



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA - PPGAGRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONEGÓCIO

DIEGO CÉSAR VELOSO REZENDE

**Estimativa da remoção do carbono em áreas de café do Cerrado
Mineiro e sua contribuição para a sustentabilidade**

GOIÂNIA
2025



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS
ESCOLA DE AGRONOMIA

TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO (TECA) PARA DISPONIBILIZAR VERSÕES ELETRÔNICAS DE TESES E DISSERTAÇÕES NA BIBLIOTECA DIGITAL DA UFG

Na qualidade de titular dos direitos de autor, autorizo a Universidade Federal de Goiás (UFG) a disponibilizar, gratuitamente, por meio da Biblioteca Digital de Teses e Dissertações (BDTD/UFG), regulamentada pela Resolução CEPEC nº 832/2007, sem ressarcimento dos direitos autorais, de acordo com a [Lei 9.610/98](#), o documento conforme permissões assinaladas abaixo, para fins de leitura, impressão e/ou download, a título de divulgação da produção científica brasileira, a partir desta data.

O conteúdo das Teses e Dissertações disponibilizado na BDTD/UFG é de responsabilidade exclusiva do autor. Ao encaminhar o produto final, o autor(a) e o(a) orientador(a) firmam o compromisso de que o trabalho não contém nenhuma violação de quaisquer direitos autorais ou outro direito de terceiros.

1. Identificação do material bibliográfico

Dissertação Tese Outro*: _____

*No caso de mestrado/doutorado profissional, indique o formato do Trabalho de Conclusão de Curso, permitido no documento de área, correspondente ao programa de pós-graduação, orientado pela legislação vigente da CAPES.

Exemplos: Estudo de caso ou Revisão sistemática ou outros formatos.

2. Nome completo do autor

Diego César Veloso Rezende

3. Título do trabalho

ESTIMATIVA DA REMOÇÃO DO CARBONO EM ÁREAS DE CAFÉ DO CERRADO MINEIRO E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA A SUSTENTABILIDADE

4. Informações de acesso ao documento (este campo deve ser preenchido pelo orientador)

Concorda com a liberação total do documento SIM NÃO¹

[1] Neste caso o documento será embargado por até um ano a partir da data de defesa. Após esse período, a possível disponibilização ocorrerá apenas mediante:

- a) consulta ao(à) autor(a) e ao(à) orientador(a);
 - b) novo Termo de Ciência e de Autorização (TECA) assinado e inserido no arquivo da tese ou dissertação.
- O documento não será disponibilizado durante o período de embargo.

Casos de embargo:

- Solicitação de registro de patente;
- Submissão de artigo em revista científica;
- Publicação como capítulo de livro;
- Publicação da dissertação/tese em livro.

Obs. Este termo deverá ser assinado no SEI pelo orientador e pelo autor.



Documento assinado eletronicamente por **Diego César Veloso Rezende, Discente**, em 25/02/2025, às 13:35, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cleonice Borges De Souza, Professor do Magistério Superior**, em 03/03/2025, às 13:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 5162089 e o código CRC 92386B77.

DIEGO CÉSAR VELOSO REZENDE

Estimativa da remoção do carbono em áreas de café do Cerrado Mineiro e sua contribuição para a sustentabilidade

Tese apresentada ao curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Agronegócio, da Escola de Agronomia da Universidade Federal de Goiás (UFG), como requisito para obtenção do título de Doutor em Agronegócio.

Área de concentração: Sustentabilidade e Competitividade dos Sistemas Agroindustriais.

Linha de pesquisa: Meio Ambiente e Desenvolvimento Regional

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Cleonice Borges de Souza

Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Francine Neves Calil

GOIÂNIA
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UFG.

Rezende, Diego César Veloso
Estimativa da remoção do carbono em áreas de café do Cerrado Mineiro e sua contribuição para a sustentabilidade [manuscrito] / Diego César Veloso Rezende. - 2025.
CXXII, 122 f.: il.

Orientador: Profa. Dra. Cleonice Borges de Souza; co-orientadora Dra. Francine Neves Calil.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Goiás, Escola de Agronomia (EA), Programa de Pós-Graduação em Agronegócio, Goiânia, 2025.

Bibliografia. Anexos. Apêndice.
Inclui siglas, mapas, fotografias, abreviaturas, tabelas, lista de figuras, lista de tabelas.

1. Equações alométricas. 2. Cafeicultura. 3. Sequestro de Carbono. 4. Desenvolvimento Sustentável. I. Souza, Cleonice Borges de, orient. II. Título.

CDU 631/635



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS

ESCOLA DE AGRONOMIA

ATA DE DEFESA DE TESE

Ata Nº **2/2025** da sessão de Defesa de Tese, de **Diego César Veloso Rezende**, que confere o título de Doutor em **Agronegócio**, na área de concentração em **Sustentabilidade e Competitividade dos Sistemas Agroindustriais**.

Aos **vinte e um dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e cinco**, a partir das **09h**, na **sala 13** do Desenvolvimento Rural (PPGAGRO) - Escola de Agronomia, realizou-se a sessão pública de Defesa de Tese intitulada "ESTIMATIVA DA REMOÇÃO DO CARBONO EM ÁREAS DE CAFÉ DO CERRADO MINEIRO E SUA CONTRIBUIÇÃO PARA A SUSTENTABILIDADE". Os trabalhos foram instalados pela Professora Doutora Cleonice Borges de Souza (EA/UFV), com a participação dos demais membros da Banca Examinadora: Professor Doutor Alcido Elenor Wander (EMBRAPA), membro titular interno; Professora Doutora Abadia dos Reis Nascimento (EA/UFV), membro titular interno; Professora Doutora Priscila Pereira Coltri (UNICAMP), membro titular externo; e Dr. Niro Higuchi (INPA), membro titular externo. Durante a arguição os membros da banca **não fizeram** sugestão de alteração do título do trabalho. A Banca Examinadora reuniu-se em sessão secreta a fim de concluir o julgamento da Tese tendo sido o candidato **aprovado** pelos seus membros. Proclamados os resultados pela Professora Doutora Cleonice Borges de Souza, Presidente da Banca Examinadora, foram encerrados os trabalhos e, para constar, lavrou-se a presente ata que é assinada pelos Membros da Banca Examinadora, aos **vinte e um dias do mês de fevereiro de dois mil e vinte e cinco**.

