual o plantio do cafeeiro foi realizado em covas de  $0,40 \times 0,40 \times 0,40$  m em espaçamento  $0,5 \times 3,0$  m.

As aplicações de corretivos, gesso, cama de frango e fertilizantes seguiram a recomendação de RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ (1999), na área dos terraços foram aplicados  $0,60$ ,  $0,25$ ,  $1,50 \text{ kg m}^{-1}$  de Calcário, Gesso e Cama de frango, respectivamente. Além

disso, foi aplicado 200 g m<sup>-1</sup> de Superfosfato simples (SS) e P reativo natural. Na área sem terraços foi aplicado 0,20, 3,00 e 0,30 kg cova<sup>-1</sup> de calcário, cama de frango e SS, respectivamente.

Os teores de nutrientes na cama de frango foram de 250,00, 21,00, 7,00, 30,00, 20,00 e 5,00 g kg<sup>-1</sup> de C, N, P, K, Ca e Mg, respectivamente.

Os insumos corretivos e fertilizantes, tanto minerais quanto orgânicos, foram incorporados de forma homogênea ao solo com o auxílio de grade niveladora, visando garantir uma distribuição uniforme e prevenir a formação de depressões que possam favorecer o acúmulo excessivo de água e, conseqüentemente, ocasionar o afogamento do colete.

#### 2.4. Desenho experimental

Em 2021 foi instalado o experimento em delineamento em blocos casualizados – DBC sendo três tratamentos com três repetições: sem plantio de planta de cobertura na entrelinha do cafeeiro – SP; com plantio de *Urochloa ruziziensis* (Braquiária) na entrelinha do cafeeiro – BR e com plantio de *Arachis pintoi* (Amendoim forrageiro) na entrelinha do cafeeiro – AF. Em todos os tratamentos a adubação de produção foi realizada anualmente com aplicação de 150, 65, 300, 1,0 e 0,5 kg ha<sup>-1</sup> de N – Ureia, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-MAP, K<sub>2</sub>O-KCl, Zn-ZnCl<sub>2</sub> e B-HBO<sub>3</sub>, respectivamente.

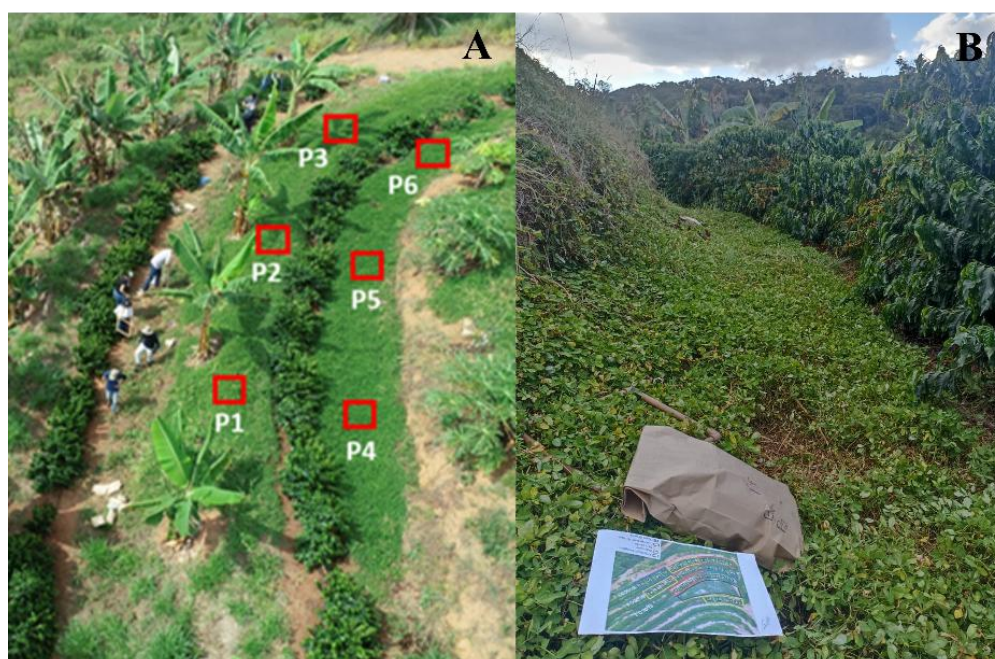
Adicionalmente, foi mantido a condução de um tratamento na área não terraceada (ST), contendo somente plantas espontâneas. Cada tratamento com terraço apresentou-se nove plantas totais das quais cinco eram consideradas uteis, no caso da área não terraceada as plantas totais são 12 das quais seis eram uteis.

#### 2.5. Manejo e amostragem da fitomassa das plantas de cobertura.

O plantio das plantas de cobertura no caso do amendoim forrageiro foi feito por mudas e para a braquiária usou-se semente. Após o plantio das plantas de cobertura, o manejo da fitomassa foi realizado anualmente por meio da realização de três cortes da fitomassa da parte área na temporada chuvosa (meses de dezembro, fevereiro e abril). Para a quantificação da fitomassa acumulada aportada durante o tempo de estudo, foram coletadas sete amostras de fitomassa referentes aos cortes de abril e dezembro do 2022, fevereiro, abril e dezembro do 2023 e fevereiro e abril do 2024. Nas parcelas SP foi realizado o controle químico por meio da aplicação de 1 L ha<sup>-1</sup> do produto glifosato na época chuvosa.

A parte aérea das plantas de cobertura foram coletadas em seis pontos, dentro de cada parcela, referentes a três postos de cada lado das entrelinhas no terraço (Figura 4a). Para isso, foi feito um corte rente ao solo de todo o material vegetal circundado por um gabarito com área útil conhecida (1600 cm<sup>2</sup>; Figura 4b). As amostras do material vegetal foram acondicionadas em papel kraft, levadas ao laboratório e secas em estufa de circulação de ar forçado (60°C), até atingir peso constante, sendo determinada a massa da matéria seca (mMS).

**Figura 4** - Esquema de pontos de coleta da fitomassa da parte aérea das plantas de cobertura (A), utilizando um gabarito de 1600 cm<sup>2</sup> (B)



Fonte: Banco de dados do grupo Gefert.

Posteriormente, foram determinados os teores de C e N em cada planta de cobertura utilizando o espectrômetro de massa de razão isotópica (IRMS 20-20 ANCA-GLS, Sercon, Crewe, UK).

### 2.6. Coleta e análise do solo

Foram coletadas amostras de solo em diferente profundidade 0-10, 10-20, 20-40, 40-60 cm, antes da instalação do experimento e a partir do ano 2022. Anualmente, continuou-se coletando amostras de solo na linha e na entrelinha do cultivo. Todas as amostras foram secas e passadas por peneira de 2 mm para posterior análises.

#### 2.6.1. Fracionamento da Matéria Orgânica do solo

A fração granulométrica separou-se em MOS em Matéria Orgânica Particulada (MOP) e Matéria Orgânica Associada aos Minerais (MOAM) conforme a metodologia de (CAMBARDELLA; ELLIOTT, 1992). Posteriormente, foram determinados os teores de C e N em cada uma dessas frações, utilizando o espectrômetro de massa de razão isotópica (IRMS 20-20 ANCA-GLS, Sercon, Crewe, UK). Com os resultados obtidos das frações MOP e MOAM foi possível quantificar o Carbono total (COT) e nitrogênio total (NT), como a soma respectiva das duas frações.

### 2.6.2. Densidade do Solo ( $D_s$ )

A densidade do solo foi calculada mediante o método do anel volumétrico, onde cada anel utilizado foi pesado ( $M_R$ ), medido o diâmetro ( $d$ ) e largura ( $L$ ), para posteriormente, uma vez coletada a amostra, pesar e deixar na estufa a 100-105°C por 48 horas, se retirou e colocou no dessecador até atingir a temperatura ambiente, finalmente foi pesado ( $M_{(R+Solo)}$ ) e calculado segundo a Equação 1:

$$D_s = \frac{M_{solo}}{V_T} = \frac{4(M_{(R+Solo)} - M_{(R)})}{\pi d^2 L} \quad (1)$$

### 2.6.3. Estoque de carbono (C) e Nitrogênio (N)

A partir dos teores de C ou N ( $g\ kg^{-1}$ ), da profundidade da camada do solo ( $D$ , m), da densidade do solo ( $\sigma$ ,  $kg\ dm^{-3}$ ) e da constante para extrapolar os dados em  $Mg\ ha^{-1}$  ( $10$ ), foram calculadas as quantidades de C ou N ( $Mg\ ha^{-1}$ ) para todas as amostras de solo na linha e entrelinha, além das profundidades, conforme a Equação 2:

$$C = C_{conc} \times D \times \sigma \times 10\ (Mg\ ha^{-1}),\ N = N_{conc} \times D \times \sigma \times 10\ (Mg\ ha^{-1}) \quad (2)$$

Adicionalmente, os valores calculados de C e N foram ponderados conforme a Equação 3.

$$COT (Mg ha^{-1}) = [COT na linha (Mg ha^{-1}) \times 1/6] + [COT na entrelinha (Mg ha^{-1}) \times 5/6], NT (Mg ha^{-1}) = [NT na linha (Mg ha^{-1}) \times 1/6] + [NT na entrelinha (Mg ha^{-1}) \times 5/6]$$

(3)

Onde,  $COT (Mg ha^{-1})$  é a quantidade de C total da parcela;  $COT$  ou  $NT$  na linha ( $Mg ha^{-1}$ ) é a quantidade de C ou N na linha do plantio de café;  $COT$  ou  $NT$  na entrelinha ( $Mg ha^{-1}$ ) é a quantidade de C ou N na entrelinha do plantio de café;  $1/6$  é o fator de ponderação de área de linha e  $5/6$  é o fator de ponderação de área da entrelinha pelo espaçamento de  $0,5 \times 6,0$  m e considerando uma faixa de 1 m de influência da linha do plantio.

Após a obtenção dos conteúdos COT, foram testados nove modelos matemáticos usando anova da regressão, nas camadas de 0-20 e 40-60 cm de cada planta de cobertura, possibilitando modelar o comportamento COT do solo considerando os valores antes e depois da confecção dos terraços; anos 0 (2020), 2 (2022), 3 (2023) e 4 (2024).

Além das regressões foi calculado o delta estoque de C que o solo apresenta em todas as profundidades avaliadas, é dizer, a diferença existente entre os tratamentos e a área não terraceada, representando assim a quantidade que ainda falta para que cada tratamento consiga igualar o carbono existente na área não terraceada.

#### 2.6.4. Déficit de saturação de C (DSC), Dióxido de carbono ( $CO_2$ ) removido e Potencial de remoção de $CO_2$

Para a determinação do DSC, nas diferentes profundidades, foi calculado o nível de saturação de carbono (NSC,  $g kg^{-1}$  C solo) utilizando a relação entre a textura do solo e conteúdo de C ( $g kg^{-1}$ ) conforme a Equação 4 (SIX et al., 2002):

$$NSC = 0.26 \times (teor de silte + argila) + 5,50 \quad (4)$$

E finalmente, para foi calculado o DSC (%), segundo STEWART et al. (2009) com base ao C-MOAM no solo a diferente profundidade, aplicando a Equação 5:

$$DSC = (1 - (C / NSC)) * 100 \quad (5)$$

Para a determinação do  $CO_2$  removido e potencial de remoção de  $CO_2$  foram aplicadas as equações 6 e 8, respectivamente:

$$CO_2 \text{ removido} = (COT \times M_{CO_2}/M_C) / 1000 \text{ (Gg ha}^{-1}\text{)} \quad (6)$$

Onde,  $CO_2 \text{ removido}$  é a quantidade de  $CO_2$  que foi estocado no solo;  $COT$  é a quantidade de carbono estocado após 4 anos ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ );  $M_{CO_2}$  é o peso atômico da molécula de  $CO_2$ ,  $M_C$  é o peso atômico da molécula de carbono e  $1000$  é a constante para extrapolar para ( $Gg \text{ ha}^{-1}$ ).

Para a determinação do potencial de remoção de  $CO_2$  primeiro foi calculado o estoque potencial de C, segundo a equação 7 e posteriormente aplicou-se a equação 8.

$$\text{Estoque potencial de C} = ((NSC \times D \times \sigma \times 10) - C) \text{ (Mg ha}^{-1}\text{)} \quad (7)$$

Onde,  $\text{Estoque potencial de C}$  é a quantidade de carbono que o solo ainda pode estocar ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ );  $NSC$  é o nível de saturação de carbono ( $g \text{ kg}^{-1}$ );  $D$  é a profundidade da camada do solo (m);  $\sigma$  é densidade do solo ( $kg \text{ dm}^{-3}$ ),  $10$  fator para extrapolar os dados para  $Mg \text{ ha}^{-1}$  e  $C$  é a quantidade de carbono estocado na MOAM após 4 anos ( $Mg \text{ ha}^{-1}$ ).

$$\text{Potencial de remoção } CO_2 = (\text{Estoque potencial de C} \times M_{CO_2}/M_C) / 1000 \text{ (Gg ha}^{-1}\text{)} \quad (8)$$

Onde,  $\text{Potencial de remoção } CO_2$  é a quantidade de  $CO_2$  que o solo ainda pode estocar;  $\text{Estoque potencial de C}$  é a quantidade de carbono que o solo tem a capacidade de reter;  $M_{CO_2}$  é o peso atômico da molécula de dióxido de carbono,  $M_C$  é o peso atômico da molécula de carbono e  $1000$  é a constante para extrapolar para ( $Gg \text{ ha}^{-1}$ ).

## 2.7. Produtividade do café

As avaliações da produtividade foram realizadas nos anos de 2022, 2023 e 2024 após a instalação do experimento com plantas de cobertura. A colheita foi realizada anualmente de forma manual, selecionando-se cinco plantas de café para cada tratamento consideradas como plantas úteis, nestas plantas todos os frutos foram colhidos utilizando uma peneira e lona com a finalidade de evitar perdas de fruto, medindo o volume coletado e convertendo a  $kg \text{ ha}^{-1}$  usando um índice de peso-volume, o qual é quantificado depois da coleta (Equação 9).

$$\text{Índice peso-volume} = \text{massa de café beneficiado} / 1 \text{ litro de coleta (g L}^{-1}\text{)} \quad (9)$$

Além do índice, foi utilizado a densidade do plantio nos terraços para fazer uma relação de produção por hectare. Os dados obtidos dos dois anos foram somados, obtendo assim um acumulado de produção do experimento.

### *2.8. Análise estatística*

Os dados foram submetidos a análise de variância segundo o modelo linear geral (GLM) em DBC em anova de medidas repetidas. As pressuposições da estatística paramétrica foram avaliadas pelos testes Jarque-Bera, Cochran e teste F para aditividade. O comportamento do COT a longo do tempo foi avaliado por meio de análise de regressão, considerando-se a significância dos modelos e a não significância de falta de ajuste pelo teste F. Foi utilizado o intervalo de confiança a 90% de probabilidade como medida inferencial.

## **3. RESULTADOS**

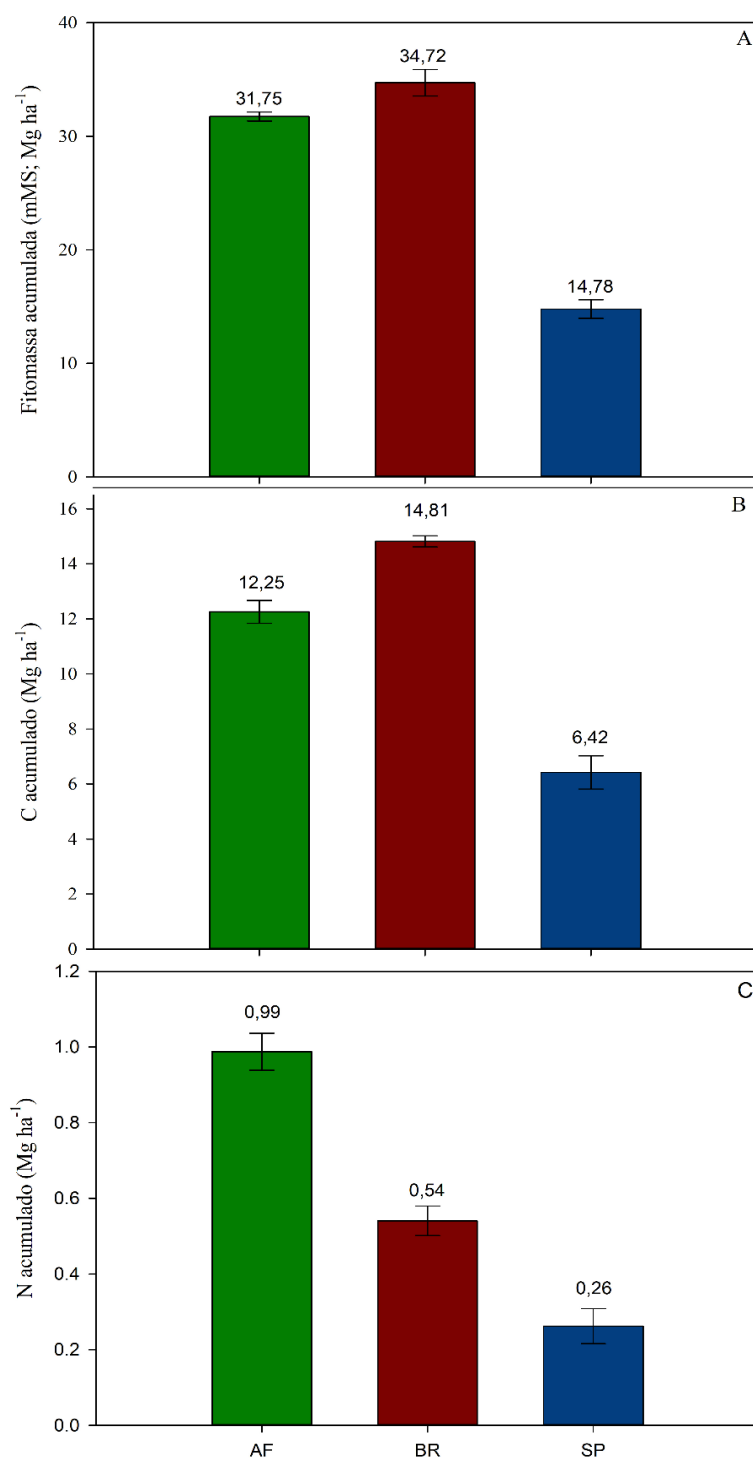
### *3.1. Produção de fitomassa e carbono aportado pelas plantas de cobertura*

O manejo das plantas de cobertura promoveu diferente produção de fitomassa acumulada e quantidade de carbono acumulado, resultando Braquiária (BR) > Amendoim Forrageiro (AF) > sem planta (SP). Este padrão foi diferente para o N acumulado, o manejo de AF promoveu quantidades de N acumulado 83,33 e 280,77% maiores em relação a BR e SP, respectivamente. Por sua vez, o manejo da BR apresentou uma quantidade de N acumulado 107,69 % maior em relação ao SP (Figura 5 a-b-c).