TÍTULO SUGERIDO PELA BANCA



Documento assinado eletronicamente por **Priscila Pereira Coltri, Usuário Externo**, em 22/02/2025, às 18:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Abadia Dos Reis Nascimento, Professor do Magistério Superior**, em 23/02/2025, às 10:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Cleonice Borges De Souza, Professor do Magistério Superior**, em 23/02/2025, às 16:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alcido Elenor Wander, Usuário Externo**, em 23/02/2025, às 17:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **LMF-INPA registrado(a) civilmente como NIRO HIGUCHI, Usuário Externo**, em 24/02/2025, às 08:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufv.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 5162088 e o código CRC 79D82D3A.

À minha linda família, Stefânia e Pedro.

5

AGRADECIMENTOS

Uma tese, independentemente de sua autoria ser individual, é uma construção fruto do esforço de muitos que contribuíram.

Primeiramente agradeço à Deus, pela força, fé e saúde que me proporciona todos os dias.

Agradeço à minha família, minha amada esposa Sthefânia, meu amado filho Pedro e meus pais Valdeir e Marlene. Muito do que faço e sou não seria possível sem o apoio e carinho deles. Muitas palavras de encorajamento, paciência e compreensão. O amor e apoio da minha família são verdadeiros pilares que me sustentam nos momentos desafiadores e me inspiram a perseguir meus objetivos acadêmicos e profissionais.

Gostaria de expressar minha eterna gratidão à minha orientadora, Professora Doutora Cleonice Borges, por sua orientação excepcional, sabedoria, constante paciência e incentivo ao longo deste trabalho. Agradeço também à minha co-orientadora, Professora Doutora Francine Calil, e à Professora Doutora Sybelle Barreira, por sua paciência e pela oportunidade de compartilhar seus conhecimentos. Um agradecimento especial à secretária do PPGAGRO, Lindinalva, por toda a paciência e apoio. Agradeço também à minha grande amiga Mallu, cuja amizade e incentivo foram fundamentais para que eu iniciasse essa jornada no doutorado.

Expresso minha sincera gratidão ao Professor Dr. Niro Higuchi, pela colaboração engrandecedora e valiosa, pelas contribuições técnicas e apoio durante este estudo. Suas experiências e conhecimentos foram essenciais para enriquecer o conteúdo deste trabalho e para aprofundar minha compreensão dos aspectos técnicos e científicos abordados.

Além disso, gostaria de estender meus agradecimentos a toda a equipe do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, em especial, à Adélia, Deise, Israel, Chico, Valdiek, e todos que direta ou indiretamente foram atores nessa pesquisa. A dedicação e o profissionalismo de cada membro da equipe foram notáveis, e sua colaboração foi fundamental para o sucesso e a qualidade deste estudo.

Agradeço à Universidade Federal de Uberlândia - UFU, aos professores Antônio e Álvaro, e aos acadêmicos do curso de Engenharia Florestal do Campus Monte Carmelo, por todo apoio e infraestrutura proporcionada durante o período prático deste estudo.

Gostaria de expressar meu sincero agradecimento à Fazenda Santa Bárbara, em nome de Juliana Rezende e Rafael Tomás (estendendo-se a todos os funcionários da fazenda), pela abertura e apoio excepcionais durante as pesquisas do café. Uma fazenda modelo com porteiras abertas e incentivo constante e apoio total para o sucesso da pesquisa, da ciência e da inovação. A colaboração da fazenda proporcionou um ambiente propício para a realização de estudos de alta qualidade, sendo um elemento crucial para os resultados alcançados.

Manifesto meu profundo agradecimento à EMATER-MG pelo apoio incondicional ao longo deste trabalho. O suporte oferecido foi fundamental para minha formação e qualificação, permitindo-me expandir conhecimentos e contribuir de forma significativa para o projeto. Esse apoio contínuo foi essencial para superar desafios e alcançar resultados expressivos.

Por fim, dedico este trabalho a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para minha jornada acadêmica e pessoal. Muito obrigado!

Sustentabilidade é garantir que as gerações futuras tenham o que precisamos hoje, sem destruir o que elas também precisarão amanhã.
Gro Harlem Brundtland

RESUMO

O café é um bem de consumo diário para milhares de pessoas ao redor do mundo, sendo parte integral de diversas culturas e classes sociais. Em 2024, a produção de café no estado de Minas Gerais, o maior produtor nacional, alcançou 28,1 milhões de sacas. O carbono, elemento químico abundante na natureza, desempenha um papel imprescindível na produção de café, que enfrenta desafios devido à mudança do clima, afetando sua produtividade e economia. Na região do Cerrado de Minas, a produção de café se destaca pela adoção de práticas sustentáveis que preservam e removem carbono da atmosfera, justificando a escolha da Fazenda Santa Bárbara como objeto de estudo. Está localizada em Monte Carmelo, MG/Brasil. O objetivo geral desta tese é estimar a remoção de carbono da atmosfera em áreas de cultivo de café (*Coffea arabica*) na região do Cerrado em Minas Gerais. No primeiro capítulo, é apresentada uma revisão bibliográfica no formato de relato de caso, com abordagem qualitativa e natureza exploratória, relatando o histórico da fazenda desde 1970. São destacadas as certificações conquistadas, prêmios e projetos voltados para a sustentabilidade na Fazenda Santa Bárbara. A região do Cerrado Mineiro é predominantemente cultivada com a espécie arábica em sistema de monocultura, devido à elevada altitude da região, variando entre 750 e 1000 metros. A variedade Mundo Novo é o objeto do estudo. O segundo capítulo é de natureza experimental, com o desenvolvimento de uma equação alométrica inédita para estimativa de estoque de carbono no cafezal. Para isso, foram abatidas 12 árvores de café (6 com 4 anos de idade e 6 com 6 anos de idade) e, em seguida, realizada a contagem individual das partes (raiz, caule, folhas) para obtenção dos valores de carbono e água. A análise estatística foi realizada utilizando-se o software R 4.2.2 com o modelo *Jackknife*. Três modelos apresentaram resultados confiáveis, com R^2 maior que 0,85, destacando-se a equação de dupla entrada com CAC10 (circunferência da altura do colo) e HT (altura total) como variáveis independentes (mais adequada). Os resultados mostraram que a massa seca corresponde a 46% da massa total fresca, sendo o teor médio de água igual a 54%; e o teor médio de carbono é de 43% da massa seca. Pode-se perceber que as remoções de CO_2 da atmosfera pelos pés de café da Fazenda Santa Bárbara foram suficientes para neutralizar as emissões de 255 a 394 brasileiros, considerando as estatísticas de população brasileira e emissões de CO_2 eq. per capita de 2020. Com uma idade média dos plantios de 5 anos, isso resulta em um incremento anual de 402.985 a 623.887 kg de CO_2 eq., neutralizando as emissões de 51 a 79 brasileiros anualmente. Ao apresentar essas estatísticas de emissões e remoções de CO_2 , é possível quantificar a resposta à reflexão: “quanto e para onde iria esse CO_2 e energia consumidos pelo plantio de café?” Embora os dados atuais forneçam uma base sólida para entender a relação entre o cultivo de café e a mitigação das emissões de CO_2 , são necessários mais estudos para uma compreensão mais profunda do comportamento do café em face da mudança climática.

Palavras-chave: Equações alométricas. Cafeicultura. Sequestro de carbono. Desenvolvimento sustentável.

ABSTRACT

Coffee is a daily commodity for thousands of people worldwide, being an integral part of various cultures and social classes. In 2024, coffee production in the state of Minas Gerais, the largest national producer, reached 28.1 million bags. Carbon, a chemical element abundant in nature, plays an essential role in coffee production, which faces challenges due to climate change, affecting its productivity and economy. In the Cerrado Mineiro region, coffee production stands out for adopting sustainable practices that preserve and remove carbon from the atmosphere, justifying the selection of Fazenda Santa Bárbara as the object of study. The farm is in Monte Carmelo, MG, Brazil. The main objective of the thesis is to estimate the removal of carbon from the atmosphere in coffee areas (*Coffea arabica*) in the Cerrado Mineiro and its contribution to sustainability. The first chapter presents a literature review in case report format, with a qualitative and exploratory approach, reporting the farm's history since 1970. The certifications achieved, awards, and projects aimed at sustainability at Fazenda Santa Bárbara are highlighted. The Cerrado Mineiro region is predominantly cultivated with the arabica species in a monoculture system due to the region's high altitude, ranging from 750 to 1000 meters. The Mundo Novo variety is the focus of the study. The second chapter is experimental, developing a novel allometric equation to estimate carbon stocks in coffee plantations. For this, 12 coffee trees were felled (6 at 4 years old and 6 at 6 years old), followed by the individual breakdown of parts (roots, stems, leaves) to obtain carbon and water content values. Statistical analysis was performed using R 4.2.2 software with the Jackknife model. Three models presented reliable results, with an R^2 greater than 0.85, highlighting the double-entry equation with CAC 10 and HT as independent variables (most suitable). The results showed that dry mass corresponds to 46% of the total fresh mass, with an average water content of 54%, and the average carbon content is 43% of the dry mass. It was observed that CO_2 removals from the atmosphere by coffee trees at Fazenda Santa Bárbara were sufficient to neutralize the emissions of 255 to 394 Brazilians, considering the 2020 statistics on Brazil's population and per capita CO_2 eq. emissions. An average planting age of 5 years results in an annual increment of 402,985 to 623,887 kg of CO_2 eq., neutralizing the emissions of 51 to 79 Brazilians annually. By presenting these CO_2 emissions and removal statistics, it is possible to quantify the answer to the reflection: "How much and where would this CO_2 and energy consumed by coffee planting go?" Although the current data provides a solid foundation for understanding the relationship between coffee cultivation and the mitigation of CO_2 emissions, further studies are needed for a deeper understanding of coffee behavior in the face of climate change.

Keywords: Allometric equations. Coffee cultivation. Carbon sequestration. Sustainable development.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01. Fazenda Santa Bárbara em relação à Monte Carmelo/MG/Brasil.	22
Figura 02. Idealizadores da Fazenda Santa Bárbara – Sr. José Tomas e Sra. Dinayr Tomas - foto tirada em 2020.	27
Figura 03. Fazenda Santa Bárbara, com lavoura de café arábica.	32
Figura 04. Evolução da produção de café ao longo dos anos (no novo gerenciamento).	33
Figura 05. (1) Foto enquanto residia em Araguaína/TO (1973). (2) Comemorações da família na Fazenda Santa Bárbara (1978).	34
Figura 06. 1- Atuais co-proprietários e gerenciadores da Fazenda Santa Bárbara. 2- Reunião familiar com os filhos e integrantes do grupo que gerencia a fazenda (2020).	35
Figura 07. Fluxograma pós-colheita e beneficiamento do café. 1 – Armazenamento do café (MonteCCer); 2 – embalagem do café Fazenda Santa Bárbara.	39
Figura 08. 1- Fermentação Anaeróbica sem <i>Saccharomyces</i> ; 2 - Secagem ao sol em terreiro de concreto; 3 - Fermentação aeróbica na floresta; 4 - Secagem em Vulcão; 5 - <i>African Bed</i> (Terreiro Suspenso); 6 Fermentação Anaeróbica com <i>Saccharomyces</i> .	41
Figura 09. Etapa dos diversos processos de controle de qualidade do café. 1- Classificação por Tipos de Defeitos; 2- Análise e classificação sensorial do café 3- Torra de lote específico; 4- Análise de bancada no laboratório de café.	42
Figura 10. 1 – Logomarca do território com Denominação de Origem do Cerrado Mineiro. 2- Produção de café com cuidado e qualidade na Fazenda Santa Bárbara.	42
Figura 11. 1 Prêmio Destaque Sustentável - Regional Emater/Uberlândia (2021); 2 – Prêmio ético & rastreável Expocafé (2021); 3 - Congresso Nacional Mulheres Agro-Bayer (2022); 4 – Troféu Mulher Inspiração da cafeicultura (2023); 5- Prêmio Fazenda Sustentável Globo Rural (2023); 6 - Prêmio Sebrae Mulher de Negócios (2023).	55
Figura 12. Foto do café da Fazenda na cerimônia durante a Coroação do Rei Charles na Embaixada no Brasil.	56
Figura 13. Conglomerado para inventário de biomassa de cafezal, com 4 unidades contendo 5 árvores de café cada.	75
Figura 14. Delimitação da área da Fazenda Santa Bárbara no município de Monte Carmelo/Minas Gerais.	77
Figura 15. Distribuição das cultivares – Fazenda Santa Bárbara.	79
Figura 16. Fase vegetativa – Expansão dos frutos.	80
Figura 17. Ilustração esquemática da separação dos compartimentos da árvore de café (parte acima e abaixo do solo).	81
Figura 18. Coleta das variáveis dendrométricas. (a) mensuração do diâmetro da copa, (b) mensuração da altura comercial e total e (c) contagem de nós.	82
Figura 19. (a) Abertura da trincheira para derrubada das árvores de cafés, (b) Processo de lavagem inicial.	83
Figura 20. (a) Remoção, separação e armazenamento dos compartimentos das árvores, (b) galhos e folhas do tronco, (c) Armazenamento de folhas, (d) armazenamento de fruto).	83
Figura 21. Pesagem dos compartimentos do café (a) galhos e (b) frutos.	84