O manejo com BR possibilitou uma produção acumulada de fitomassa 9,35 e 134,91 % maior em relação ao AF e o SP, respectivamente, nas temporadas chuvosa de 2022-2023 e 2023-2024. Por sua vez, o manejo do AF gerou uma produção acumulada de fitomassa 114,82 % maior em relação ao SP (Figura 5a).

Da mesma maneira, o manejo da BR apresentou um aporte de C acumulado ao solo 21,22 e 131,31% maior em relação ao AF e SP, respectivamente. Por sua vez o manejo do AF possibilitou um aporte de C acumulado ao solo 90,81% maior em relação ao SP (Figura 5b).

**Figura 5** - Produção acumulada de fitomassa seca ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ; A), C acumulado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ; B) e N acumulado ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ; C) das parcelas com planta de cobertura Amendoim forrageiro (AF), braquiária (BR) e sem planta (SP) nas entrelinhas do cafeeiro nas temporadas chuvosas de 2022-2023 e 2023-2024. Linhas verticais sobre as barras denotam intervalo de confiança das médias com 90 % ( $n=3$ )



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

### 3.2. Estoque de carbono (COT) e nitrogênio (NT) nas camadas do solo

No ano 2022, na profundidade de 20-40 cm, o manejo de AF e BR promoveu maiores quantidade de carbono orgânico total (COT) em relação ao manejo com SP e sem terraço (ST) com valores de 40,03, 36,23, 31,11 e 30,84 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. Por sua vez o manejo de AF, BR, SP e ST apresentou o mesmo padrão para o nitrogênio total (NT) com valores 3,09, 2,79, 2,43 e 2,62 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 6a-b).

No ano 2023, na profundidade de 40-60 cm, a situação mudou. Neste caso o uso de BR na entrelinha do cafeeiro promoveu maior estoque de C total que o uso de SP e AF, com valores de 36,25, 27,11 e 27,24 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente, além da referência ST (25,26 Mg ha<sup>-1</sup>) (Figura 6c-d).

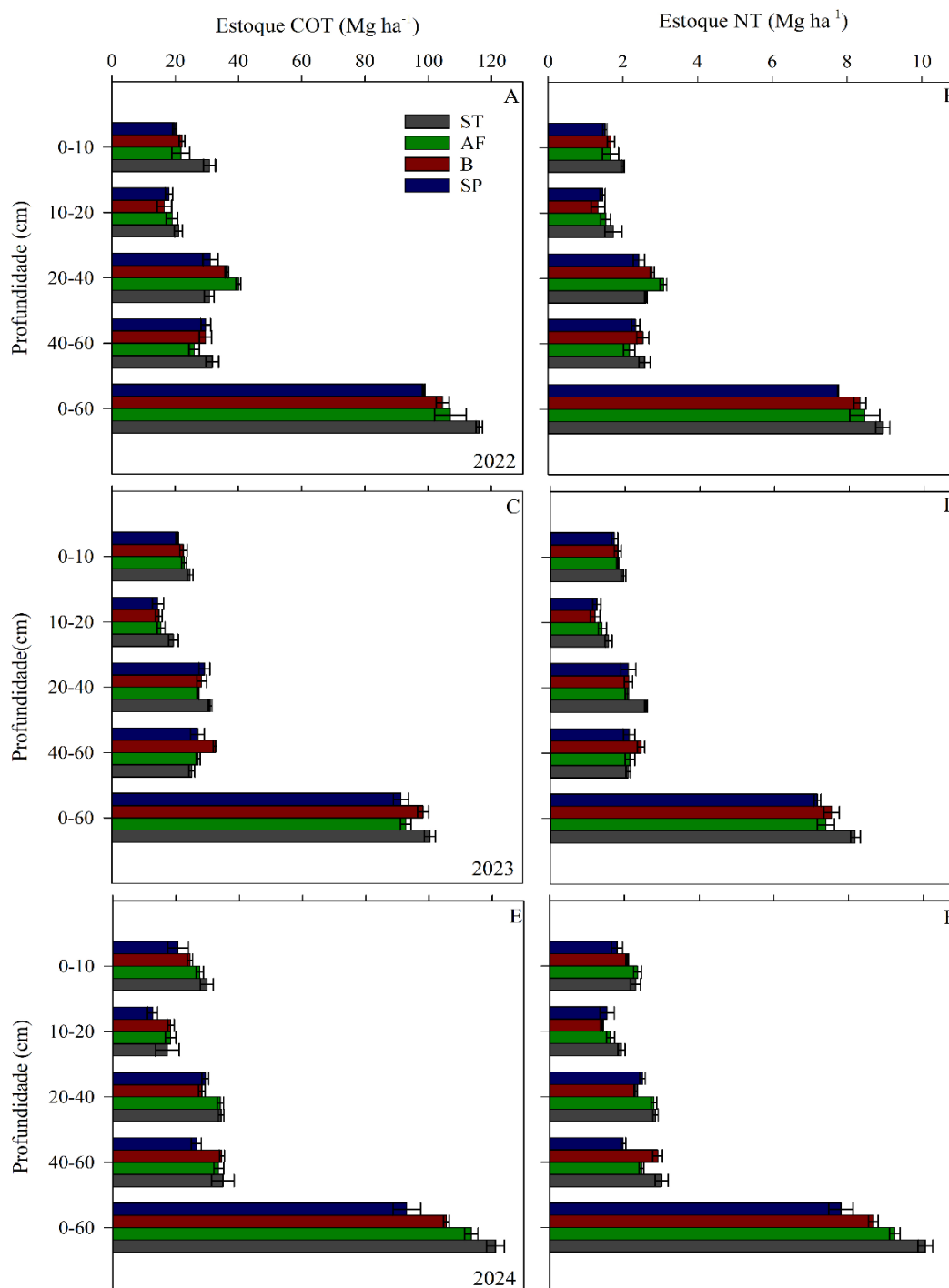
No ano 2024 o manejo do cafeeiro com AF na entrelinha promoveu maiores estoques de COT em todas as profundidades em relação ao uso de SP na entrelinha do cafeeiro (Figura 6e). Esta situação foi diferente em relação ao uso de BR na entrelinha de cafeeiro, onde apresentou maiores valores de COT em relação ao uso SP na entrelinha do cafeeiro nas profundidades de 10-20 e 40-60 cm (Figura 6e). Por outro lado, o uso de AF na entrelinha do cafeeiro promoveu maiores estoques de NT em relação ao uso de SP, exceto na profundidade 10-20 cm onde o SP na entrelinha do cafeeiro igualou ao uso de AF. Finalmente, o uso de AF na entrelinha do cafeeiro mostrou maiores valores de NT nas camadas de 0-10 e 20-40 cm em relação ao uso de BR e SP (Figura 6f).

Em relação ao comportamento do COT ao longo do tempo, foi possível ajustar modelos de regressão para os três tratamentos na profundidade de 0-20 cm. Para AF e BR o modelo altamente significativo foi o quadrático com um R<sup>2</sup> de 0,99 para ambos modelos, já para o tratamento SP foi possível ajustar o modelo de raiz quadrático com um R<sup>2</sup> igual a 1,00 (Figura 7a, c, e). Na profundidade de 20-60 cm não foi possível ajustar algum modelo de regressão (Figura 7b, d, f).

De forma geral para todos os tratamentos no status inicial que corresponde à confecção dos terraços teve um decréscimo do COT na camada de 0-20 cm, logo depois, a partir dos 2,72 e 2,57 anos para AF e BR, respectivamente, foi possível observar o efeito do uso das plantas de cobertura na entrelinha do cafeeiro. O uso de AF e BR na entrelinha do cafeeiro, até o quarto ano (2024), promoveram aumento do COT de 3,66 e 5,52 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. O tratamento SP na entrelinha do cafeeiro apresentou um comportamento diferente ao das plantas de cobertura, além da perda de C pela confecção dos terraços ser mais longa (3,16 anos) o efeito

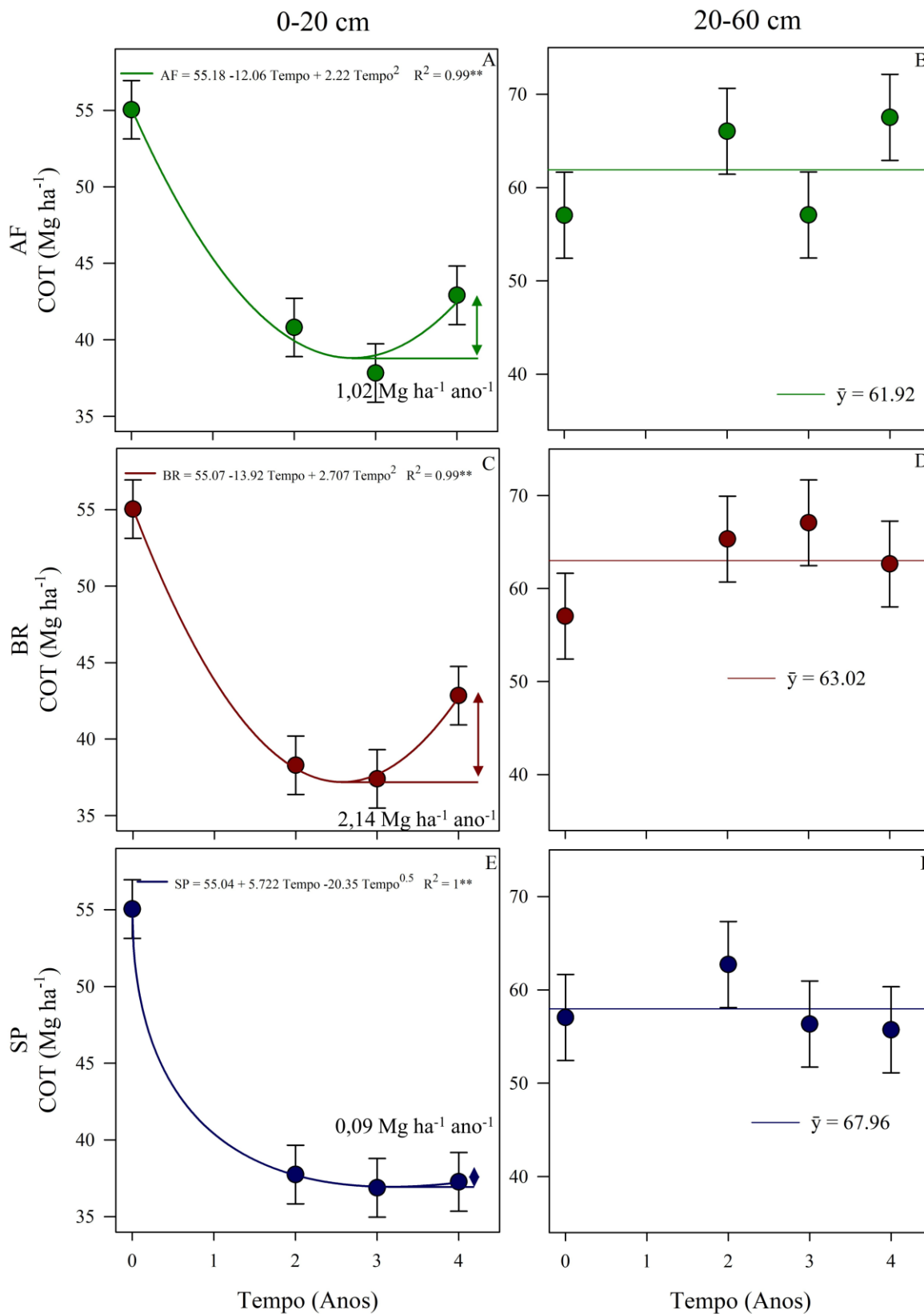
de recuperação de C foi muito mais lento ou quase nulo com um aumento de  $0,28 \text{ Mg ha}^{-1}$  (Figura 7a, c, e).

**Figura 6** - Estoque de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) do solo com cafeeiro em consórcio com plantas de cobertura amendoim forrageiro (AF), braquiária (BR) e sem o uso de plantas (SP) nas entrelinhas nos anos 2022 (a–b), 2023 (c–d) e 2024 (e–f). Linhas horizontais sobre as barras denotam intervalo de confiança das médias com 90% ( $n=3$ ). ST representa ao tratamento adicional da área não terraceada



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

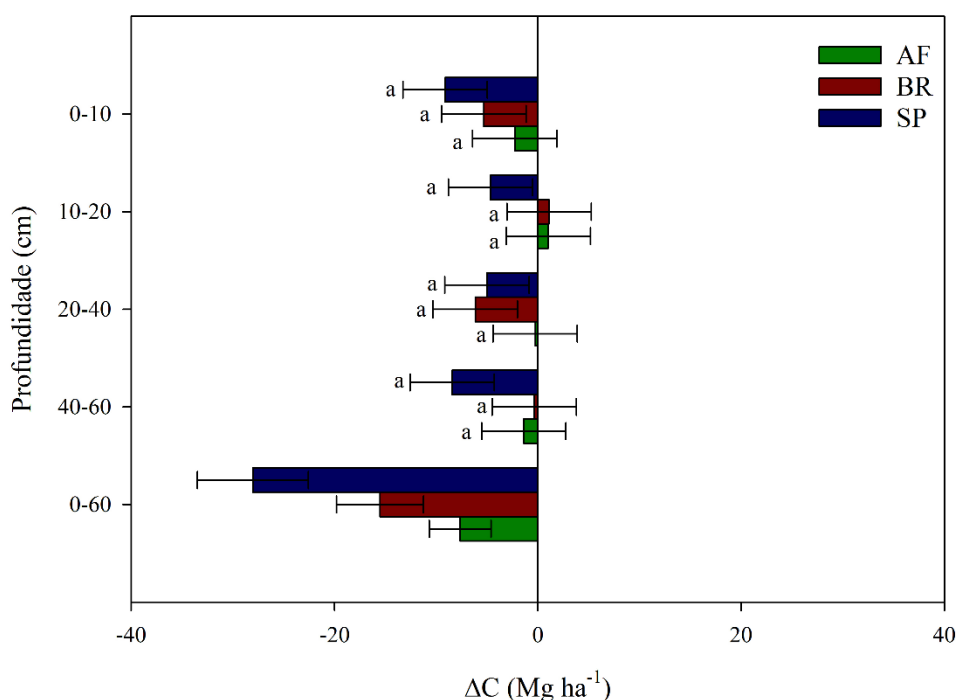
**Figura 7** - Carbono orgânico total (COT; Mg ha<sup>-1</sup>) nas camadas de 0-20 e 20-60 cm nos terraços de cafeeiros cultivados sem planta (SP; E – F) e com plantas de cobertura amendoim forrageiro (AF; A – B) e braquiária (BR; C – D) nas entrelinhas ao longo do tempo (2020, 2022, 2023 e 2024). Linhas verticais sobre os pontos denotam erro padrão do experimento (n=3)



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O manejo de AF, BR e SP na entrelinha do cafeeiro não diferiram entre si para os valores de delta estoque de C calculados nas condições de nosso experimento, mas de forma geral considerando o perfil do solo de 0-60 cm, o intervalo de confiança permitiu observar que o uso de AF e BR na entrelinha do cafeeiro conseguiu estocar maior quantidade de COT até o ano 2024, faltando por recuperar 7,65 e 15,53 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente. O tratamento SP na entrelinha do cafeeiro mostrou uma quantidade por recuperar de 28,03 Mg ha<sup>-1</sup> (Figura 8).

**Figura 8** - Delta estoque de carbono ( $\Delta = \text{AF, BR ou SP} - \text{ST}$ ; Mg ha<sup>-1</sup>) nas diferentes camadas de solo de cafeeiro cultivado em consórcio com plantas de coberturas Amendoim forrageiro (AF), braquiária (BR) e sem planta (SP) nas entrelinhas. ST: Sem Terraço. Linhas horizontais sobre as barras denotam o erro padrão do experimento (n=3). Letras minúsculas iguais denotam a não significância estadística pelo teste Tukey ao 10%



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

### 3.3. Déficit de saturação de C (DSC), Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) removido e Potencial de remoção de CO<sub>2</sub>

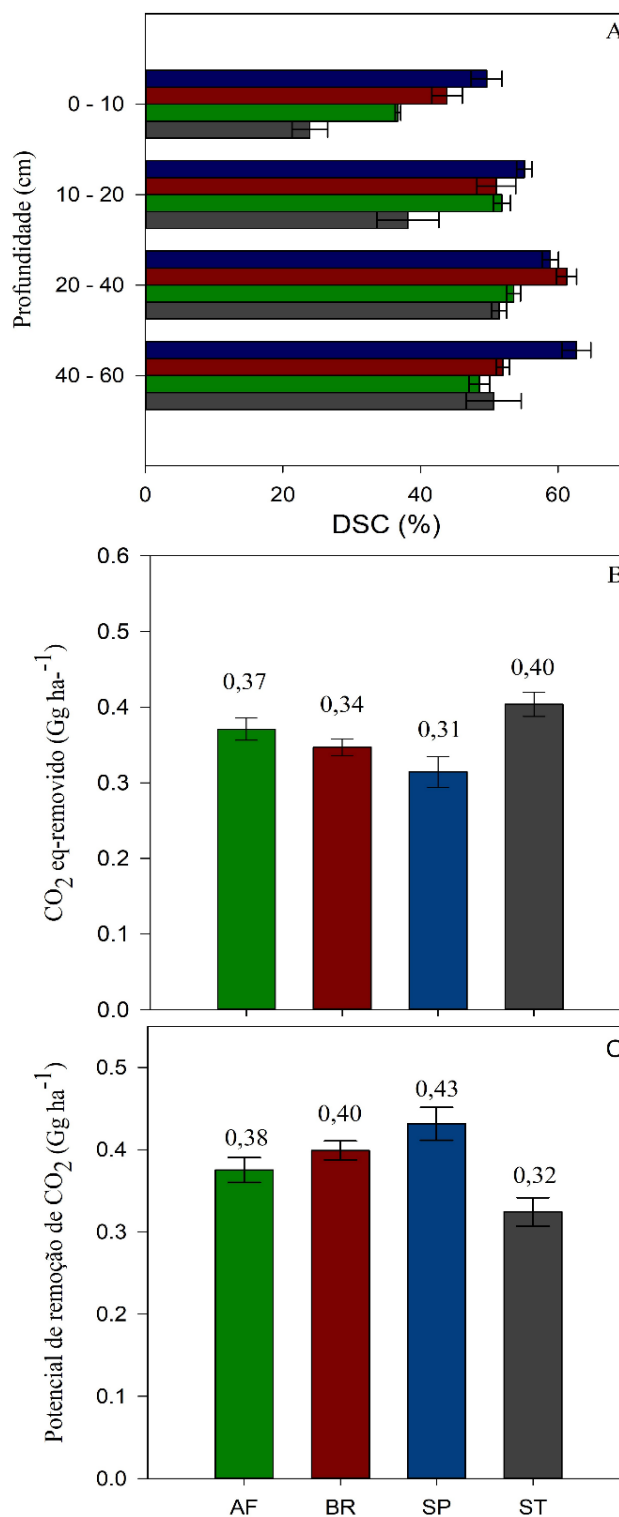
O déficit de saturação de carbono (DSC), na camada de 0-10 cm, foi menor quando se usou o AF na entrelinha do cafeeiro em relação ao uso de BR, com valores de 36,73 e 43,86%, respectivamente. O mesmo padrão se visualizou na camada de 20-40 cm, mas com valores 53,55 e 61,25%, para AF e BR respectivamente. Por outro lado, o uso de AF na entrelinha do

cafeeiro possibilitou uma redução no DSC em todas as camadas avaliadas em relação ao uso de SP na entrelinha do café. No entanto, o uso de AF e BR na entrelinha do cafeeiro na profundidade de 40-60 cm e o AF na profundidade de 20-40 cm foram os únicos que conseguiram igualar à área de referência ST (Figura 9a).