Figura 22. Remoção do solo das raízes com auxílio de mangueira de água.	85
Figura 23. a) Equipe INPA e UFU na separação das raízes e b) Raiz de café ainda integral.	85
Figura 24. Etapas para obtenção de massa fresca e seca no laboratório de físico-química/UFU Monte Carmelo.	86
Figura 25. Análise Elementar (CHN), analisada no LMF – Manaus/AM.	87
Figura 26. Contribuição em porcentagem do tronco, galhos, folhas, raízes finas e grossas a biomassa fresca total dos cafés.	92

LISTA DE QUADROS

Quadro 01. Regras para obtenção da Denominação de Origem pela Região do Cerrado Mineiro.	45
Quadro 02. Certificações obtidas pela Fazenda Santa Bárbara	47
Quadro 03. Projetos desenvolvidos pela Fazenda Santa Bárbara voltados para a aplicação da sustentabilidade.	57
Quadro 04. Descrição da incerteza estimada com base na verossimilhança do resultado (probabilidades – Prob.)	96

LISTA DE MODELO/EQUAÇÕES

Equação 01. Intervalo de confiança	69
Equação 02. Modelo alométrico para biomassa (West et al., 1999)	72
Equação 03. Modelo de Brow, West e Enquist (Brown et al., 1989; West et al. 1999)	72
Equação 04. Coeficientes de regressão	74
Equação 05. Modelos selecionados para as estimativas	88
Equação 06. Modelos – Método <i>Jackknife</i>	88/96
Equações 07. Equações de carbono	99

LISTA DE TABELAS

Tabela 01. Estatísticas descritivas sobre biomassa total, circunferência e altura dos dados coletados (n = 12) de duas idades diferentes.	90
Tabela 02. Contribuição da porcentagem (%) do tronco, galhos, folhas, raízes finas e grossas a biomassa fresca total de uma planta de café (n = 12).	91
Tabela 03. Contribuição em porcentagem (%) do tronco, galhos, folhas, raízes finas e grossas a biomassa fresca total dos cafés com idade de quatro e seis anos.	92
Tabela 04. Modelos testados (equações alométricas)	94
Tabela 05. Dados da subamostra (n = 6)	96
Tabela 06. Equações utilizando n = 12 quando submetidas ao método “ <i>jackknife</i> ”	97
Tabela 07. Coeficientes de regressão, coeficiente de determinação, erro padrão de estimativa e limite de erro da subamostragem (n = 6) quando submetida ao “ <i>jackknife</i> ”.	97
Tabela 08. Teores de água de amostras de diferentes partes da planta (em %)	98
Tabela 09. Teores de carbono de amostras de cinco plantas de café – Resultados CNS.	98
Tabela 10. Estoques de carbono, CO ₂ e água da Fazenda Santa Bárbara.	100

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AFOLU – Agriculture, Forestry and Other Land Use
C - Carbono
CAC – circunferência a altura do colo
CAR – Cadastro Ambiental Rural
CECAFE – Conselho Dos Exportadores de Café do Brasil
CH₄ – Metano
CHN – Analisador Elementar
CO₂ – Gás carbônico
COB – Classificação Oficial Brasileira
CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento
COP 15 – Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas
CQI – *Coffee Quality Institute*
DAP – diâmetro a altura do peito
DO – Denominação de Origem
EMATER-MG – Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural do Estado de MG
FAEMG – Federação da Agricultura e Pecuária do estado de Minas Gerais
FAO – Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
GEE – Gases de efeito estufa
HT – Altura Total
IAF – índice de área foliar
IC – Índice de confiança
IMA – Instituto Mineiro de Agropecuária
INPA – Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
IPCC – Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas
IWCA – Aliança Internacional das Mulheres do Café
MDL – Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MONTECCER – Cooperativa dos Cafeicultores de Monte Carmelo
ODS – Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
ONU – Organização das Nações Unidas
PCI - Programa de Crédito Integrado e Incorporação dos Cerrados
POLOCENTRO – Programa de Desenvolvimento do Cerrado
REDD – Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação florestal
SCA – *Specialty Coffee Association*
SCAA – *Specialty Coffee Association of America*
SEAPA – Secretaria de Agricultura e Pecuária
SEEG - Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa
TEVAP – Tanque de evapotranspiração
UFG - Universidade Federal de Goiás
UFU – Universidade Federal de Uberlândia
UNDP – United Nations Development Programme
UNFCCC – Convenção-Quadro da Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas
WMO – World Meteorological Organization

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	19
CAPÍTULO 1. Empreendedorismo rural, inovação e sustentabilidade na produção de café no Cerrado Mineiro: o case da Fazenda Santa Bárbara.....	26
1.1 INTRODUÇÃO.....	26
1.2 MATERIAL E MÉTODOS	29
1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO E DISCUSSÃO.....	31
1.3.1 Características gerais da Fazenda Santa Bárbara.....	31
1.3.2 Histórico e trajetória da Fazenda Santa Bárbara.	33
1.3.3 Café da Região do Cerrado Mineiro	36
1.3.4 Produção de café e controle de qualidade.....	37
1.3.4.1 Produção de café	37
1.3.4.2 Tipos de secagem e processos do café.....	39
1.3.4.3 Controle de qualidade.....	41
1.3.5 Denominação de origem (DO)	44
1.3.6 Certificações.....	47
1.3.7 Premiações da Fazenda Santa Bárbara.....	52
1.3.8 Projetos e inovações empreendedoras realizadas pela gestão da fazenda.....	56
1.3.8.1 Eco Farm Santa Barbara Coffees.....	56
1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS	61
REFERÊNCIAS.....	62
Capítulo 2. Alometria para estimativa de biomassa total e de carbono do Café (Coffea arabica) sem processo de poda.....	66
2.1. INTRODUÇÃO	66
2.1.1 REVISÃO DA LITERATURA.....	68
2.1.1.1 Biomassa e carbono: contexto geral.....	68
2.1.2. Equações alométricas para estimar a biomassa de uma planta.....	70
2.1.3. Intensidade amostral para coletas destrutivas.....	73
2.1.3.1 Método “jackknife”	73
2.1.4. Tamanho e forma de parcelas para o inventário florestal.....	74
2.1.5 Biomassa de plantas de café.....	75
2.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	77
2.2.1 Caracterização da área de estudo e localização.....	77
2.2.2 Coleta de dados: biomassa	80
2.2.3 Biomassas.....	82
2.2.3.1 Biomassa acima do solo.....	82
2.2.3.2 Biomassa abaixo do solo (raízes)	84
2.2.4 Coleta de dados.....	85
2.2.4.1. Teor de água.....	85
2.2.4.2. Teor de Carbono.....	86
2.2.5 Análises estatísticas.....	87

2.2.5.1. Modelos testados.....	87
2.2.5.2. Aplicação do método <i>Jackknife</i>	89
2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	89
2.3.1 <i>Estatísticas descritivas do material coletado</i>	89
2.3.1.1 Biomassa total (parte aérea + raízes), Circunferência a Altura do Colo (a 10 cm do solo) e altura total (HT) das plantas coletadas das duas idades.....	89
2.3.1.2 Contribuição (%) de cada parte da planta (tronco, galhos, folhas, raízes finas e raízes grossas) à biomassa total considerando as duas idades de plantios.....	90
2.3.1.3 Contribuição (%) de cada parte da planta (tronco, galhos, folhas, raízes finas e raízes grossas) à biomassa total, por idade.....	92
2.3.2 <i>Equações alométricas testadas e desenvolvidas</i>	94
2.3.3 <i>Teste de normalidade</i>	95
2.3.4. <i>Aplicação do método “jackknife”</i>	96
2.3.5. <i>Teores de água e de carbono nas plantas de café</i>	98
2.3.6. Equações de carbono.....	99
2.3.7 <i>Estoques de carbono e água</i>	99
2.4 CONCLUSÕES.....	101
REFERÊNCIAS.....	102
CONSIDERAÇÕES FINAIS	108
REFERÊNCIAS	110
APÊNDICE 1	113
APÊNDICE 2	114
APÊNDICE 3	122

1 INTRODUÇÃO GERAL

O café está presente nos costumes diários de milhares de pessoas em todo o planeta, figurando como bem de consumo quase obrigatório entre as mais variadas culturas, classes sociais e localidades. Simbolizando quicá o mais universal dos hábitos, a bebida que mexe com o paladar de boa parte da população, estimula também uma economia complexa no seu setor, com negócios que vão desde o popular produto em pó vendido em mercados, a variedades exóticas de preços elevados tidas como “gourmet” ou “especial”, até redes globais de cafeterias, conferindo requinte à bebida por todo mundo (Guaraldo, Oliveira e Coleti, 2018).

Em 2023, o Brasil produziu aproximadamente 55,1 milhões de sacas de café, abrangendo tanto as variedades arábica quanto o conilon. Segundo dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2023), o Brasil segue sendo o maior produtor e exportador mundial de café, exercendo um papel fundamental no mercado global. No entanto, a safra brasileira de café em 2024 registrou uma redução de 1,6%, totalizando 54,2 milhões de sacas de café beneficiadas, em comparação com a safra anterior (CONAB, 2024).

Em 2024, a produção de café no estado de Minas Gerais, o maior produtor nacional, alcançou 28,1 milhões de sacas, o que representa uma queda de 3,1% em relação ao volume da safra anterior. Esse declínio pode ser atribuído às condições climáticas adversas, com destaque para a ocorrência de estiagens prolongadas e temperaturas elevadas, que afetaram de maneira significativa as fases críticas de desenvolvimento da cultura, comprometendo seu potencial produtivo (CONAB, 2024).

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Unidade Embrapa Café (EMBRAPA CAFÉ, 2022), destaca que a atividade cafeeira é uma importante fonte de emprego e renda para as comunidades rurais, com destaque para a região do Cerrado Mineiro, contribuindo para o desenvolvimento regional e a melhoria das condições de vida da população. Estima-se que a cafeicultura gere cerca de 200 mil empregos diretos e indiretos no Cerrado Mineiro, sendo uma atividade que impulsiona a economia local. A cafeicultura também promove a integração social, através da formação de cooperativas e associações de produtores, que permitem a troca de conhecimento e a implementação de práticas sustentáveis.

A Região do Cerrado Mineiro, a qual o município de Monte Carmelo faz parte, é referência em práticas sustentáveis de produção de café, mas também de qualidade do produto final (Itatiaia, 2024). Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU) são uma referência importante nesse contexto (UNDP,

2023). A região tem adotado práticas que visam conciliar o crescimento econômico com a preservação ambiental. Através de iniciativas como o manejo sustentável do solo, o uso eficiente dos recursos hídricos, a proteção da biodiversidade e a mitigação dos gases de efeito estufa (GEE's) (objetivo 13 dos ODS), a agricultura sustentável tem se consolidado no Cerrado Mineiro (EMBRAPA CAFÉ, 2022).

No entanto, estudos como o de Silva et al. (2013), apontam a cultura do café como uma das mais vulneráveis aos impactos da mudança do clima. Avaliar os riscos e oportunidades desta cultura no contexto da atual crise climática mostra-se fundamental para a competitividade desse produto, nos médio e longo prazos, e da economia nacional como um todo. A resiliência climática dos cultivos agrícolas depende da implementação de práticas produtivas mais sustentáveis.

Com sua capacidade fotossintética, as plantas clorofiladas, incluindo as lavouras de café, tornaram-se aliadas na captação de gases de efeito estufa. Além disso, a preservação de áreas naturais e a adoção de práticas agrícolas sustentáveis na cafeicultura, como a agrofloresta e a conservação do solo, aumentam ainda mais a capacidade de captura de carbono das plantas, contribuindo para a mitigação da mudança climática e a conservação da biodiversidade (Barbosa et al., 2013).

O carbono é um elemento químico que pode ser encontrado abundantemente na natureza, assim como outros elementos presentes na tabela periódica. Ele possui formas diferentes, sendo o diamante a forma mais pura e o grafite uma forma próxima da pureza. Além disso, o carbono pode se combinar com outros elementos químicos para formar uma emissão composta (Higuchi et al., 2022).

A mudança do clima desencadeada pelo aquecimento global ocasiona a vulnerabilidade dos ecossistemas e impactam de forma vigorosa e negativa os ambientes naturais e os sistemas agropecuários. Adicionalmente, há o risco de agravarem-se os efeitos prejudiciais da mudança do clima “em ambiente tropical, com conseqüente impacto econômico de redução da produtividade em culturas e rebanhos, além do impacto ambiental, resultando potencialmente em efeitos negativos ou mesmo em perda na biodiversidade” (Mozzer et al., 2022, p. 2).

Em contrapartida, a mudança climática, geralmente associada a impactos negativos, pode, em algumas regiões, apresentar efeitos positivos, especialmente no contexto agrícola. Em áreas tradicionalmente secas, o aumento da precipitação devido a mudança climática pode resultar em maior disponibilidade de água, essencial para a agricultura. Por exemplo, um estudo indicou que, no noroeste semiárido da Índia e do Paquistão, a precipitação média aumentou de

10% a 50% entre 1901 e 2015, e espera-se que aumente de 50% a 200% sob cenários moderados de gases de efeito estufa (Rajesh e Goswami, 2022).

O Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG, 2023), com dados e informações de 2022, relata que as emissões por desmatamento e outras mudanças de uso da terra mais as emissões do setor agropecuário - que juntas referem-se à atividade agropecuária -, respondem por 75% de toda a poluição climática brasileira. Nesse sentido, estudos realizados por Assad et al. (2004) e Assad e Pinto (2008) apontam um cenário de riscos para a produção agrícola brasileira, caso não sejam tomadas medidas mitigadoras para reduzir o aquecimento global. Dentre as várias culturas elencadas pelos autores, chama atenção os potenciais prejuízos à produção do café arábica, inclusive com a impossibilidade de sua permanência na região Sudeste do Brasil, com uma possível migração para a região Sul do país.

Contudo, apesar de o cenário adverso, estudos realizados pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz em Piracicaba (Esalq), sob orientação do Professor Carlos Eduardo Pellegrino Cerri ressaltam o potencial da agricultura, caso seja praticada de forma sustentável, como uma aliada no combate ao aquecimento global, apontado como um dos principais fatores da mudança climática (Santos, 2024, s/p). Para ele, “a remoção do carbono pode ser intermediada naturalmente pelas plantas, por meio da fotossíntese”. E vai além, visto a utilidade da “planta como alimento para animais, para as pessoas, para o biocombustível e, quando o carbono do tecido vegetal sofre decomposição por microrganismos no solo e se estabiliza, pode ficar ali por séculos” (Santos, 2024, s/p).

O desenvolvimento sustentável tem se tornado uma prioridade global à medida que os desafios ambientais e socioeconômicos se intensificam. No setor agrícola, a adoção de práticas sustentáveis é fundamental para alcançar esses objetivos. Uma abordagem promissora é a agricultura sustentável, que visa garantir a produção de alimentos de forma ambientalmente responsável, socialmente justa e economicamente viável (FAO, 2023). Nesse contexto, os cafezais do Cerrado Mineiro se destacam como agentes importantes na remoção de carbono atmosférico diuturnamente.

Na região do Cerrado Mineiro, a produção de café tem se destacado pela busca de práticas que promovem a neutralidade e a negatividade de carbono, motivo esse para a escolha da Fazenda Santa Bárbara, localizada na cidade de Monte Carmelo, Minas Gerais. Estes conceitos referem-se à compensação das emissões de gases de efeito estufa (GEE) geradas durante a produção, por meio de ações que reduzem ou removem uma quantidade equivalente de carbono da atmosfera, resultando em um balanço de emissões zero (IPCC, 2014). A busca

pela neutralidade de carbono é uma abordagem eficaz para mitigar os impactos ambientais da produção agrícola, enquanto a negatividade de carbono vai além, buscando remover mais carbono da atmosfera do que o produzido (Houghton, 2003).

A Fazenda Santa Bárbara, objeto do estudo, é localizada em Monte Carmelo/MG (Figura 01), no Bioma do Cerrado Mineiro, está a 15 km da área urbana, nas coordenadas 18°47'17.09"S e 47°33'45.72"O, com uma altitude média de 940 metros. A região possui clima Aw, com invernos secos e temperaturas médias abaixo de 26°C (maio e julho) e verões quentes e chuvosos, com máximas diárias acima de 31°C (setembro a novembro). A precipitação ocorre principalmente entre outubro e abril, sendo mais intensa em dezembro (Gouveia, 2023). Os solos são predominantemente Latossolo Vermelho distroférrico, com baixa fertilidade natural (CECAFE, 2023).

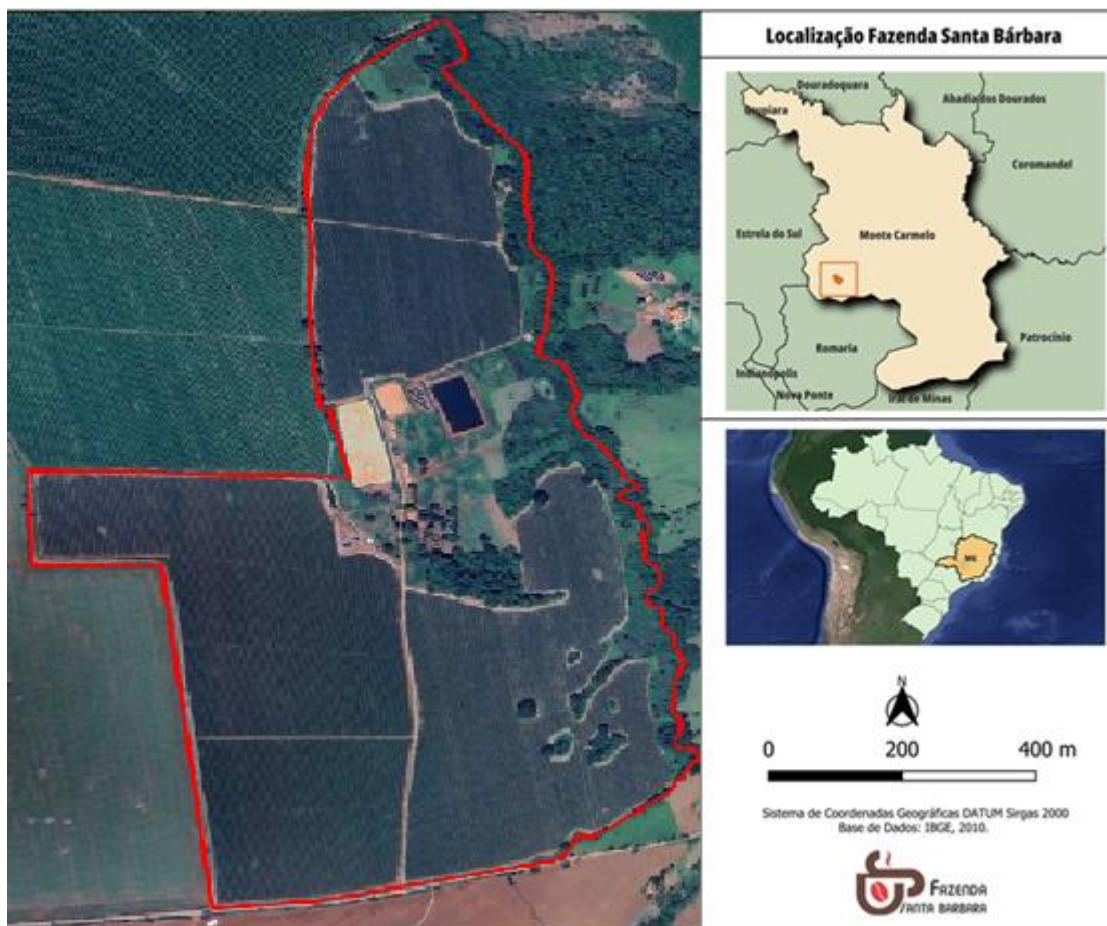


Figura 01. Fazenda Santa Bárbara em relação à Monte Carmelo/MG/Brasil.
Fonte: Software QGis – Versão 3.24 (2024) /próprio autor.