O uso do AF na entrelinha do cafeeiro conseguiu maior remoção de CO<sub>2</sub> em relação ao uso de SP. No entanto, o uso de SP, BR e AF na entrelinha do cafeeiro removeram um valor menor de CO<sub>2</sub> em comparação à área de referência ST (Figura 9b).

Finalmente, o padrão do potencial de remoção de CO<sub>2</sub> foi oposto à remoção de CO<sub>2</sub>. Neste caso, o uso do AF na entrelinha do cafeeiro apresentou menor valor de potencial de remoção de CO<sub>2</sub> em relação ao uso de SP na entrelinha do cafeeiro. No entanto o ST apresentou menor valor de potencial de remoção em relação a todos os outros tratamentos (Figura 9c).

**Figura 9** - Déficit de saturação de carbono (DSC; %; A), CO<sub>2</sub> removido (Gg ha<sup>-1</sup>; B) e potencial de remoção de CO<sub>2</sub> (Gg ha<sup>-1</sup>; C) das parcelas com cafeeiro cultivado em consórcio com plantas de coberturas Amendoim forrageiro (AF) e braquiária (BR) e sem planta (SP) nas entrelinhas no ano 2024. Linhas verticais e horizontais sobre as barras denotam intervalo de confiança das médias com 90% (n=3). ST representa ao tratamento adicional da área não terraceada

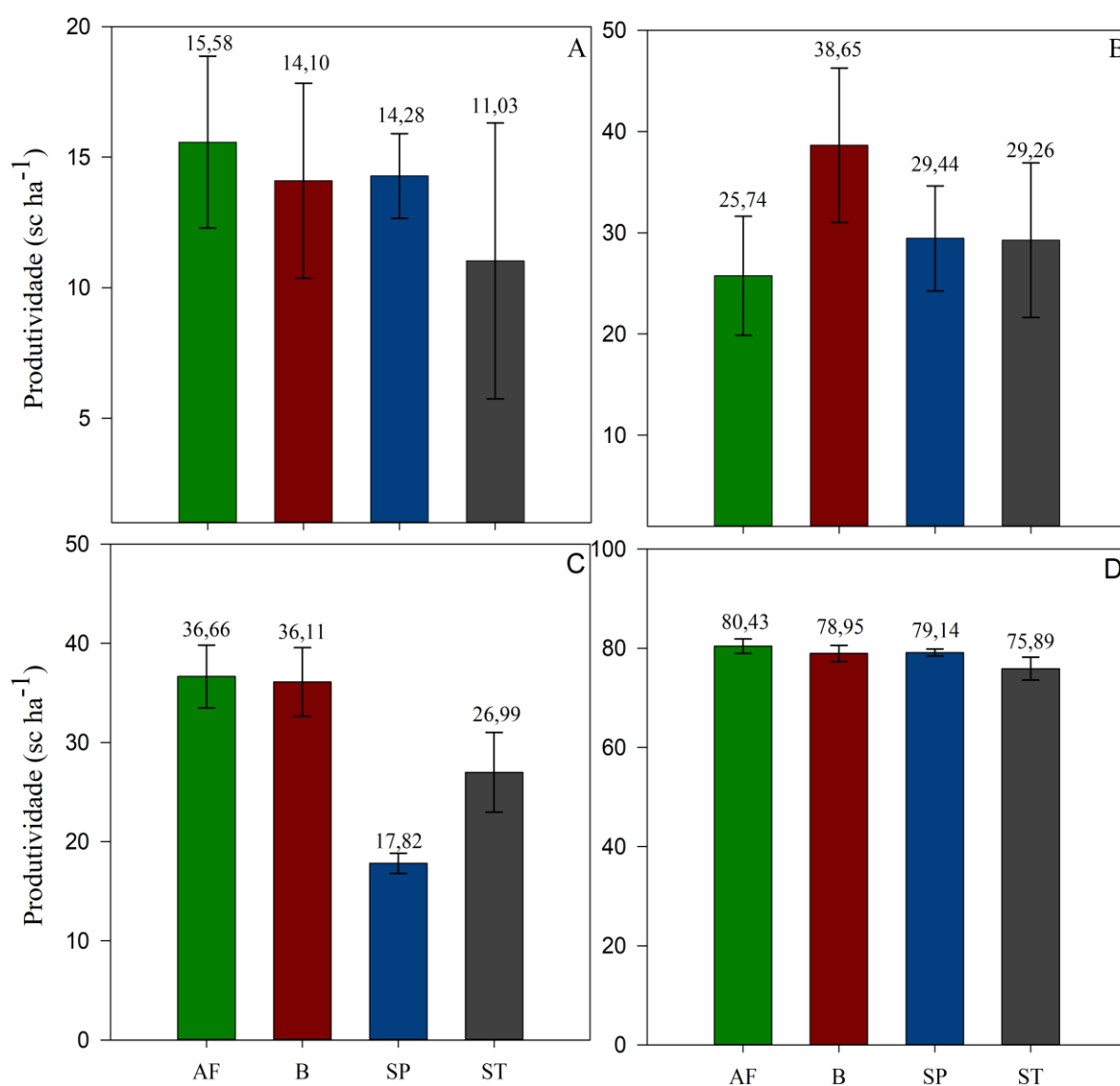


Fonte: elaborado pelo próprio autor.

### 3.4. Produtividade do café do ano 2024

No ano 2024, o uso de AF e BR nas entrelinhas do cafeeiro geraram uma produção de grãos de café 105,72 e 102,64% maior em relação ao uso de SP na entrelinha do cafeeiro, além de ser maiores para o uso de SP na entrelinha do cafeeiro, foram maiores que a área de referência ST. Para os anos 2022, 2023 e o acumulado dos três anos, não foi possível encontrar diferenças na produção dos grãos de café.

**Figura 10** - Produção de grãos de café em cafeeiros cultivados sem (SP) e com plantas de amendoim forrageiro (AF) e braquiária (BR) nas entrelinhas nos anos 2022 (A), 2023 (B), 2024 (C) e acumulado (D). Linhas verticais sobre as barras denotam intervalo de confiança das médias com 90% (n=3). ST representa o tratamento adicional da área não terraçada



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1. Efeito da confecção do terraço na perda de carbono do solo

A confecção dos terraços promoveu um impacto negativo sobre o COT do solo, no qual para a camada de 0–20 cm houve perdas de 29,68, 32,49 e 32,87% até 2,72, 2,57 e 3,16 anos para os tratamentos AF, BR e SP, respectivamente (Figura 7). Na confecção dos terraços o impacto gerado pela movimentação do solo, como quebra de agregados, diluição da camada superficial fértil, e estímulo a atividade microbiana do solo favorece uma decomposição mais acelerada da MOS com diminuição dos estoques superficiais de COT (LIANG et al., 2018; VOGEL; CONEDERA, 2020; ZHOU et al., 2015).

Adicionalmente, a mudança de uso de pastagem (uso anterior a instalação do experimento) para cafeeiros pode ter acelerado a perda dos estoques de COT ao longo dos primeiros meses de cultivo. Segundo BALESIDENT; CHENU; BALABANE. (2000) a mudança de cultivo provoca modificações no clima do solo, na quantidade e qualidade das fontes de C aportadas, disponibilidade de nutrientes para microrganismos, diversidade microbiana e variação do pH do solo pela adubação, os quais promovem a aceleração das taxas de decomposição da MOS.

### 4.2. Efeito das plantas de cobertura para a recuperação do C do solo

O manejo das plantas de cobertura ao longo dos quatro anos de cultivo promoveu maior aporte de C via fitomassa ao solo em relação as plantas espontâneas (SP; figura 5 A-B). No entanto, o uso da BR na entrelinha do cafeeiro permitiu os maiores aportes de fitomassa (34,72 Mg ha<sup>-1</sup>) e C (14,85 Mg ha<sup>-1</sup>) em relação ao AF ao longo dos quatro anos (Figura 5 A-B). Plantas gramíneas possuem alta produção de fitomassa que pode variar de 1,00 a 1,33 Mg ha<sup>-1</sup> por mês (CALEGARI, 2016; KLIEMANN; BRAZ; SILVEIRA, 2006), além de possuírem elevada relação C/N o que lhes confere uma lenta decomposição (FRANCO JÚNIOR et al., 2022).

Ao observar a dinâmica dos estoques de COT ao longo do tempo para a camada de 0–20 cm, é possível observar que, o aporte de fitomassa pelas plantas de cobertura (AF e BR) permitiram que a partir de 2,72 e 2,57 anos, respectivamente, houvesse um aumento dos estoques de COT do solo perdidos inicialmente pela confecção dos terraços e mudanças de uso da terra (Figura 7 A, C, E). A partir de 2,72 e 2,57 anos até aos quatro de cultivo o incremento de COT pelas plantas de AF e BR foram de 3,66 Mg ha<sup>-1</sup> e para 5,52 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente (Figura 7 A, C). Plantas gramíneas, principalmente as braquiárias, são caracterizadas com um crescimento rápido de elevada produção de fitomassa de parte aérea e radicular (DA SILVA et

al., 2020; PRESOTTO et al., 2014; RAMOS et al., 2022; ROCHA et al., 2016), no qual possivelmente o maior volume e atividade de raízes produzidos pela BR pode ter impactado inicialmente em maior decomposição da MOS nativa (provavelmente para a mineralização de N), promovendo na sequência uma elevada taxa de aporte pela atividade das raízes (3,86 Mg ha<sup>-1</sup>ano<sup>-1</sup>, Figura 7 C). RAO et al. (1996) ao estudar a relação raiz: parte aérea (R:PA) de diferentes espécies forrageiras verificou que a R:PA do AF era de 0,32 e da BR era de 0,54, no qual corroboraria com a nossa pressuposição da contribuição das raízes para o COT, uma vez que seria estimado uma produção acumulada de raízes de 10,16 Mg ha<sup>-1</sup> para o AF e 18,75 Mg ha<sup>-1</sup> para a BR.

Em subsuperfície (20-60 cm de solo) não foi possível ajustar uma regressão ao longo do tempo (figura 7), provavelmente por ainda não ter tido tempo suficiente para a incorporação expressiva em subsuperfície pelas raízes.

Apesar do elevado aporte de C via fitomassa da BR, após quatro anos de cultivo do café com o manejo do AF nas entrelinhas observou-se uma maior recuperação dos estoques de C e N em relação ao manejo com BR e SP no perfil do solo (0-60 cm; Figura 6 E-F). Além da quantidade de resíduos aportados, a qualidade dos mesmos assume papel determinante para a formação e estocagem de MOS (PACHECO et al., 2017). Assim, o mais elevado teor de N na fitomassa do AF (N<sub>AF</sub>: 2,76 dag kg<sup>-1</sup>; C/N<sub>AF</sub>: 14,03), conferindo uma mais rápida decomposição pelos microrganismos e conseqüentemente um estímulo a atividade microbiana, pode ter conferido um fornecimento a estocagem de C no solo. Segundo COTRUFO et al. (2015), as vias de formação de MOS podem ser resumidas em uma via bioquímica e outra física, no qual a via bioquímica se caracteriza pela contribuição de resíduos microbianos se associado a matriz mineral do solo (silte+argila; Matéria orgânica associada aos minerais do solo – MOAM); enquanto a via física refere-se a contribuição de matérias orgânicos mais recalcitrantes que ao se fragmentar contribuem para as frações da matéria orgânica particulada (MOP) do solo. Assim, resíduos orgânicos de melhor qualidade (C/N < 20,00 e baixos teores de polifenóis) tendem a estimular os microrganismos e mais eficientemente estabilizar o C nas frações de MOAM, conforme foi observado em nossos resultados (Apêndice 1 e 2).

O déficit de saturação de C (DSC) nos solos com as plantas de cobertura (AF e BR) e SP foram superiores a 50% para todas as profundidades, exceto para as camadas de 0 – 10 cm em todos os tratamentos e de 40-60 cm para AF. Para nossa referência sem terraço (ST) o DSC maior a 50% foi observado nas camadas de 20-40 e 40-60 cm (Figura 9 A). O solo estudado apresenta teores de silte+argila superiores a 50% em todas as camadas de solo, o qual possibilita apresentar ainda elevado valores de DSC, uma vez que há uma relação positiva entre o DSC

com as frações de silte e argila do solo (SIX et al., 2002; WIESMEIER et al., 2014), especialmente os óxidos de ferro e alumínio amorfos, o que determina que o solo tem ainda uma alta capacidade de estocar C.

Diversos estudos apontam a importância dos óxidos de ferro e alumínio para a estabilização da MOS em solos ácidos (DÜMIG; SMITTENBERG; KÖGEL-KNABNER, 2011; KAISER; ZECH, 2000; KÖGEL-KNABNER et al., 2008; SPIELVOGEL; PRIETZEL; KÖGEL-KNABNER, 2008; WISEMAN; PÜTTMANN, 2005), uma vez que maiores quantidades destes minerais podem ter um impacto relevante na estabilização da MOS. No entanto, WISEMAN; PÜTTMANN. (2005) sugeriram que o potencial de sequestro de C dos solos ácidos pode estar relacionado com o teor desses em fases pouco cristalinas.

O DSC possibilita um alto potencial de remoção de CO<sub>2</sub>, no qual ao realizar o manejo adequado de plantas de cobertura poderá alcançar seu nível de saturação. Neste estudo foi possível observar diferença entre o manejo do AF e o SP (Figura 9 B-C). Apesar disso, o CO<sub>2</sub> removido até os quatro anos de cultivo do café (uso anterior + o uso atual) nos solos manejados com AF não diferiram dos cafeeiros sem o Terraço (ST), diferentemente daqueles manejos com BR e SP (Figura 9 B).

Assim, corroborando com a nossa hipótese, é possível verificar que até os quatro anos do manejo das plantas de cobertura nas entrelinhas dos cafeeiros que o uso do AF promove um maior fornecimento ao incremento e recuperação dos estoques de COT no solo (0-60 cm; Figura 6 E), culminando em uma maior quantidade de CO<sub>2</sub> removido (0,37 Gg ha<sup>-1</sup>; Figura 9 B). Apesar disso, é preciso considerar a alta taxa de incremento de COT pelas plantas de BR observadas após os 2,7 anos (5,52 Mg ha<sup>-1</sup>; Figura 8 C) na camada de 0-20 cm, demandando assim um tempo maior de avaliação para confirmar a maior eficácia do uso de AF em relação a BR para a recuperação dos estoques de COT no solo pós confecção de terraços na agricultura de montanha.

#### 4.3. Produção do café

Adicionalmente ao incremento de C ao solo, o manejo das plantas de cobertura na entrelinha dos cafeeiros resultou em aumentos na produção de grãos de café de 105,72 e 102,64 % maior em relação ao SP com o manejo de AF e BR, respectivamente (Figura 10 C). No entanto, não houve diferença na produção de café entre as diferentes plantas de cobertura (Figura 10 C). Nossos dados corroboram com aqueles verificados por FRANCO JÚNIOR et al.

(2022), no qual ao estudar cinco plantas de cobertura, além de um mix, encontrou incremento na produção de café em relação aos cafeeiros sem plantas de cobertura.

Existem várias vantagens do cultivo consociado de plantas de cobertura com cafeeiros, além do incremento de MOS, como por exemplo: aumento da capacidade de troca catiônica (CTC), retenção de água, formação de bioporos, diminuição da compactação do solo, bioativação do solo por microrganismos devido ao aumento da MOS e diminuição da temperatura nas camadas superficiais do solo (FAVARIN et al., 2018). As leguminosas por sua vez, além do mencionado, por possuir maiores teores de N e baixa relação C/N, facilita sua rápida decomposição com estímulo a atividade microbiana e aumento na disponibilidade de N no solo (ARAUJO, 2015; MATOS et al., 2011).

Por fim, o manejo de plantas de cobertura contribui significativamente para a ciclagem de nutrientes e para a preservação da matéria orgânica do solo, promovendo melhorias nas suas propriedades físicas, químicas e biológicas (NIGUSE et al., 2022). Todos esses fatores em sinergismo tendem a otimizar o agrossistema de produção e favorecer um maior desenvolvimento das plantas aliado a maiores produtividades, o qual não depende apenas de maiores estoques de COT, uma vez que os cafeeiros ST apresentaram os maiores estoques de COT no solo, mas as menores produtividades em relação aos cafeeiros com o manejo de plantas de cobertura (Figura 10).

## 5. CONCLUSÕES

Plantas de braquiária (*Urochloa ruziziensis*) utilizadas como plantas de cobertura nas entrelinhas de cafeeiro (*Coffea arabica* L) aporta maiores quantidade de C via fitomassa a superfície do solo em relação as plantas de amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*).

Além disso, plantas de braquiária (*Urochloa ruziziensis*) promovem maior ciclagem de C da MOS em relação as plantas de amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) e plantas espontâneas (sem planta). No entanto, o manejo de amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) nas entrelinhas de cafeeiros terraceados em agricultura de montanha durante quatro anos possibilita maiores recuperações de COT no perfil do solo (0-60 cm) com relação ao manejo de braquiária (*Urochloa ruziziensis*) e plantas espontâneas.