A Fazenda Santa Bárbara, com 88,97 hectares, dedica 63,96 hectares ao cultivo de café e se destaca na produção de cafés especiais. Ao longo do tempo, implementou diversas

iniciativas sustentáveis para alcançar o carbono neutro e/ou negativo, incluindo os projetos *Love Bee*, que promove a biodiversidade e melhora a polinização das abelhas nas flores do cafezal, e o projeto *Glifosato Free*, que elimina o uso de herbicidas na lavoura. Além disso, o *Jungle Friends* incentiva a preservação de áreas naturais ao redor das plantações e promove o incentivo para os animais característicos do Cerrado. A Fazenda também se comprometeu com a Expedição Carbono, visando obter certificação de carbono neutro/negativo, agregando valor ao produto final e possibilitando a comercialização de créditos de carbono, um mercado que permite a compensação das emissões através da compra de créditos que financiam projetos de redução de carbono (WMO, 2021).

A pesquisa de Priscila Coltri e colaboradores (2015) avançou na quantificação da contribuição dos sistemas cafeeiros para o incremento da remoção de carbono acima do solo. No estudo intitulado "*Empirical models to predict LAI and aboveground biomass of Coffea arabica under full sun and shaded plantation: a case study of South of Minas Gerais, Brazil*", os autores desenvolveram modelos empíricos para prever o índice de área foliar (IAF) e a biomassa aérea de *Coffea arabica* em plantações a pleno sol e sombreadas. Essa abordagem destacou a importância da cobertura vegetal e do manejo agroflorestal para a remoção de carbono, especialmente considerando as variações microclimáticas e as condições edafoclimáticas específicas do Sul de Minas Gerais.

No entanto, para obter uma compreensão mais abrangente do papel das lavouras de café na mitigação da mudança do clima, é essencial considerar toda a biomassa da planta, incluindo as raízes finas e grossas. O trabalho desenvolvido na Fazenda Santa Bárbara exemplifica esse avanço, avaliando a biomassa total das árvores de café, tanto acima quanto abaixo do solo. Ao incluir as raízes, é possível obter estimativas mais precisas do estoque de carbono e das interações entre o sistema radicular e a atmosfera, oferecendo uma visão mais completa das contribuições dos sistemas cafeeiros e proporcionar dados críticos para políticas de manejo sustentável e mitigação de gases de efeito estufa (GEE) (Coltri et al., 2015).

Atualmente, não existem equações alométricas específicas para a cafeicultura no Cerrado Mineiro, o que limita a estimativa precisa do carbono estocado. O diferencial desta pesquisa está na abordagem inédita de avaliar toda a planta do café, considerando sua biomassa completa e a variabilidade de diferentes idades, permitindo uma quantificação mais precisa do estoque de carbono, um aspecto ainda pouco explorado na cafeicultura. Para preencher essa lacuna, os estudos conduzidos na Fazenda Santa Bárbara empregam métodos avançados e inovadores de coleta e análise de dados, fundamentais para o desenvolvimento de equações

alométricas mais precisas. Entre esses métodos, destacam-se a derrubada da planta, a pesagem de seus diferentes componentes, a secagem das amostras, análises laboratoriais para determinação do teor de carbono e a utilização da técnica estatística “*jackknife*”. Essas práticas garantem dados robustos e confiáveis, alimentam modelos preditivos e orientam estratégias de manejo sustentável, reforçando o papel da cafeicultura na mitigação da mudança do clima. Dessa forma, enquanto os modelos empíricos desenvolvidos por Coltri e colaboradores (2015) e Coltri (2012) são fundamentais para entender a contribuição do estoque de carbono acima do solo, a pesquisa na Fazenda Santa Bárbara amplia esse conhecimento ao incluir a biomassa radicular. Isso proporciona uma visão mais completa e detalhada das dinâmicas de remoção de carbono em sistemas cafeeiros, ressaltando a importância de estudos integrados que considerem todas as partes da planta para uma compreensão precisa e holística do impacto positivo das plantações de café na mudança climática.

A hipótese desta pesquisa é que a cafeicultura atua como um sumidouro de carbono, desempenhando um papel relevante na retenção de carbono e na mitigação da mudança do clima. Esse potencial se dá pela remoção de carbono na biomassa, o que pode ser quantificado por meio do cálculo do estoque de carbono na cultura do café. Dessa forma, evidencia-se a contribuição da cafeicultura para a sustentabilidade ambiental e a preservação dos recursos naturais para as futuras gerações.

Para alcançar essa hipótese, a presente pesquisa evidencia que a cafeicultura, ao contrário da percepção comum, não compromete o meio ambiente. Pelo contrário, práticas de manejo sustentável no cultivo do café desempenham um papel veemente na conservação ambiental. O cultivo do café é um excelente exemplo de como a agricultura regenerativa e sustentável pode contribuir positivamente para o meio ambiente, resultando na captura de carbono e na manutenção dos ciclos naturais.

Esta tese visa responder o objetivo geral, qual seja, o de estimar a remoção de carbono da atmosfera em áreas de café (*Coffea arabica*) na região do Cerrado do Estado de Minas Gerais destacando sua contribuição para a promoção da sustentabilidade ambiental. Para tanto, cada capítulo visa responder aos objetivos específicos são: a) identificar as inovações aplicadas à produção do café na região do Cerrado Mineiro, a sustentabilidade adquirida e a agregação de valor no produto final a partir do case da Fazenda Santa Bárbara, localizada em Monte Carmelo/MG; b) estimar os estoques de biomassa, determinar os teores de carbono nas árvores de café em duas diferentes idades e definir uma equação alométrica específica para o café (*Coffea arabica*).

A tese foi estruturada em capítulos com potencial formato de artigos para submissão e publicação; cada capítulo aborda diferentes aspectos: um estudo de caso da Fazenda Santa Bárbara e a quantificação de carbono na biomassa do cafeeiro. O primeiro capítulo adota uma abordagem multimétodos ou qualiquantitativa e se concentra na premissa do empreendedorismo empregado no desenvolvimento das atividades e nas certificações alcançadas pela fazenda, nos projetos desenvolvidos e em todo o histórico desde a década de 1970 até a atualidade. Tem-se um levantamento detalhado das certificações obtidas pela fazenda, como o Certifica Minas Café, e dos diversos projetos sustentáveis implementados ao longo dos anos. Inclui também uma análise do contexto histórico da fazenda, evidenciando a evolução das práticas e políticas ambientais adotadas. Para isso, foram utilizados métodos de observação direta, entrevistas com os responsáveis pela gestão da fazenda e a análise de dados secundários relacionados às certificações e projetos.