O manejo durante quatro anos das plantas de cobertura de amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) promove um menor déficit de saturação de carbono (DSC) em relação aos cafeeiros (*Coffea arabica* L) com o manejo sem planta de cobertura nas entrelinhas. Por sua vez, há uma maior remoção de CO<sub>2</sub> no solo com o manejo do amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) em relação à quantidade de CO<sub>2</sub> removida pelos cafeeiros manejados com plantas espontâneas.

Finalmente, o manejo de amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) e braquiária (*Urochloa ruziziensis*) nas entrelinhas de cafeeiros (*Coffea arabica L*) terraceados em agricultura de montanha possibilita um incremento na produção de café em relação ao manejo sem plantas nas entrelinhas.

## 6. REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, I. Produtividade de cafeeiros adubados com fertilizantes orgânicos em consórcio com adubos verdes. **Universidade Federal de Viçosa**, 2015.
- BALESDENT, J.; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Elsevier**, v. 53, p. 215–230, 2000.
- BLANCO-CANQUI, H.; RUIS, S. J. Cover crop impacts on soil physical properties: A review. **Soil Science Society of America Journal**, v. 84, n. 5, p. 1527–1576, 2020.
- BREGAGNOLI, M.; NETO, J. F. R. **Café nas montanhas**: Caracterização da cafeicultura na área de atuação da Cooperativa Regional de Cafeicultores em Guaxupé. Pouso Alegre, **IPSULMINAS**, 2017.
- CALEGARI, A. Plantas de Cobertura - Manual Técnico. **Instituto Agrônômico do Paraná**, v. 2, p. 32, 2016.
- CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Particulate Soil Organic-Matter Changes across a Grassland Cultivation Sequence. **Soil Science Society of America Journal**, v. 56, n. 3, p. 777–783, 1992.
- CHAER, G. M. et al. Nitrogen-fixing legume tree species for the reclamation of severely degraded lands in Brazil. **Tree Physiology**, v. 31, p. 139–149, 2011. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq116>.
- COTRUFO, M.F. et al. Formation of soil organic matter via biochemical and physical pathways of litter mass loss. **Nature Geosci.**, v. 8, p. 776-9, 2015. <https://doi.org/10.1038/ngeo2520>.
- DA SILVA, C. T. R. et al. Yield component responses of the brachiaria brizantha forage grass to soil water availability in the Brazilian cerrado. **Agriculture (Switzerland)**, v. 10, n. 1, 2020.
- DENG, C. et al. Advantages and disadvantages of terracing: A comprehensive review. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 9, n. 3, p. 344–359, set. 2021.
- DURÁN, V. et al. **Terraced Subtropical Farming: Sustainable Strategies for Soil Conservation**. Springer, Singapore, 2020. (Nota técnica).
- FAVARIN, J. L. et al. Caminhos para aumentar a produtividade do café arábica. **Infomações Agrônômicas**, n. 164, p. 13–18, 2018.
- FRANCO JÚNIOR, K. S. et al. Cover crops in coffee management in production. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 15, 2022.
- KAISER, K.; ZECH, W. Dissolved organic matter sorption by mineral constituents of subsoil clay fractions. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 163, n. 5, p. 531–535, 2000.
- KLIEMANN, H. J.; BRAZ, A. J. P. B.; SILVEIRA, P. M. DA. Taxas de decomposição de resíduos de espécies de cobertura em Latossolo Vermelho distroférico. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 36, n. 1, p. 21–28, 2006.

- KÖGEL-KNABNER, I. et al. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 171, n. 1, p. 61–82, 2008.
- LANGE, M. et al. Plant diversity increases soil microbial activity and soil carbon storage. **Nat. Commun**, 6, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1038/ncomms7707>.
- LIANG, Y. et al. Impacts of simulated erosion and soil amendments on greenhouse gas fluxes and maize yield in Miamian soil of central Ohio. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, p. 1–11, 2018.
- MANDAL, D. et al. Reversing land degradation through grasses: A systematic meta-analysis in the Indian tropics. **Solid Earth**, v. 8, p. 217–233, 2017. <https://doi.org/10.5194/se-8-217-2017>.
- MATOS, E. et al. DECOMPOSITION AND NUTRIENT RELEASE OF LEGUMINOUS PLANTS IN COFFEE AGROFORESTRY SYSTEMS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 141–149, 2011.
- MUÑOZ, J. D. et al. Cover crop effect on corn growth and yield as influenced by topography. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 189, p. 229–239, 2014.
- NIGUSE, G. et al. Contribution of coffee plants to carbon sequestration in agroforestry systems of Southwestern Ethiopia. **Journal of Agricultural Science**, v. 160, n. 6, p. 440–447, 2022.
- PACHECO, L. P. et al. Biomass and Nutrient Cycling By Cover Crops in Brazilian Cerrado in the State of Piauí. **Revista Caatinga**, v. 30, n. 1, p. 13–23, 2017.
- POESEN, J. et al. Gully erosion and environmental change: Importance and research needs. **Catena**, v. 50, n. 2–4, p. 91–133, 2003.
- PRESOTTO, R. A. et al. Mineralização da torta produzida diretamente da semente (PDS) de mamona. **Revista Caatinga**, v. 27, n. 4, p. 24–30, 2014.
- RAO et al. Adaptive attributes of tropical forage species to acid soils II. Differences in shoot and root growth responses to varying phosphorus supply and soil type. **Journal of Plant Nutrition**, v. 19:2, p. 323–352, 1996. DOI: 10.1080/01904169609365125.
- RAMOS, M. L. G. et al. Carbon and nitrogen stocks in cultivation systems of a Quilombola community in the Brazilian Cerrado. **Regional Environmental Change**, v. 22, n. 3, p. 1–13, 2022.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, PAULO T. G.; ALVAREZ V, V. H. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação. **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5º Aproximação**, p. 359, 1999.
- ROCHA, O. C. et al. Atributos químicos e físico-hídricos de um Latossolo sob cafeeiro consorciado com braquiária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1476–1483, 2016.
- SIX, J. et al. Stabilization mechanisms of SOM implications for C saturation of soils.pdf. **Plant**

**and soil**, v. 241, n. 2, p. 155–176, 2002.

SPIELVOGEL, S.; PRIETZEL, J.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil organic matter stabilization in acidic forest soils is preferential and soil type-specific. **European Journal of Soil Science**, v. 59, n. 4, p. 674–692, 2008.

STEWART, C. E. et al. Soil carbon saturation: Implications for measurable carbon pool dynamics in long-term incubations. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 41, n. 2, p. 357–366, 2009.

VILELA, P.; RUFINO, J. Caracterização da cafeicultura de montanha de Minas Gerais. **Cadeias Produtivas Café**, v. I, p. 300, 2010.

VOGEL, S.; CONEDERA, M. Effects of land use-induced vegetation and topography changes on soil chemistry in the southern alps (Ticino, Switzerland). **Plant, Soil and Environment**, v. 66, n. 2, p. 73–80, 2020.

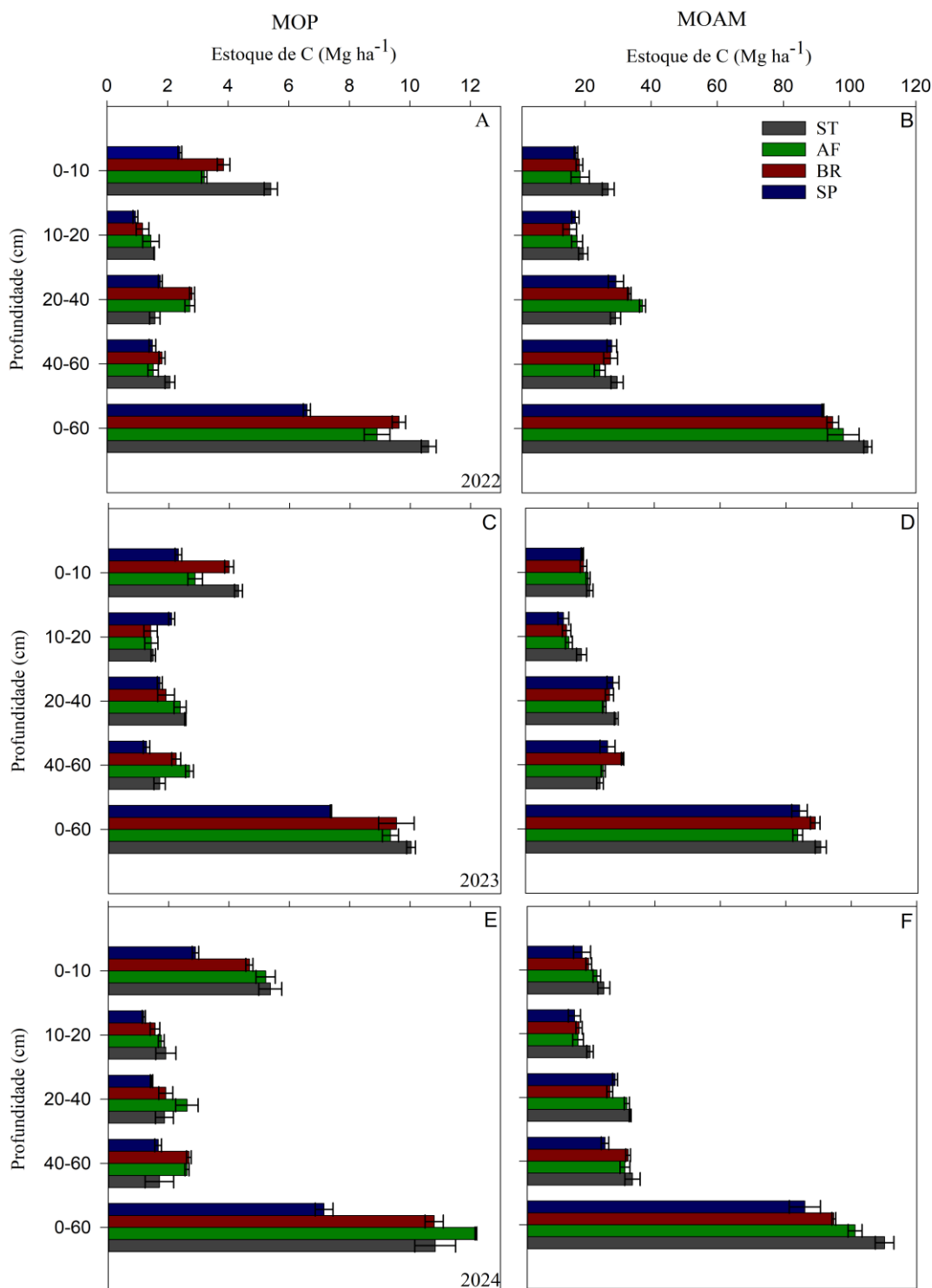
WIESMEIER, M. et al. Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation. **Global Change Biology**, v. 20, p. 653–665, 2014.

WISEMAN, C. L. S.; PÜTTMANN, W. Soil organic carbon and its sorptive preservation in central Germany. **European Journal of Soil Science**, v. 56, n. 1, p. 65–76, 2005.

ZHOU, K. et al. Crop rotation with nine-year continuous cattle manure addition restores farmland productivity of artificially eroded Mollisols in Northeast China. **Field Crops Research**, v. 171, p. 138–145, 2015.

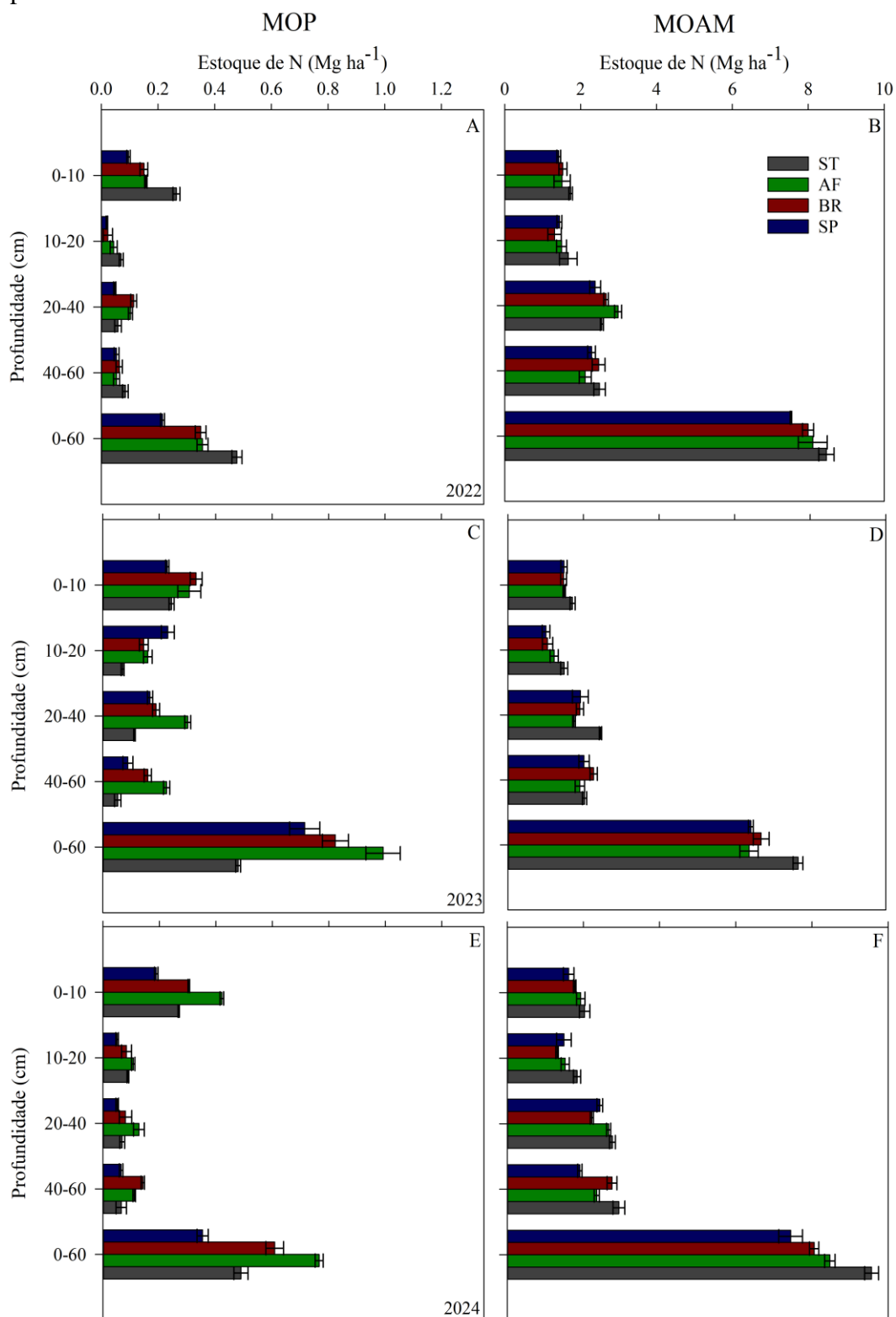
## 7. APÊNDICES

**APÊNDICE A** - Estoque de matéria orgânica particulada (MOP; a, c e e;  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) e Estoque de matéria orgânica associada aos minerais (MOAM; b, d e f;  $\text{Mg ha}^{-1}$ ) do solo terraceado cultivado com café em consórcio com plantas de cobertura Amendoim forrageiro (AF), braquiária (BR) e sem planta (SP) nas entrelinhas nos anos 2022 (a-b), 2023 (c-d) e 2024 (e-f). Linhas horizontais sobre as barras denotam intervalo de confiança das médias com 90%. ST representa ao tratamento adicional da área não terraceada



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

**APÊNDICE B** - Estoque de nitrogênio na matéria orgânica particulada (MOP; A, C,e E; Mg ha<sup>-1</sup>) e Estoque de nitrogênio na matéria orgânica associada aos minerais (MOAM; B, D,e F; Mg ha<sup>-1</sup>) do solo com cafeeiro em consorcio com plantas de cobertura Amendoim forrageiro (AF), braquiária (BR) e sem planta (SP) nas entrelinhas nos anos 2022 (a-b), 2023 (c-d) e 2024 (e-f). Linhas horizontais sobre as barras denotam intervalo de confiança das médias com 90%. ST representa o tratamento adicional da área não terraceada



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

## **CAPÍTULO 2 – Plantas de cobertura na otimização da adubação nitrogenada em cafeeiros terraceados em agricultura de montanha**

### **RESUMO**

A região das Matas de Minas (MG) é uma importante produtora de café no Brasil, embora enfrente diversos desafios relacionados à agricultura de montanha, com solos altamente intemperizados e ácidos. Nesse contexto, o manejo e a conservação do solo, assim como o uso eficiente de fertilizantes nitrogenados, são aspectos essenciais para garantir a sustentabilidade da produção cafeeira em ambientes montanhosos. O objetivo deste estudo foi avaliar o padrão de liberação de nutrientes da fitomassa de plantas de cobertura (*Arachis pintoi* e *Urochloa ruziziensis*), seu efeito no estado nutricional dos cafeeiros e a produtividade da cultura sob diferentes doses de N-Ureia, com e sem a presença de plantas de cobertura nas entrelinhas. O experimento foi conduzido no município de Viçosa-MG, em delineamento em blocos casualizados, em parcelas subdivididas com três repetições. A parcela principal foi composta por três tratamentos: ausência de plantas de cobertura (SP), *Arachis pintoi* (Amendoim forrageiro - AF) e *Urochloa ruziziensis* (Braquiária - BR). As subparcelas corresponderam às doses de N-Ureia: 0, 100, 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup>. O amendoim forrageiro (AF) apresentou elevados teores de nutrientes, especialmente de Ca, N e Mg, enquanto a BR destacou-se pela maior produção de fitomassa (17,33 Mg ha<sup>-1</sup>) durante a estação chuvosa de 2022-2023. O AF demonstrou altas taxas de decomposição da fitomassa, resultando em rápida liberação de nutrientes ao solo. Como consequência, os cafeeiros consorciados com AF apresentaram teores adequados de N, P e K em seu tecido foliar. A análise econômica revelou que o uso de AF possibilitou uma maior produção na dose de máxima eficiência econômica (MEE: 32,72 sc ha<sup>-1</sup>) com menor dose de N (DMEE: 90,00 kg ha<sup>-1</sup>). De forma semelhante, a BR também proporcionou bons resultados, com MEE de 30,57 sc ha<sup>-1</sup> e DMEE de 99,78 kg ha<sup>-1</sup>, ambos superiores ao tratamento sem planta de cobertura (MEE: 26,71 sc ha<sup>-1</sup> e DMEE: 300,00 kg ha<sup>-1</sup>). Os resultados demonstram que o uso de plantas de cobertura nas entrelinhas de cafeeiros terraceados é uma estratégia eficaz para otimizar o uso de fertilizantes nitrogenados, promover a liberação gradual de nutrientes e aumentar a produtividade do café em sistemas de agricultura de montanha.

**Palavras-chave:** Liberação de nutrientes; Adubação nitrogenada; Amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*); Braquiária (*Urochloa ruziziensis*).

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil destaca-se entre os maiores produtores e exportadores mundiais de grãos de café, com o estado de Minas Gerais (MG) respondendo por aproximadamente 53% da produção nacional. (BREGAGNOLI; NETO, 2017). Dentre as áreas produtoras, a região das Matas de Minas possui particularidade por constituir uma agricultura de Montanha com solos altamente intemperizados e ácidos. Por sua vez, o ambiente de montanhas impõe grandes desafios na produção inerentes ao manejo e conservação do solo. Neste contexto, a adoção de práticas mecânicas e vegetativas (principalmente uso de plantas de cobertura) constitui potencial alternativa para o sucesso da cafeicultura de montanha (GUIMARÃES et al., 2016).

Entretanto, não apenas questões relacionadas ao manejo e conservação do solo podem limitar a produção, mas também a perda e o fornecimento inadequado de nutrientes no sistema solo-planta. Dentre os nutrientes, o nitrogênio (N) é o mais demandado pelas plantas e, portanto, mais limitante para a produção agrícola (GARCÍA et al., 2010). O inadequado manejo de fertilizantes nitrogenados devido a prática de recomendações generalizadas, promove o uso excessivo de fertilizantes nitrogenados, intensificando suas perdas no sistema de produção (MARTÍN ALONSO et al., 2016). Assim, o manejo adequado da adubação nitrogenada é essencial para a obtenção de altas produtividades e para a sustentabilidade do sistema.

Neste contexto, a associação de práticas de conservação do solo em ambientes de montanhas, além de serem essenciais para o controle e redução de perda de solo e nutrientes pela erosão, podem otimizar a adubação nitrogenada quando são utilizadas plantas de cobertura (PC) (CONSTANTIN et al., 2010).

Entre as principais espécies utilizadas como PC, destacam-se as famílias das fabáceas (*Fabaceae*) ou leguminosas (*Leguminosae nom. cons.*) e as gramíneas (*Poaceae*). Espécies da família das leguminosas têm a capacidade de aumentar as entradas de N no solo por meio da fixação biológica de N<sub>2</sub> atmosférico (FBN), o que auxilia amortecendo a necessidade de fertilizantes minerais (DARYANTO et al., 2018) e as perdas no sistema, consequentemente garantido um uso mais eficiente de N pelas culturas (LI et al., 2015). Além disso, as leguminosas apresentam uma baixa relação C/N o que possibilita mais rápida decomposição de sua fitomassa e ciclagem dos demais nutrientes. Por outro lado, as espécies gramíneas apresentam elevado rendimento de produção de fitomassa e sistema radicular fasciculado com expressiva atividade radicular em superfície e subsuperfície. No entanto, apresentam elevada relação C/N da sua fitomassa, refletindo em um lento processo de decomposição e liberação de nutrientes. Além disso, alguns autores mencionam as gramíneas como possíveis plantas de

cobertura (ou quando manejadas em consórcios) que possuem relação com a deficiência de N nas culturas, uma vez que o N poderá ser imobilizado pela biomassa microbiana durante o processo de decomposição da fitomassa das gramíneas (BORTOLINI; SILVA; ARGENTA, 2000; PERIN et al., 2010).

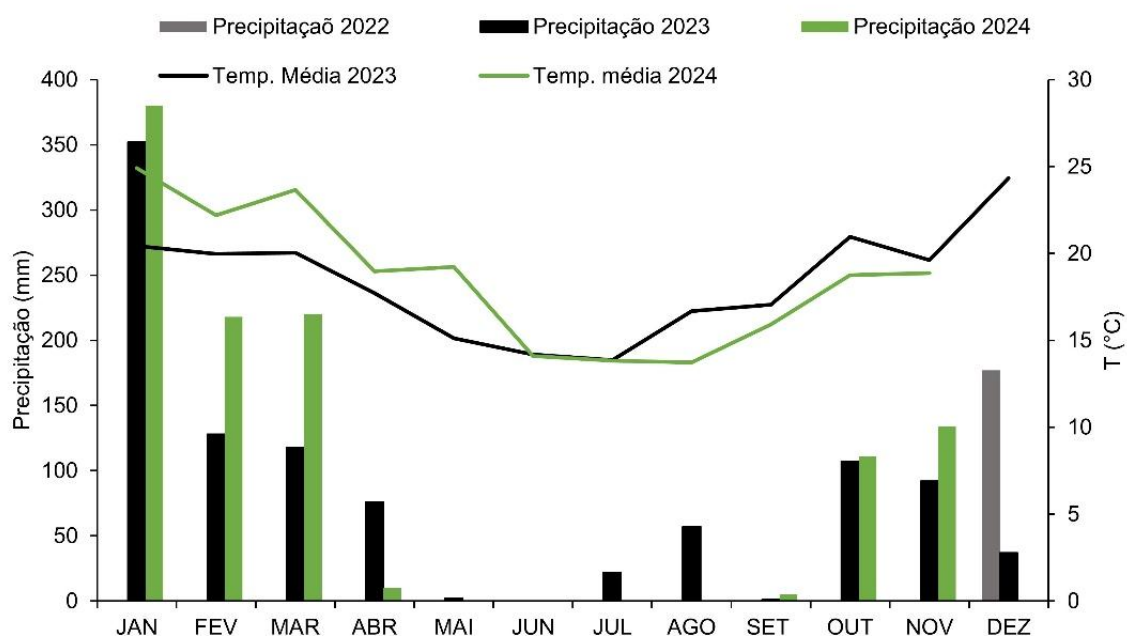
Além da relação C/N, um ponto importante que influencia as taxas de decomposição de qualquer tipo de fitomassa é sua composição bioquímica. Resíduos orgânicos com elevados conteúdos de componentes rapidamente decomponíveis (como açúcares, aminoácidos e proteínas) apresentam altas taxas de decomposição nas fases iniciais. Nas etapas seguintes as taxas de decomposição tendem a diminuir devido à acumulação de compostos recalcitrantes como lignina e celulose (BERG, 2000, 2014; MATOS et al., 2011). Assim, PC's com maior conteúdo de compostos facilmente decomponíveis tendem a possuir uma rápida liberação de nutrientes, especialmente o N que tem uma relação direta com a decomposição da fitomassa.

Desta forma, o presente estudo teve como hipóteses: i) O uso de Amendoim forrageiro (leguminosa) na entrelinha do cafeeiro possibilita uma maior produção de grãos de café com redução na adubação nitrogenada e ii) O uso de Braquiária (gramínea) na entrelinha do cafeeiro gera uma maior demanda pela adubação nitrogenada para a obtenção de produção de grãos de café similar aos cafeeiros sem plantas de cobertura. Assim, o objetivo do estudo foi avaliar o padrão de liberação de nutrientes pela fitomassa das plantas de cobertura (Amendoim forrageiro e Braquiária), o efeito no status nutricional e a produtividade quando da aplicação de diferentes doses de N-Ureia em cafeeiro terraceado sem e com plantas de cobertura nas entrelinhas. Conseqüentemente, será possível determinar a dose de Máxima eficiência econômica (DMEE) de N-Ureia para cada manejo das plantas de cobertura.

## **2. MATERIAIS E MÉTODOS**

### *2.1. Caracterização de área experimental*

O experimento foi instalado na mesma área do experimento 1. Por tanto, seguiu a mesma metodologia para preparo da área e plantio das plantas de cobertura e do café. Porém, as condições climáticas na figura 1 são do tempo de estudo deste experimento.

**Figura 1** - Precipitação e temperatura média ao longo do período experimental

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Nota: Os dados foram coletados em IMET (2024)

## 2.2. Desenho experimental

Em 2021 e 2022 foi instalado um experimento em delineamento em blocos casualizados – DBC (3 blocos), com três tratamentos: sem plantio de planta de cobertura na entrelinha do café – SP; com plantio de *Urochloa ruziziensis* (Braquiária) na entrelinha do café – BR e com plantio de *Arachis pintoii* (Amendoim forrageiro) na entrelinha do café – AF.

Em dezembro de 2022, foram instaladas subparcelas com doses de N dentro das áreas sem e com planta de cobertura (parcelas): 0, 100, 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N-Ureia. A dose 0 kg ha<sup>-1</sup> não representa ausência total N, uma vez que a fonte de P utilizada era o Monoamôniofosfato (MAP). Cada subparcela nos terraços possuía nove plantas totais das quais cinco eram consideradas uteis.

## 2.3. Manejo e amostragem da fitomassa das plantas de cobertura.

O manejo da fitomassa foi realizado como já explicado anteriormente no capítulo 1, mas neste estudo foram feitos três cortes da fitomassa da parte aérea na temporada chuvosa dos meses de dezembro do 2022 e fevereiro, abril do 2023.

#### 2.4. Decomposição da fitomassa das plantas de cobertura e liberação de nutrientes

Para avaliar a decomposição e liberação de nutrientes da fitomassa produzida pelas plantas de cobertura foi instalado um experimento para cada planta de cobertura em DBC (3 blocos) com arranjo em parcelas subdivididas, onde a parcela principal correspondia as quatro doses de N-Ureia (Dose 0, 100, 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup>) e as subparcela aos cinco tempos 5 (0, 20, 40, 90 e 180 dias de decomposição). Usou-se o método das bolsas de decomposição (*litter bags*), no qual foram confeccionados bolsas com material de nylon com malha de 2 mm de abertura (20 x 20 cm), conforme descrito por THOMAS; ASAKAWA (1993). Em cada bolsa foram alocados 20 g de material seco das plantas de cobertura referente ao primeiro corte, sendo a massa acomodada uniformemente no interior da bolsa, posteriormente as bolsas referentes a cada tempo de amostragem foram distribuídas aleatoriamente sob o solo dentro de cada dose, e na projeção das copas das plantas de café.

O material coletado referente a cada tempo de amostragem dentro de cada subparcela foi seco em estufa de circulação de ar forçada a 60°C e posteriormente triturado usando-se um moído tipo Willey, os quais na sequência foram realizadas as análises química de C e nutrientes. A determinação de C e N nos materiais foram realizadas utilizando um Espectrômetro de Massa de Razão Isotópica (IRMS 20-20 ANCA-GLS, Sercon Crewe, UK) e as análises de nutrientes foram realizadas conforme a metodologia descrita em (EMBRAPA, 2009).

Após a obtenção dos conteúdos de nutrientes nos materiais vegetais, foram testados 9 modelos matemáticos usando anova da regressão, possibilitando modelar o comportamento da perda de mMS e liberação de nutrientes a longo do tempo.

Uma vez ajustados os modelos, foram isoladas as equações com a finalidade de achar o tempo para a decomposição de 50% da mMS e liberação de 50% dos nutrientes contidos na fitomassa (Tempo de meia vida -  $t_{1/2}$ ).

Adicionalmente, foi estimado as quantidades totais de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O (kg ha<sup>-1</sup>) liberados pela decomposição da fitomassa de AF e BR após 180 dias conforme a Equação 1.

$$\text{Nutriente}_{N, P_{2}O_{5} e K_{2}O} (kg ha^{-1}) = [Nut_{N, P_{2}O_{5} e K_{2}O} (kg ha^{-1}) \times 5/6] \quad (1)$$

Onde,  $Nutriente_{N, P_{2}O_{5} e K_{2}O} (kg ha^{-1})$  é a quantidade de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O liberada pelo AF e BR após 180 dias na entrelinha do café;  $Nut_{N, P_{2}O_{5} e K_{2}O} (kg ha^{-1})$  é a quantidade de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O liberada pelo AF e BR após 180 dias por hectare; 5/6 é o fator de ponderação de

área de entrelinha pelo espaçamento de  $0,5 \times 6,0$  m e considerando uma faixa de 1 m de influência da linha do plantio.

### 2.5. *Status nutricional das plantas de café*

Para avaliar o status nutricional das plantas de café foi realizada amostragem foliar utilizando a metodologia descrita em RIBEIRO; GUIMARÃES; ALVAREZ V (1999) e as análises químicas de macro e micronutrientes em tecido vegetal conforme a metodologia descrita em EMBRAPA (2009). Com os dados obtidos foi possível utilizar os métodos de sistema integrado de diagnose e recomendação (DRIS) e índice de balanço do Kenworthy (BIK), por meio do sistema NUTRICAFÉ-UFV (LEITE et al., 2019), parametrizado com os valores de referência para o café arábica para a região de Viçosa.

### 2.6. *Produtividade do café*

As avaliações da produtividade foram realizadas nos anos de 2023 e 2024 após a instalação do experimento com doses de N-Ureia. A colheita foi realizada anualmente de forma manual, selecionando-se cinco plantas de café para cada tratamento consideradas como plantas úteis, nestas plantas todos os frutos foram colhidos utilizando uma peneira e lona com a finalidade de evitar perdas de fruto, medindo o volume coletado e convertendo a  $\text{kg ha}^{-1}$  usando um índice de peso-volume, o qual é quantificado depois da coleta (Equação 2).

$$\text{Índice peso-volume} = \text{massa de café beneficiado} / 1 \text{ litro de coleta (g L}^{-1}\text{)} \quad (2)$$

Além do índice, foi utilizado a densidade do plantio nos terraços para fazer uma relação de produção por hectare. Os dados obtidos dos dois anos foram somados, obtendo assim um acumulado de produção do experimento.

As doses crescentes de N-Ureia foram submetidas a análise de regressão, possibilitando testar nove modelos matemáticos. Esses modelos permitiram calcular a doses de máxima eficiência física (DMEF), econômica 90% (DMEE<sup>1</sup>) e econômica em relação aos preços dos fertilizantes e da saca de café beneficiados (DMEE<sup>2</sup>), igualdando-se a derivada primeira da função de produtividade ajustada a zero, a 90% da máxima produção (nível crítico) e à relação de preço do fertilizante utilizado (ureia) e da saca de café beneficiado, respectivamente. Para

tanto, foram considerados o preço médio da ureia ( $1,48 \text{ R\$ kg}^{-1} \text{ N}$ ) e da saca de café beneficiado ( $1369 \text{ R\$ saca}^{-1}$ ), vigentes no ano 2024 (CONAB, 2025).

## 2.7. Análise estatística

Os dados experimentais foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com base no modelo linear geral (GLM), adotando-se o delineamento em blocos casualizados (DBC), em esquema de parcelas subdivididas. As suposições inerentes à estatística paramétrica foram verificadas por meio dos testes de Jarque-Bera (normalidade dos resíduos), de Cochran (homogeneidade das variâncias) e teste F para aditividade. O efeito das doses sobre a produtividade foi analisado por meio de regressão polinomial, considerando-se a significância dos modelos ajustados e a não significância do erro de falta de ajuste, conforme o teste F. No caso dos ajustes de regressão para decomposição do resíduo das plantas de cobertura foi avaliado cada planta de cobertura como um experimento independente em DBC com arranjo em parcelas subdivididas, realizando também todos os procedimentos estatísticos mencionados para as pressuposições da estatística paramétrica. A produção do café nos diferentes tratamentos foi comparada por meio do teste de médias de Tukey (10%).

## 3. RESULTADOS

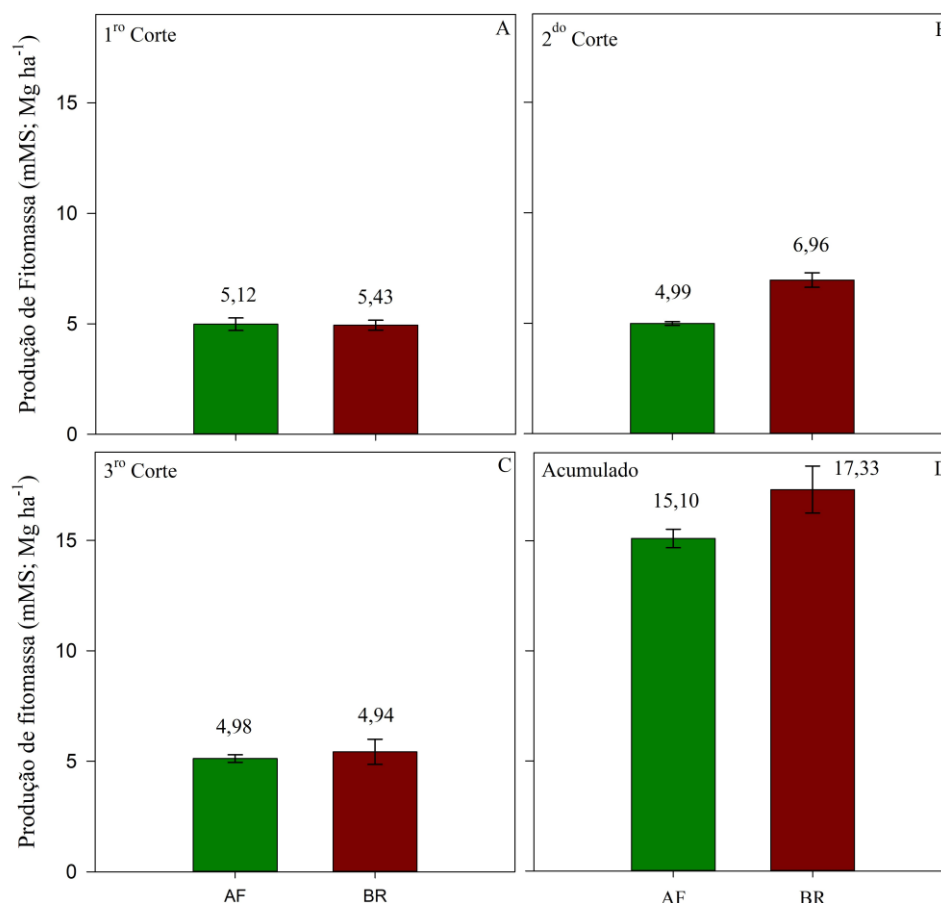
### 3.1. Produção de fitomassa e nutrientes das plantas de cobertura

A Braquiária (BR) teve uma produção de fitomassa 39,48% superior ao Amendoim forrageiro (AF) no segundo corte (fevereiro) (Figura 2b).

Considerando os três cortes na temporada chuvosa de 2022-2023, o manejo com BR possibilitou uma produção acumulada 14,77 % maior em relação ao AF (Figura 2d).

As análises químicas das plantas de cobertura de AF e BR reportaram teores de macro e micronutrientes em seus tecidos apresentados na Tabela 1. Por tanto, para AF as relações C/N, C/P e C/S foram de 14,03, 176,00 e 203,79, respectivamente. Já para BR as relações C/N, C/P e C/S foram de 35,59, 237,28 e 266,94, respectivamente.

**Figura 2** - Produção de fitomassa seca ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ) das parcelas com planta de cobertura amendoim forrageiro (AF) e braquiária (BR) nas entrelinhas do café na temporada chuvosa de 2022 e 2023 (1º Corte em dezembro de 2022 – A; 2º Corte em fevereiro de 2023 – B; 3º Corte em abril de 2023 – C; Fitomassa acumulada na temporada chuvosa 2022-2023 – D). Linhas verticais sobre as barras denotam intervalo de confiança das médias com 90% ( $n=4$ )



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

**Tabela 1** - Teores de nutrientes nas AF e BR utilizadas como plantas de cobertura

PC's	dag kg <sup>-1</sup>							mg kg <sup>-1</sup>			
	C	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Zn	Mn	B
AF	38,72	2,76	0,22	2,36	1,27	0,41	0,19	12,00	39,00	134,00	21,00
BR	42,71	1,20	0,18	2,15	0,30	0,27	0,16	4,00	24,00	103,00	6,00

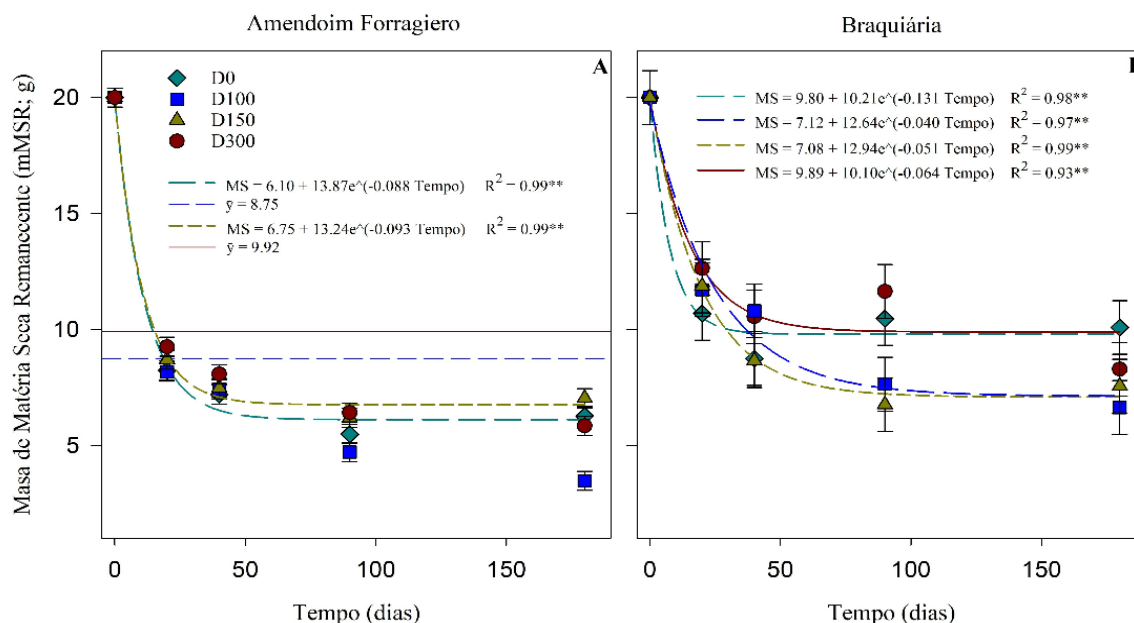
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

### 3.2. Decomposição dos resíduos e liberação de nutrientes

O padrão de decomposição da fitomassa do AF apresentou ajuste a modelos de regressão unicamente quando não se colocou Ureia e na dose de 150 kg ha<sup>-1</sup>, nas quais foram ajustados um modelo exponencial decaí com um R<sup>2</sup> de 0,99 para ambas as doses (Figura 3a). No tratamento onde não se aplicou ureia, após 14 dias, houve 50% da decomposição da fitomassa (Tempo de vida média - t<sub>1/2</sub>) (Tabela 2), enquanto na dose de 150 kg ha<sup>-1</sup> de N o t<sub>1/2</sub> foi equivalente a 15 dias (Tabela 2).

No caso da BR os ajustes de modelos de regressão foram possíveis para todas as doses testadas (Figura 3b), no entanto, a dose de N que apresentou a mais rápida decomposição da fitomassa foi a dose de 150 kg ha<sup>-1</sup>, demandando 29 dias para decompor 50% da fitomassa (Tabela 2). Por outro lado, quando não se aplicou Ureia e nas doses de 100 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N aos 29 dias foram decompostos 49,87, 44,68 e 42,72 % da fitomassa de BR, respectivamente.

**Figura 3** - Massa de Matéria Seca Remanescente (Mmsr; g) da fitomassa das plantas de cobertura Amendoim forrageiro (A) e Braquiária (BR) ao longo do tempo (0, 20, 40, 90 e 180 dias) com aplicação de 0, 100, 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N via Ureia. \*\* denota significância a 1 % de probabilidade por ANOVA da regressão. Linhas verticais sobre os pontos denotam erro padrão do experimento (n=4)



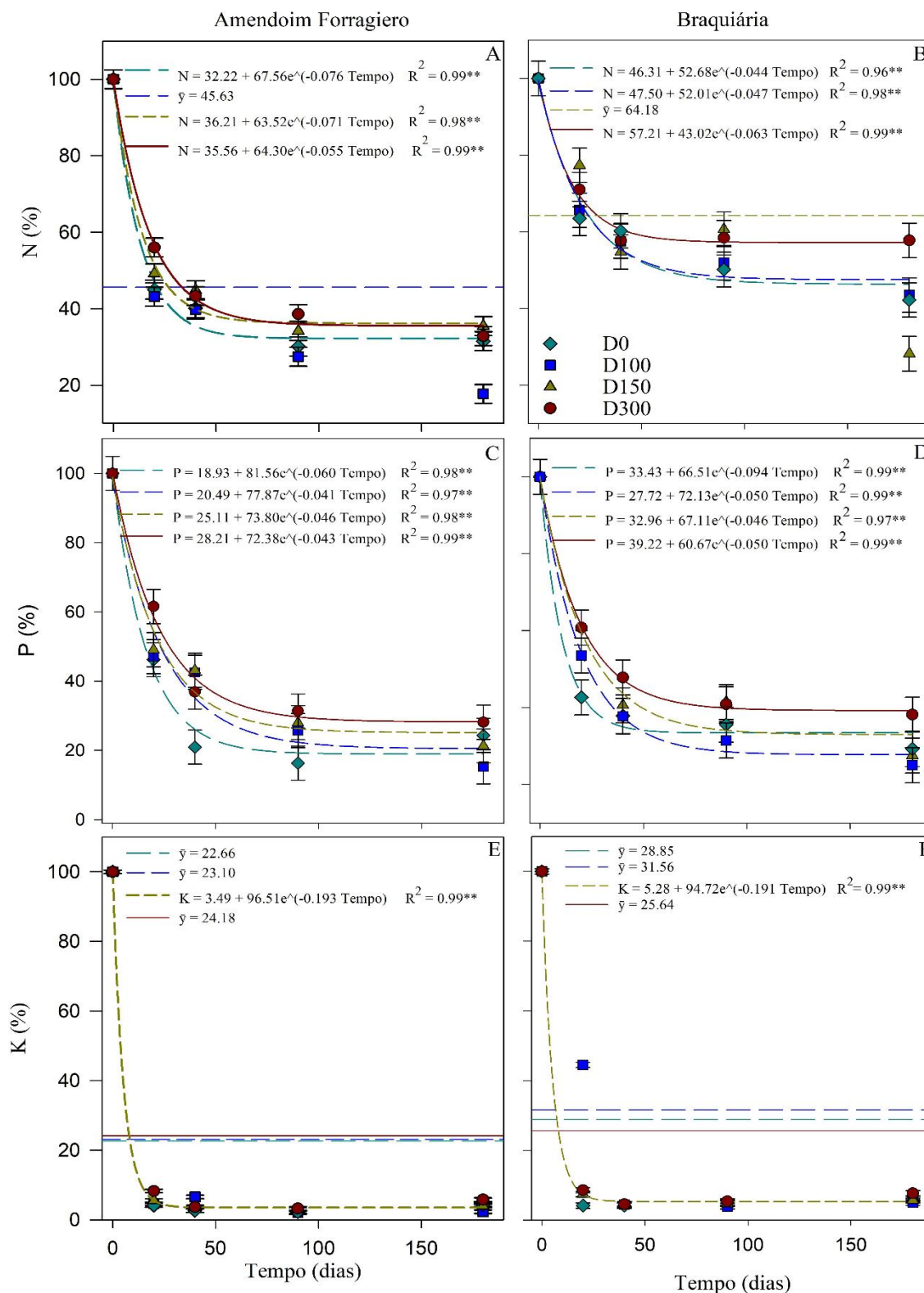
Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Em relação a liberação de N pela fitomassa do AF ao longo do tempo, foi possível ajustar modelos de regressão para as doses de N, exceto para a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 4). A não aplicação de N-Ureia (R<sup>2</sup> = 0,99) foi a que possibilitou a mais rápida liberação de N (t<sub>1/2</sub>)

após 18 dias (Tabela 2). Enquanto para as doses 150 ( $R^2 = 0,98$ ) e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N ( $R^2 = 0,99$ ) no mesmo tempo de 18 dias houve a liberação de 45,53 e 49,96 % de N da fitomassa de AF, respectivamente (Figura 4a). Quanto à liberação de N pela BR foi mais lenta em relação ao AF (Figura 4b), sendo que os  $t_{1/2}$  quando não se aplicou ureia e na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> foram 60 e 65 dias, respectivamente (Tabela 2). Para a dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> não foi possível achar um  $t_{1/2}$ , uma vez que durante o período experimental não alcançou a liberação do 50% de N.

Para a liberação de P pelas plantas de cobertura, foi possível ajustar um modelo matemático para todas as doses tanto para AF e BR, mostrando um comportamento semelhante quando não se usou Ureia e na dose 100 kg ha<sup>-1</sup> de N (Figura 4c-d). Quando não se aplicou N-Ureia o  $t_{1/2}$  para AF e BR foi de 16 e 15 dias, respectivamente, enquanto na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N-Ureia ambas mostram o mesmo  $t_{1/2}$  de 23 dias (Tabela 2). Para as doses de 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N-Ureia o comportamento muda, para AF houve uma mais rápida liberação de P em relação a BR (Tabela 2). Para o K foi possível modelar o comportamento de liberação unicamente na dose de 150 kg ha<sup>-1</sup> de N-Ureia para ambas as plantas de cobertura (Figura 4e-f), nesta dose apresentam um  $t_{1/2}$  de 4 dias (Tabela 2).

**Figura 4** - Liberação de Nitrogênio (N %; a-b), Fosforo (P %; c-d) e Potássio (K %; e-f) das plantas de cobertura Amendoim forrageiro (A) e Braquiária (BR) ao longo do tempo (0, 20, 40, 90 e 180 dias) com aplicação de 0, 100, 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N via Ureia. \*\* denota significância a 1% de probabilidade por ANOVA da regressão. Linhas verticais sobre os pontos denotam erro padrão do experimento (n=4)



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Por sua vez, a liberação do Ca teve ajustes para todas as doses de N-Ureia em ambas as plantas de cobertura (Figura 5a-b). No caso do AF a mais rápida liberação foi quando não se fez uma adubação mineral de N-Ureia com um  $t_{1/2}$  de 38 dias (Figura 5a; Tabela 2). Por outro lado, a BR apresentou o menor  $t_{1/2}$  (44 dias) quando foi aplicado a dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 2). Além disso, a liberação de Ca não conseguiu alcançar o 50% nas doses de 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup> para AF e BR, respectivamente. A mais rápida liberação de Mg para ambas as plantas de cobertura ocorreu quando não houve aplicação de adubação mineral de N, obtendo 50% da liberação aos 12 e 7 dias para AF e BR, respectivamente (Tabela 2).

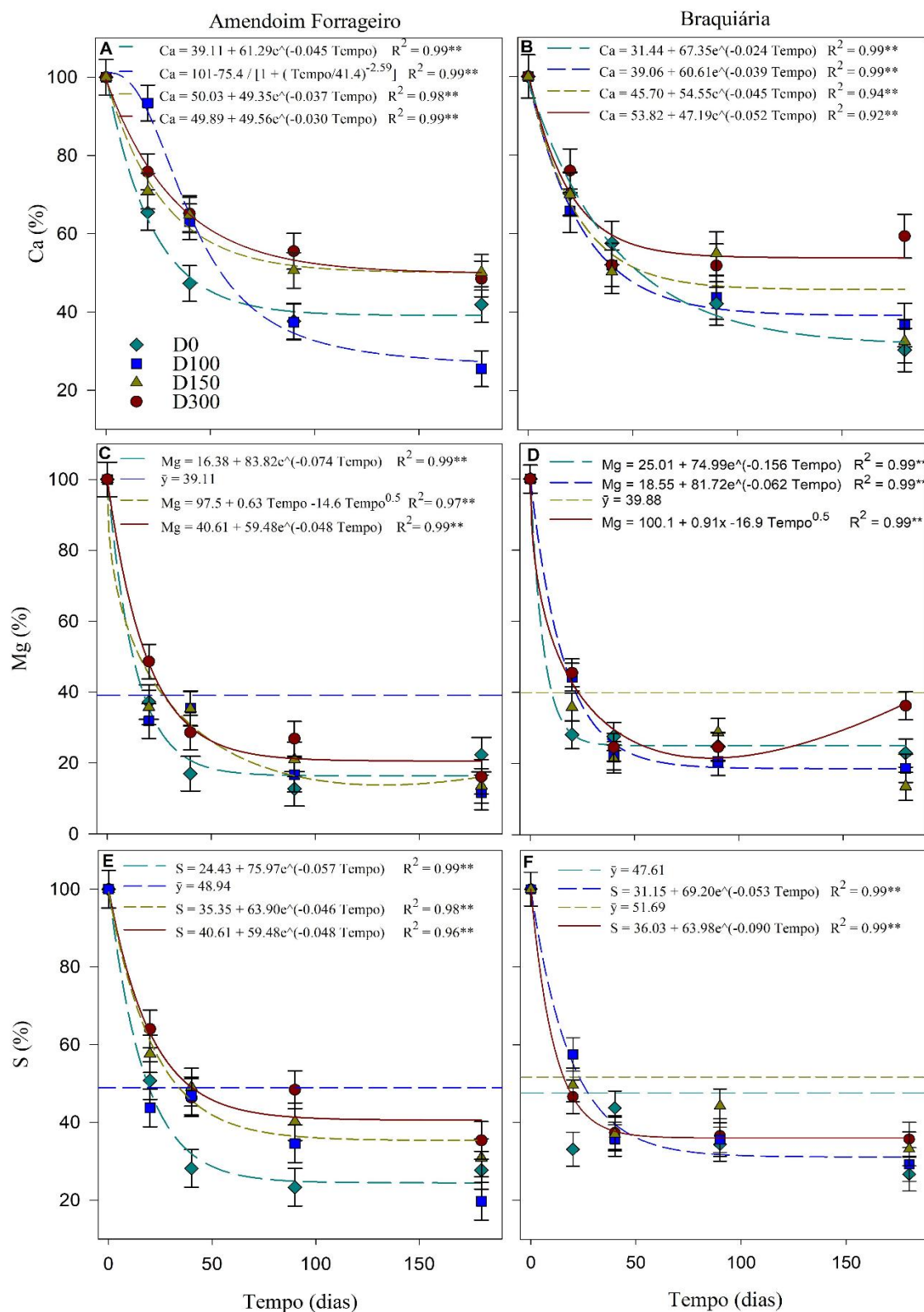
Finalmente, a mais rápida liberação de S pela fitomassa de AF também ocorreu quando não houve aplicação de N mineral (Figura 5e), apresentando  $t_{1/2}$  de 19 dias (Tabela 2). Esta situação foi totalmente diferente no caso da BR, a qual mostrou uma mais rápida liberação de S na dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 5f), liberando 50% do conteúdo de S em 17 dias (Tabela 2). Para o restante das doses de N que apresentaram ajuste, o AF, no tempo de 17 dias, liberou 37,72% de seu conteúdo de S na dose 150 kg ha<sup>-1</sup>, enquanto 35,25% foram liberados na dose de 300 kg ha<sup>-1</sup> (Figura 8f). No caso da liberação de S pela fitomassa de BR, a única dose, além da mencionada, que possuiu ajuste foi com aplicação de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, que no tempo de 17 dias liberou somente 40,50% do conteúdo de S (Figura 8f).

**Tabela 2** - Tempo de vida meia ( $t_{1/2}$ ) da fitomassa de amendoim forrageiro - AF e braquiária - BR aplicados ao solo com diferentes doses de N via ureia (0, 100, 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup>) durante o período de 180 dias

Dose (kg ha <sup>-1</sup> )	Amendoim Forrageiro - AF						
	MS	N	P	K	Ca	Mg	S
	$t_{1/2}$ (dias)						
0	14,28	17,56	15,83	-	37,83	12,32	18,79
100	-	-	23,24	-	55,21	-	-
150	15,10	21,48	23,57	3,78	∞	15,53	32,31
300	-	26,91	27,58	-	204,84	18,78	37,81
Dose (kg ha <sup>-1</sup> )	Braquiária - BR						
	MS	N	P	K	Ca	Mg	S
	$t_{1/2}$ (dias)						
0	39,78	60,22	14,75	-	53,33	7,04	-
100	36,81	64,63	23,44	-	43,76	15,53	24,66
150	29,12	-	39,76	4,13	69,45	-	-
300	69,53	∞	34,22	-	∞	13,69	16,84

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

**Figura 5.** Liberação de Cálcio (Ca %; a-b), Magnésio (Mg %; c-d) e Enxofre (S %; e-f) das plantas de cobertura Amendoim forrageiro (A) e Braquiária (BR) a longo do tempo (0, 20, 40, 90 e 180 dias) com aplicação de 0, 100, 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N via Ureia. \*\* denota significância a 1% de probabilidade por ANOVA da regressão. Linhas verticais sobre os pontos denotam erro padrão do experimento (n=4)



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Quando não se aplicou N-Ureia o AF proporcionou 272,12, 58,40 e 319,34 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, respectivamente; enquanto para a BR as quantidades de nutrientes que foram liberando são de 92,91, 38,84 e 266,46 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, respectivamente (Tabela 3). Desta forma, as quantidades de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O equivalente liberados pelo AF foram maiores em 192,89, 50,36 e 19,85 % em relação as quantidades liberadas pela BR após 180 dias.

**Tabela 3** - Quantidade de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O (kg ha<sup>-1</sup>) liberado pela fitomassa do primeiro corte das plantas de cobertura de AF e BR manejados na entrelinha do café com a aplicação de diferentes doses de N-Ureia (0, 100, 150, 300 kg ha<sup>-1</sup>) após 180 dias

Doses (kg ha <sup>-1</sup> )	Braquiária			Amendoim F		
	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	N	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O
D0	26,73	11,17	76,65	77,13	16,56	90,51
D100	26,14	12,13	73,73	61,87	16,23	90,00
D150	17,84	11,25	102,55	72,58	15,28	112,94
D300	21,31	10,20	80,11	73,33	14,65	88,73

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

### 3.3. Status nutricional das plantas de café.

As doses crescentes de N, resultou no aumento dos teores de N nos tecidos das plantas de café, este efeito foi visualizado com o manejo de todos os tratamentos de cobertura (Tabela 4). Finalmente, as plantas de café em consórcio com AF cultivadas na entrelinha apresentaram teores de N no tecido que varia em um 16,41% das doses 0 a 300 kg ha<sup>-1</sup>, no caso da BR e SP essa variação foi de 22,73 e 10,00%, respectivamente (Tabela 4).

Com o uso de AF os teores foliares de K foram mais elevados quando foi aplicado 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, no caso do uso da BR o teor foliar de K foi mais elevado quando não houve aplicação de N (Tabela 4).

**Tabela 4** - Teores foliares de N, P, K, Ca, Mg, S, Cu, Fe, Zn, Mn e B em plantas de café cultivadas sem (SP) e com plantas de cobertura Amendoim forrageiro (AF) e Braquiária (BR) nas entrelinhas, associado a aplicação de 0, 100, 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N-Ureia

PC's	Dose (kg ha <sup>-1</sup> )	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Zn	Mn	B
		dag kg <sup>-1</sup>							mg kg <sup>-1</sup>		
AF	0	2,56	0,15	1,82	0,83	0,27	0,18	10,57	5,49	145,49	37,12
	100	2,77	0,14	2,01	0,87	0,28	0,19	9,86	5,47	173,27	31,80
	150	2,76	0,13	1,66	0,92	0,28	0,20	7,23	5,11	174,45	26,01
	300	2,98	0,16	1,74	0,93	0,32	0,21	11,18	5,35	197,95	35,07
BR	0	2,20	0,16	1,71	0,91	0,28	0,21	15,27	5,33	112,91	42,42
	100	2,48	0,13	1,35	0,93	0,32	0,19	9,39	6,03	137,20	38,71
	150	2,56	0,13	1,47	0,88	0,32	0,18	7,43	5,03	179,58	32,61
	300	2,70	0,13	1,17	0,90	0,39	0,19	7,37	14,48	188,18	28,72
SP	0	2,50	0,16	1,76	0,89	0,33	0,19	11,93	6,25	154,24	40,00
	100	2,62	0,14	1,77	0,78	0,27	0,19	9,99	5,69	145,86	35,50
	150	2,61	0,14	1,44	0,91	0,44	0,18	9,40	5,59	172,05	35,04
	300	2,75	0,14	1,68	0,92	0,30	0,21	9,18	6,24	160,15	27,94

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

### 3.3.1. Sistema Integrado de Diagnose e recomendação (DRIS) e Índices balanceados de Kenworthy (BIK)

O equilíbrio dos nutrientes N e P nas plantas de café, verificado por meio do índice DRIS, não foi alterado com o aumento das doses de N aplicadas, mas é evidente o aumento do índice para o N e a redução do índice para o P nas doses em relação à dose 0 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 5). O índice de equilíbrio nutricional médio (IENm) apresentou comportamento similar ao DRIS de N.

Além do mencionado, quando não se aplicou N-Ureia é possível observar diferentes interações com as plantas de cobertura, para os cafeeiros com SP o N se encontra no equilíbrio, no entanto há um aumento no índice quando o AF esteve presente nas entrelinhas do cafeeiro e uma diminuição quando é o cultivo o BR nas entrelinhas (Tabela 5).

Com o auxílio do índice DRIS é possível determinar o potencial de resposta à adubação dos cafeeiros cultivados com as diferentes plantas de cobertura, no caso do uso de AF com a aplicação de 100 kg ha<sup>-1</sup> N-ureia o N chegou à classe de resposta negativa ou nula para adubação (classe onde o valor absoluto do índice é maior que o IENm, mas não o maior de todos os índices), no entanto para os cafeeiros com a BR e SP chegar no mesmo nível será necessário aplicar 150 ou 300 kg ha<sup>-1</sup> de N e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente.

**Tabela 5** - Índices DRIS e índice de equilíbrio nutricional médio (IENm) de plantas de café cultivadas sem (SP) e com plantas de cobertura (PC's) de Amendoim forrageiro (AF) e Braquiária (BR) nas entrelinhas, associado a aplicação de 0, 100, 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N-Ureia

PC's	Dose (kg ha <sup>-1</sup> )	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B	IENm <sup>(1)</sup>
AF	0	0,42	0,21	-0,46	-0,21	-0,90	0,52	-1,07	1,22	-0,54	0,06	0,38	0,54
	100	0,69	-0,14	-0,16	-0,10	-0,80	0,69	-1,01	0,95	-0,57	0,27	0,05	0,49
	150	0,90	-0,18	-0,69	0,29	-0,75	0,96	-1,59	1,54	-0,62	0,35	-0,26	0,74
	300	0,70	0,21	-0,91	-0,11	-0,62	0,70	-0,92	1,17	-0,83	0,35	0,10	0,60
BR	0	-0,36	0,50	-0,80	-0,04	-0,91	0,93	-0,10	1,26	-0,76	-0,33	0,57	0,60
	100	0,42	-0,27	-1,43	0,29	-0,39	0,76	-0,95	1,31	-0,25	0,01	0,49	0,60
	150	0,69	-0,20	-1,01	0,17	-0,28	0,65	-1,47	1,39	-0,61	0,41	0,22	0,65
	300	0,69	-0,45	-2,16	0,07	0,06	0,57	-1,85	0,98	1,95	0,36	-0,25	0,85
SP	0	0,02	0,37	-0,82	-0,26	-0,53	0,46	-0,74	1,41	-0,41	0,03	0,37	0,49
	100	0,54	0,04	-0,54	-0,47	-0,94	0,73	-0,88	1,59	-0,45	0,06	0,30	0,59
	150	0,44	-0,03	-1,36	0,02	0,38	0,35	-1,04	1,37	-0,55	0,24	0,19	0,54
	300	0,67	-0,08	-0,79	0,10	-0,61	0,92	-1,25	1,12	-0,23	0,17	-0,22	0,56

<sup>1</sup> Índice de equilíbrio nutricional médio

Equilibrado

Moderadamente desequilibrado

Desequilibrado

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

O índice BIK demonstra que as plantas de café apresentarem adequado estado nutricional com respeito ao N em todas as interações com as plantas de cobertura (Tabela 6). O uso de BR nas entrelinhas dos cafeeiros com aplicação de 0 kg ha<sup>-1</sup> de N desencadeou que o índice BIK se localizasse nos limites marginais das faixas de interpretação do estado nutricional, além disso, o uso de BR promoveu uma redução dos valores de índice BIK para o P com o aumento das doses de N aplicadas (Tabela 6).

A sequência média de limitação nutricional (mais deficiente para o mais excessivo) pelo índice BIK variou segundo a planta de cobertura utilizada. Quando foi utilizado o AF o N foi o nono elemento limitante para a produção, independente das doses de N aplicadas (Tabela 6). No entanto, quando se utilizou a BR nas entrelinhas dos cafeeiros o N foi o quarto nutriente mais limitante para a produção, reduzindo a sua relevância a medida que havia o aumento das doses de N aplicadas (Tabela 6). Os cafeeiros com o uso de SP tiveram o mesmo comportamento do que para o uso de BR, mas na dose 0 kg ha<sup>-1</sup> de N, o nutriente N foi o sexto mais limitante para a produção dos cafeeiros.

**Tabela 6** - Índice BIK de plantas de café cultivadas sem (SP) e com plantas de cobertura (PC's) de Amendoim forrageiro (AF) e Braquiária (BR) nas entrelinhas, associado a aplicação de 0, 100, 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N-Ureia

PC's	Dose (kg ha <sup>-1</sup> )	N	P	K	Ca	Mg	S	Cu	Fe	Zn	Mn	B
AF	0	92	89	76	82	71	95	83	119	80	92	95
	100	99	84	83	84	73	100	82	111	80	96	86
	150	99	80	71	89	72	103	77	125	78	96	77
	300	105	96	74	90	79	107	84	125	79	100	92
BR	0	81	97	73	88	73	108	91	124	79	87	103
	100	90	79	61	89	78	99	81	120	83	91	97
	150	92	78	65	85	79	94	77	119	77	97	88
	300	97	78	55	87	89	97	77	113	132	98	82
SP	0	90	97	75	86	80	100	85	133	84	93	99
	100	94	85	75	77	70	100	82	130	81	92	92
	150	94	86	64	88	97	94	81	126	81	96	92
	300	98	85	72	89	76	106	80	117	84	94	80
Faixa marginal (50 a 83 %)		Faixa adequada (83 a 117 %)					Faixa elevada (117 a 150 %)					

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

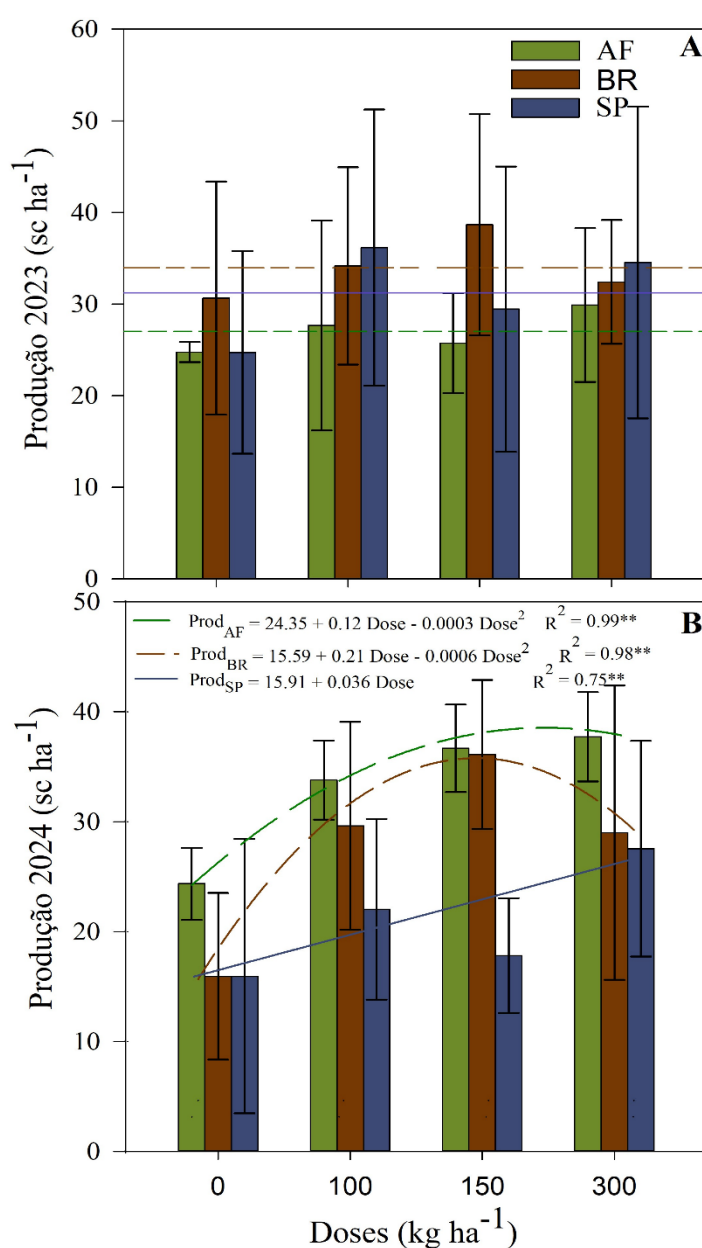
### 3.4. Produtividade do café

A produção de grãos de café para o ano 2023, nas condições do experimento, não foi possível ajustar um modelo de regressão com resposta às crescentes doses de N aplicadas (Figura 6a), além disso, não houve diferença na produção pelas diferentes plantas de cobertura ( $p = 0,165$ ).

No entanto, para a produção de grãos de café no ano 2024 foi possível ajustar equações para estimar a resposta da adubação com N quando os cafeeiros foram cultivados com diferentes plantas de cobertura na entrelinha (Figura 6b). Para o uso de AF e BR as equações ajustadas foram quadráticas com um  $R^2$  de 0,99 e 0,98, respectivamente. Para os cafeeiros com uso de SP o ajuste foi linear com um  $R^2$  igual a 0,75 (Figura 6b). Por sua vez com estes ajustes foi possível calcular a dose de máxima eficiência econômica (DMEE) e a produção na máxima eficiência econômica (MEE), no qual a DMEE quando houve o uso de AF nas entrelinhas dos cafeeiros foi de 90 kg ha<sup>-1</sup> de N resultando em uma MEE de 32,72 sacas ha<sup>-1</sup> (Tabela 8). Por sua vez, o uso de BR nas entrelinhas proporcionou uma menor MEE em relação ao uso de AF (30,57 sacas ha<sup>-1</sup>) demandando uma maior DMEE (99,78 kg ha<sup>-1</sup>; Tabela 8). No caso do uso de SP por apresentar um ajuste linear sua DMEE foi de 300 kg ha<sup>-1</sup>, mesmo assim mostrando uma produção menor em relação aos usos de AF e BR (26,71 sacas ha<sup>-1</sup>; Tabela 8).

A produção de grãos de café em 2024 com o uso de AF e BR nas entrelinhas com aplicação de 150 kg ha<sup>-1</sup> de N foram de 36,66, 36,11 sc ha<sup>-1</sup>, respectivamente, as quais foram 105,72 % e 102,64 % superiores que aqueles quando utilizaram SP (17,82 sc ha<sup>-1</sup>; Figura 10b).

**Figura 6** - Produção de grãos de café em cafeeiros cultivados sem (SP) e com plantas de Amendoim forrageiro (AF) e Braquiária (BR) nas entrelinhas, associado a aplicação de 0, 100, 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N via Ureia, nos anos 2023 (A) e 2024 (B). \*\* denota significância a 1% de probabilidade por ANOVA da regressão e a não significância para falta de ajuste pelo teste F. Linhas verticais sobre as barras denotam intervalo de confiança das médias com 90% (n=4)



Fonte: elaborado pelo próprio autor.

Finalmente, considerando os preços da saca de café e fertilizantes nitrogenados, foi possível calcular a DMEE em relação preço do café e preço dos fertilizantes. Resultando que com os preços elevados de café no final do 2024, esta dose fica próxima da DMEF, dando a ideia de que atualmente compensa adubar com as máximas doses para assim obter uma máxima produção.

**Tabela 7** - Dose na máxima eficiência física (DMEF), dose na máxima eficiência econômica (DMEE), produção de grãos de café na máxima eficiência física (MEF) e produção de grãos de café na máxima eficiência econômica (MEE) de cafeeiros cultivados sem (SP) e com plantas de amendoim forrageiro (AF) e braquiária (BR) nas entrelinhas e com aplicação de 0, 100, 150 e 300 kg ha<sup>-1</sup> de N-Ureia no ano 2024

Planta de cobertura	DMEF	DMEE <sup>1</sup>	DMEE <sup>2</sup>	Produção na MEF	Produção na MEE <sup>1</sup>	Produção na MEE <sup>2</sup>
	kg ha <sup>-1</sup>			sacas ha <sup>-1</sup>		
Amendoim F.	200,00	90,00	198,17	36,35	32,72	36,35
Braquiária	175,00	99,78	174,08	33,97	30,57	33,97
Sem Planta	300,00	-	-	26,71	-	-

<sup>1</sup> máxima eficiência econômica considerando 90% da produção máxima; <sup>2</sup> máxima eficiência econômica considerando um cenário médio de relação entre preços dos fertilizantes e saca de café beneficiado do ano 2024

Fonte: elaborado pelo próprio autor.

## 4. DISCUSSÃO

### 4.1. Fitomassa e liberação de nutrientes das plantas de cobertura.

A planta de braquiária (BR) produziu uma maior quantidade de fitomassa em relação ao amendoim forrageiro (AF) (Figura 2 A-D), o qual também pôde ser constatado em estudos prévios (SANTOS; MARCHI; MARCHI, 2008), promovendo assim uma elevada capacidade de gerar resíduos orgânicos a serem aportados na superfície do solo. Em contrapartida, apesar do AF apresentar menor produção de fitomassa, o mesmo destacou-se por possuir elevados teores de Ca, N e Mg em relação a braquiária (69,84, 32,49 e 49,37%, respectivamente) (Tabela 1), o qual também foi observado por ALVES; FIGUEIDERO (2022) ao estudar a liberação de nutrientes de quatro espécies de plantas de cobertura.

A dinâmica de decomposição de resíduos (fitomassa) de plantas adicionadas ao solo é um processo complexo dependente de fatores bióticos: fauna e microrganismo do solo (WHALE, 2014); e abióticos: umidade, temperatura, aeração do solo (LAMPARTER et al., 2009), pH do solo (SOUZA et al., 2016), relação C/N da matéria orgânica (HARTLEY et al., 2010) e ausência de substâncias inibidoras. No entanto, os fatores direcionadores inicialmente

de processos são a composição química (principalmente N, P e S) e bioquímica dos resíduos (MAFONGOYA; GILLER; PALM, 1997).

Neste estudo, o AF apresentou uma rápida decomposição ( $t_{1/2}$ : 14 dias na dose 0 kg ha<sup>-1</sup>; Tabela 2) em relação a fitomassa de BR ( $t_{1/2}$ : 39,78 dias na dose 0 kg ha<sup>-1</sup>; Tabela 2), o qual possivelmente foi devido ao mais elevado teor de N na fitomassa do AF (C/N<sub>AF</sub>: 14,03; Tabela 1) em relação a BR (C/N<sub>B</sub>: 35,59; Tabela 1). MONTEIRO et al. (2002) ao estudar diferentes resíduos de gramíneas e leguminosas verificou que a composição bioquímica (principalmente toeres de Lignina-Lig e polifenóis-Pol) isoladamente não direcionaria a velocidade de decomposição, e sim a relação (Lig+Pol):N. Assim, no estudo mencionado, apesar do AF apresentar maiores teores de Lig+Pol em relação a B brizantha cv comum e B humidicula promoveu mais rápida liberação de N e taxa de decomposição por possuir menor relação (Lig+Pol):N (AF: 8,00; B brizantha: 17,00 e B humidicula: 32,00).

A aplicação de N-ureia não influenciou na decomposição das fitomassas, de AF e BR, causando um efeito nulo ou negativo (Tabela 2). Esse fenômeno foi explicado por BERG (2014) que descreveu três etapas importantes na decomposição da fitomassa, no qual a primeira etapa (Early stage) caracteriza-se pela decomposição de substâncias solúveis e holocelulosicas, esta etapa é favorecida pelo aumento na concentração de nitrogênio (N), na segunda (Late stage) e terceira etapa (Final stage) o N pode retardar o processo devido à combinação com grupos reativos de lignina, criando compostos mais recalcitrantes.

Os fatores que controlam a decomposição da fitomassa têm efeitos diretos na magnitude de liberação dos nutrientes (MANGARAVITE et al., 2023). Além disso, os resíduos vegetais com relações C/N mais baixas, associados as menores relações (Lig+Pol):N apresentam mais alta mineralização de nutrientes (ESPINDOLA; GUERRA; ALMEIDA, 2005; MONTEIRO; GAMA-RODRIGUES, 2004), similar ao que foi observado para a fitomassa de AF, a qual liberou maiores quantidade de N após 180 dias de decomposição (D0: 77,13 kg ha<sup>-1</sup>; D100: 61,87 kg ha<sup>-1</sup>; D150: 72,58 kg ha<sup>-1</sup> e D300: 73,33 kg ha<sup>-1</sup>; Tabela 3) em relação a fitomassa da BR (D0: 26,73 kg ha<sup>-1</sup>; D100: 26,14 kg ha<sup>-1</sup>; D150: 17,84 kg ha<sup>-1</sup> e D300: 21,31 kg ha<sup>-1</sup>; Tabela 3).

Além do N, o fosforo (P) é outro nutriente que está diretamente ligado ao processo de decomposição da fitomassa, já que a maior parte do P está associada a componentes orgânicos vegetais (MARSCHNER, 2012) e o mesmo é requerido em quantidades significativas pelos microrganismos do solo. Assim, resíduos que apresentam relações C/P inferiores a 200,00 tende a proporcionar um estímulo a uma mais rápida decomposição (favorecendo o processo de mineralização de P) (VALADARES et al., 2016), o qual corrobora com as maiores quantidades

de  $P_2O_5$  liberado pelo AF ( $C/P_{AF}$ : 176,00; D0: 16,56 kg ha<sup>-1</sup>; D100: 16,23 kg ha<sup>-1</sup>; D150: 15,28 kg ha<sup>-1</sup> e D300: 14,65 kg ha<sup>-1</sup>; Tabela 3) em relação a fitomassa de BR ( $C/P_B$ : 237,28; D0: 11,17 kg ha<sup>-1</sup>; D100: 12,13 kg ha<sup>-1</sup>; D150: 11,25 kg ha<sup>-1</sup> e D300: 10,20 kg ha<sup>-1</sup>; Tabela 3)

Por sua vez, o potássio (K) apresentou a mais rápida liberação ao longo do processo de decomposição do AF e BR, o qual é explicado pelo fato de o nutriente estar predominantemente presente em componentes não estruturais, armazenado na forma iônica no vacúolo das células vegetais (BARKERT, C.M. et al. 2003), proporcionando baixa dependência da decomposição química da fitomassa para sua liberação. A taxa de liberação de nutrientes durante o processo de decomposição está diretamente relacionada à forma química e à compartimentalização dos nutrientes na fitomassa vegetal (MARSCHNER, 2012). Apesar disso, mesmo que a quantidade de fitomassa acumulada de BR ter sido maior que a do AF (Figura 5 D), a ligeira diferença nos teores de K no AF (2,36 dag kg<sup>-1</sup>; Tabela 1) em relação a BR (2,15 dag kg<sup>-1</sup>; Tabela 1) foi o suficiente para que a fitomassa de AF promovesse a liberação de maiores quantidades acumuladas de  $K_2O$  (D0: 90,51 kg ha<sup>-1</sup>; D100: 90,00 kg ha<sup>-1</sup>; D150: 112,94 kg ha<sup>-1</sup> e D300: 88,73 kg ha<sup>-1</sup>; Tabela 3) em relação a fitomassa de BR (D0: 76,65 kg ha<sup>-1</sup>; D100: 73,73 kg ha<sup>-1</sup>; D150: 102,55 kg ha<sup>-1</sup> e D300: 80,11 kg ha<sup>-1</sup>; Tabela 3).

Assim, independente das doses de N-Ureia aplicadas, o uso das plantas de AF ou BR constituíram importantes fontes de entrada N,  $P_2O_5$  e  $K_2O$ , seja por meio da FBN (para o AF) ou pela ciclagem de nutrientes estimulada por processos rizosféricos (mineralização da MOS – N e P ou mobilização de K), garantindo a remobilização dos nutrientes de diferentes camadas do solo em formas disponíveis para a absorção pelas plantas de café.

#### 4.2. *Status nutricional e produtividade das plantas de café*

A dinâmica de liberação dos nutrientes pela decomposição das diferentes plantas de cobertura (AF e BR) proporcionaram disponibilidade distintas dos nutrientes para as plantas de café, culminando em alterações no status nutricional das plantas de café pela interação entre as plantas de cobertura e as doses aplicadas de N-Ureia (Tabela 4,5 e 6).

O uso do AF nas entrelinhas do café proporcionou, mesmo na D0 de N-Ureia, elevados teores foliares de N (Tabela 4), além de índices DRIS (equilibrado) e BIK (balanços adequados) mais elevados (Tabela 5 e 6). Assim, além da fitomassa de AF ter disponibilizado elevadas quantidades acumuladas de N (D0: 77,13 kg ha<sup>-1</sup>), possivelmente a dinâmica mais rápida de liberação de N pelo AF possibilitou maior sincronização com a demanda das plantas de café, garantindo um maior equilíbrio e balanço nutricional nas mesmas.

De forma geral para ambas as plantas de cobertura, AF e BR, as doses crescentes de N-Ureia provocaram um desequilíbrio para o P e K (Tabela 5). Tal fato pode ser explicado pelo antagonismo existente quando ocorre uma maior absorção de N na forma de amônio ( $\text{NH}_4$ ) em relação a forma de nitrato ( $\text{NO}_3$ ), no qual as interações entre o N com P e K são negativas para as formas de  $\text{NH}_4^+$  e positivas com as formas de  $\text{NO}_3^-$  (ALVES et al., 1999; WAIREGI; VAN ASTEN, 2012), prejudicando assim a absorção de P e K pela planta.

O fornecimento dos nutrientes pela decomposição das plantas de cobertura culminando em alterações no status nutricional das plantas de café promoveram também reflexos na produtividade de grãos de café para o ano de 2024 (Figura 6 B). A produtividade do café teve uma resposta positiva com as plantas de cobertura na dose de  $150 \text{ kg ha}^{-1}$ , as maiores produções foram obtidas com o uso de AF e BR (aproximadamente  $16 \text{ sacas ha}^{-1}$ ) em relação ao tratamento SP, possivelmente devido ao aporte adicional de nutrientes via decomposição das fitomassas (Tabela 3). Semelhante observado foi verificada por GUIMARÃES et al. (2016) ao estudar o uso de AF nas entrelinhas de cafeeiros em dois municípios das Matas de Minas, no qual no município de Araponga e Pedra Dourada obtiveram  $15$  e  $10 \text{ sacas ha}^{-1}$  a mais em relação aos cafeeiros com plantas espontâneas, respectivamente.

O uso das plantas de cobertura (AF e BR) permitiram reduzir a adubação nitrogenada para a obtenção de MEE (Tabela 8). Assim, nossos resultados corroboram com a nossa hipótese i), uma vez que o uso do AF nas entrelinhas dos cafeeiros possibilitou um incremento de  $6,01 \text{ sacas ha}^{-1}$  com uma redução de  $210 \text{ kg ha}^{-1}$  de N-Ureia para obtenção da MEE nos cafeeiros (Tabela 7). Por outro lado, em divergência com a nossa hipótese ii), não foram necessárias maiores doses de N-Ureia para a obtenção de produção similar aos cafeeiros SP, pelo contrário, também houve redução das doses de N-Ureia aplicadas em  $200,22 \text{ kg ha}^{-1}$  de N-Ureia com um ganho de  $3,86 \text{ sacas ha}^{-1}$  em relação ao SP na produção de MEE (Tabela 7). Nossa hipótese ii) estava embasada na possibilidade de ocorrer predomínio dos processos de imobilização de N durante a decomposição da fitomassa de BR, uma vez que sua relação C/N não era inferior a  $20,00$  onde ocorre o predomínio da mineralização (VALADARES et al., 2016). No entanto, a relação C/N de  $35,59$  observada na fitomassa de BR (Tabela 1), não possibilitou uma imobilização expressiva a ponto de proporcionar a deficiência de N nas plantas de café (Tabela 4,5 e 6), e conseqüentemente não impactando negativamente na produção dos cafeeiros.

## 5. CONCLUSÕES

O manejo da fitomassa do amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) e braquiária (*Urochloa ruziziensis*) nas entrelinhas do cafeeiro aporta quantidade de nutrientes considerável após 180 dias e em temporada chuvosa quando é realizado a adubação de 150 kg ha<sup>-1</sup> de N-Ureia.

A produção do café (*Coffea arabica L*) com o manejo do amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) na entrelinha do cafeeiro possibilita uma maior produção em relação aos cafeeiros sem plantas na máxima eficiência econômica (MEE), com uma demanda de N-Ureia menor.

A produção do café (*Coffea arabica L*) com o manejo da braquiária (*Urochloa ruziziensis*) na entrelinha do cafeeiro possibilita uma produção maior em relação aos cafeeiros sem plantas na MEE, sem a necessidade de aumento das doses de N-Ureia, pelo contrário, demandando uma aplicação de N-Ureia menor.

O manejo do amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) e braquiária (*Urochloa ruziziensis*) nas entrelinhas de cafeeiros (*Coffea arabica L*) terraceados em agricultura de montanha constitui em uma estratégia para a otimização da produção e adubação nitrogenada, possibilitando a realização de sistemas de produção mais sustentáveis e com potencial de serem economicamente viáveis.

## 6. REFERÊNCIAS

- ALVES, M.; FIGUEIREDO, S. M. Plantas de cobertura no manejo de invasoras, no estoque de carbono do solo e na produtividade do guaranazeiro (*Paullinia cupana* var. *sorbilis* (Mart.) Ducke). **Universidade Federal do Amazonas**, 2022.
- ALVES, V. M. C. et al. Acúmulo de nitrogênio e de fósforo em plantas de milho afetadas pelo suprimento parcial de fósforo às raízes. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 23, n. 2, p. 299–305, 1999.
- BERG, B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. **Forest Ecology and Management**, v. 133, n. 1–2, p. 13–22, 2000.
- BERG, B. Decomposition patterns for foliar litter - A theory for influencing factors. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 78, p. 222–232, 2014.
- BORKERT, C.M. et al. Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, 143–153, 2003.
- BORTOLINI, C.; SILVA, P.; ARGENTA, G. Sistemas consorciados de aveia preta e ervilhaca comum como cobertura de solo e seus efeitos na cultura do milho em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 897–903, 2000.
- BREGAGNOLI, M.; NETO, J. F. R. **Café nas montanhas: Caracterização da cafeicultura na área de atuação da Cooperativa Regional de Cafeicultores em Guaxupé**. Pouso Alegre, **IPSULMINAS**, 2017.
- CONAB – Companhia nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira, estimativa de 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/precos>. Acesso em 07 de abril de 2025.
- CONSTANTIN, J. et al. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 135, n. 4, p. 268–278, 2010.
- DARYANTO, S. et al. Quantitative synthesis on the ecosystem services of cover crops. **Earth-Science Reviews**, v. 185, n. January, p. 357–373, 2018.
- EMBRAPA. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília, **EMBRAPA**, 2009.
- ESPINDOLA, J.; GUERRA, J.; ALMEIDA, D. **Uso de Leguminosas Herbáceas para Adubação Verde**. Brasília: Embrapa, 2005.
- GARCÍA, J. et al. Guía práctica de la fertilización racional de los cultivos en España. **Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino**. p. 243, 2010.
- GUIMARÃES, G. P. et al. Productivity of coffee and legumes intercropped under different sun

- exposure face. **Australian Journal of Crop Science**, v. 10, n. 4, p. 513–519, 2016.
- HARTLEY, I.P. et al. The response of organic matter mineralization to nutrient and substrate additions in sub - arctic soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, p. 92–100, 2010.
- LAMPARTER, A. Carbon mineralization in soil: impact of wetting - drying, aggregation and water repellency. **Geoderma**, v. 150, p. 324–333, 2009.
- LI, X. et al. Effects of contrasting catch crops on nitrogen availability and nitrous oxide emissions in an organic cropping system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 199, n. 2015, p. 382–393, 2015.
- LEITE RA, VENEGAS VHA, NEVES JCL, MARTINEZ HHP, NOVAIS RF. NutriCafé colinon: avaliação do estado nutricional como subsídio à adubação do café conilon. **Editora UFV**, Viçosa, MG, Brasil, 2009. (in portuguese).
- MAFONGOYA, P. L.; GILLER, K. E.; PALM, C. A. Decomposition and nitrogen release patterns of tree prunings and litter. **Agroforestry Systems**, v. 38, n. 1–3, p. 77–97, 1997.
- MANGARAVITE, J. C. S. et al. Decomposition and release of nutrients from species of tropical green manure. **Revista Ceres**, v. 70, n. 3, p. 114–124, 2023.
- MARSCHNER, P. Marschner's mineral nutrition of higher plants. 3ra. ed. **Elsevier Ltd**, 2012.
- MARTÍN ALONSO, G. M. et al. COMPARACIÓN DE DOS MODELOS DE RESPUESTA A DOSIS DE NITRÓGENO EN MAÍZ Y CAFETO Comparison of two models of response to nitrogen doses in corn and coffee. **Cultivos Tropicales**, v. 37, n. 2, p. 155–164, 2016.
- MATOS, E. et al. DECOMPOSITION AND NUTRIENT RELEASE OF LEGUMINOUS PLANTS IN COFFEE AGROFORESTRY SYSTEMS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 1, p. 141–149, 2011.
- MONTEIRO, H.C.F. et al. Dinâmica de Decomposição e Mineralização de Nitrogênio em Função da Qualidade de Resíduos de Gramíneas e Leguminosas Forrageiras. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.31, n.3, p.1092-1102, 2002.
- MONTEIRO, M.; GAMA-RODRIGUES, E. CARBONO, NITROGÊNIO E ATIVIDADE DA BIOMASSA MICROBIANA EM DIFERENTES ESTRUTURAS DE SERAPILHEIRA DE UMA FLORESTA NATURAL. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 5, p. 819–826, 2004.
- PERIN, A. et al. P, K, Ca and Mg accumulation and release by sunnhemp and millet in monocrop and intercropping. **Rev. Ceres**, v. 57, n. 2, p. 274–281, 2010.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, PAULO T. G.; ALVAREZ V, V. H. Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação. **Recomendações para o**

**uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5º Aproximação**, p. 359, 1999.

ROCHA, O. C. et al. Atributos químicos e físico-hídricos de um Latossolo sob cafeeiro consorciado com braquiária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1476–1483, 2016.

SANTOS, J. C. F.; MARCHI, G.; MARCHI, E. C. S. Cobertura do solo no controle de plantas daninhas do café. **Embrapa Cerrados**, v. 1, p. 56, 2008.

SILVA, J.P. et al. Decomposition and nutrient release from legume and non-legume residues in a tropical soil. **European Journal of Soil Science**, v. 1, p. 1-16, 2021. DOI: 10.1111/ejss.13151.

SOUZA, I. et al. Decomposition of eucalypt harvest residues as affected by management practices, climate and soil properties across southeastern Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 374, p. 186–194, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2016.05.012>.

THOMAS, R. J.; ASAKAWA, N. M. Decomposition of leaf litter from tropical forage grasses and legumes. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 25, n. 10, p. 1351–1361, 1993.

VALADARES, R.V. et al. Green Manures and Crop Residues as Source of Nutrients in Tropical Environment'. **Organic Fertilizers - From Basic Concepts to Applied Outcomes**. InTech. doi:10.5772/62981.

WAIREGI, L. W. I.; VAN ASTEN, P. J. A. Norms for multivariate diagnosis of nutrient imbalance in Arabica and Robusta coffee in the East African highlands. **Experimental Agriculture**, v. 48, n. 3, p. 448–460, 2012.

WHALEN, J.K. Managing soil biota - mediated decomposition and nutrient mineralization in sustainable agroecosystems. **Advances in Agriculture**, p. 384–604, 2014.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas condições de nosso experimento e no tempo estudado, os resultados demonstraram que a braquiária (*Urochloa ruziziensis*) utilizada como plantas de cobertura nas entrelinhas de cafeeiro (*Coffea arabica* L) aporta maiores quantidades de C via fitomassa a superfície do solo em relação as plantas de amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*). No entanto, o manejo de amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) nas entrelinhas de cafeeiros terraceados nas Matas de Minas durante quatro anos possibilita maiores recuperações de COT no perfil do solo (0-60 cm), além disso mostrou uma maior ciclagem de nutrientes com relação ao manejo de braquiária e plantas espontâneas.

O manejo das plantas de cobertura de amendoim forrageiro (*Arachis pintoi*) e braquiária (*Urochloa ruziziensis*) promoveram um menor déficit de saturação de carbono (DSC) em relação aos cafeeiros sem planta de cobertura nas entrelinhas. Por outro lado, além de aportar carbono ao solo, o manejo das plantas de cobertura na entrelinha de cafeeiro promoveu a ciclagem de nutrientes. O manejo da fitomassa do amendoim forrageiro nas entrelinhas do cafeeiro aporta 256,10 de N, 53,93 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 398,50 de K<sub>2</sub>O, enquanto a fitomassa de braquiária aporta 62,01 de N, 39,10 de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 356,48 de K<sub>2</sub>O após 180 dias quando é realizado a adubação de 150 kg ha<sup>-1</sup> de N-Ureia, beneficiando o status nutricional das plantas de café e possibilitando um incremento de 105,72 e 102,63 % na produção de café em relação ao manejo sem plantas nas entrelinhas, respectivamente.

Diante disso sugere-se que é necessário continuar o estudo ao longo prazo relacionados com o estoque de carbono no solo e pelos menos de um ano a mais para a produção do café com a finalidade de tirar o efeito da bienalidade. Isso possibilitará ver um comportamento do estoque de carbono e produtividade do café com mais clareza e confiabilidade.