O segundo capítulo é de natureza experimental, com o objetivo principal de estimar a quantidade de carbono estocado no pé de café e criar uma equação alométrica específica. Neste capítulo, foram realizadas amostragens destrutivas para avaliar o teor de carbono na biomassa das plantas. A criação da equação alométrica específica permitirá uma estimativa mais precisa da quantidade de carbono estocado, contribuindo para a validação das práticas de manejo sustentável e para a melhoria das estratégias de mitigação da mudança climática na cafeicultura.

Espera-se quantificar a capacidade de carbono estocado, além de mostrar práticas sustentáveis, com ênfase na agricultura regenerativa que auxiliam na obtenção de certificações como as da fazenda Santa Bárbara. Os resultados esperados visam promover a sustentabilidade no setor cafeeiro, fornecendo informações técnicas e científicas capazes de ajudar os produtores na transição para práticas mais sustentáveis e fortalecer a contribuição da cafeicultura para a mitigação da mudança climática.

CAPÍTULO 1. Empreendedorismo rural, inovação e sustentabilidade na produção de café no Cerrado Mineiro: o caso da Fazenda Santa Bárbara

1.1 INTRODUÇÃO

A produção e o consumo de café estão conectados com a história, a cultura e a política brasileira. Na década de 1880, o café tornou-se a principal economia de exportação do país. Surge uma nova classe dirigente com poderes econômicos, culturais e políticos, os quais impulsionaram a industrialização brasileira, a criação de instituições financeiras e a inserção do Brasil nas relações internacionais do comércio (Roth, 2019).

Desde os primeiros anos do século XX, no interior de Minas Gerais, a atividade agropecuária tem desempenhado um papel central na economia do Triângulo Mineiro. Contudo, foi especialmente a partir da década de 1960 e, principalmente, nos anos 1970, que a região passou por uma significativa revitalização socioeconômica. Isso ocorreu concomitantemente à expansão da ocupação do Cerrado brasileiro e à implementação de programas e iniciativas governamentais destinadas a consolidar uma agropecuária moderna (Gomes, 2022).

No entanto, é importante contextualizar que essas iniciativas estão inseridas em um panorama mais amplo de modernização do setor agropecuário, em andamento em todo o país desde meados de 1960, principalmente sob a liderança do Estado. Na fase inicial desse processo, houve a disseminação das tecnologias associadas à "Revolução Verde" e projetos governamentais voltados para o fortalecimento do setor (nas áreas financeira, infraestrutura, pesquisa, colonização, entre outras). Esse novo modelo de agricultura emergiu no Brasil, impulsionando a produção de determinadas culturas e viabilizando a exploração ou consolidação de novas fronteiras na expansão agrícola moderna (Frederico, 2013; Gomes, 2022), como foi o caso do Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba.

Trazendo para o *locus* de estudo, Monte Carmelo¹-MG, cidade pertencente à mesorregião do Triângulo Mineiro e Alto Paranaíba, recebeu os investimentos do Estado, dentre eles o Programa de Desenvolvimento do Cerrado (POLOCENTRO) e o Programa de Crédito

¹ Monte Carmelo tornava-se um novo Eldorado, atraindo grande fluxo migratório e provocando grandes transformações econômicas. Até o ano de 1972, a agropecuária era desenvolvida sem os recursos técnicos, consistindo numa economia de subsistência. A vinda de produtores procedentes do Sul do país com o conhecimento tecnológico, propiciou uma nova fase do plantio do café, soja e trigo. A malha rodoviária asfáltica surge, facilitando o trânsito de safra e bens de consumo e impulsionando o comércio. Segundo dados apresentados pela cooperativa de cafeicultores Guaxupé Ltda., nos anos 1980 o café respondia por 40% dos recursos financeiros; a cerâmica por cerca de 45% e o restante ficava por conta do comércio (Souza, 2020).

Integrado e Incorporação dos Cerrados (PCI), onde extensas áreas de plantação de café foram cultivadas (Gomes, 2022).

Neste contexto, da década de 1970, começa a história da Fazenda Santa Bárbara, quando o senhor José Tomas de Oliveira (*in memorian*), juntamente com sua esposa Dinayr Tomas (*in memorian*) (Figura 02), mudaram-se de Araguaina/TO para Monte Carmelo/MG e iniciaram a atividade da cafeicultura (Fazenda, 2023).



Figura 02. Idealizadores da Fazenda Santa Bárbara – Sr. José Tomas e Sra. Dinayr Tomas - foto tirada em 2020.
Fonte: Acervo da família.

Entre 1970 e 1980, a Fazenda Santa Bárbara se dedicou à produção de café convencional, cultivando a variedade Mundo Novo. Nesse período, a abordagem envolvia o uso limitado de tecnologias avançadas. Contudo, é essencial salientar que o café convencional se destaca como um dos alimentos mais intensamente submetidos a tratamentos químicos em escala global. Esse tipo de produção de café é frequentemente enriquecido com a aplicação de fertilizantes sintéticos, ficando suscetível a uma diversidade de substâncias químicas, incluindo herbicidas, fungicidas, inseticidas, entre outras. Os suportes econômicos e tecnológicos fornecidos pelo Estado tornaram a cafeicultura uma atividade mais complexa e dinâmica (Fazenda, 2023; CCCMG, 2023).

A partir da década de 1980, as flutuações nos preços da saca de café, influenciadas pelas condições do mercado internacional, exerceram um impacto negativo significativo, levando o Senhor José Tomas a realizar uma transformação substancial na utilização de sua propriedade. Nesse contexto, houve uma transição notável da produção de café para a adoção da bovinocultura e cereais, englobando tanto a produção de carne quanto de leite. Essa mudança estratégica reflete a adaptabilidade e resiliência necessárias diante das variabilidades

econômicas e destaca a capacidade de gestão do Senhor José Tomas diante dos desafios do cenário agrícola e mercadológico (Fazenda, 2023).

Nesse meio tempo, das décadas de 1990 e anos 2000, a Fazenda Santa Bárbara enfrentou desafios consideráveis devido às flutuações econômicas. A transição entre o café e a bovinocultura, além de evidenciar a adaptabilidade da fazenda às dinâmicas do mercado, revelou uma visão empreendedora e um cuidado estratégico com a sustentabilidade do negócio. As escolhas feitas durante esse período não apenas preservaram a fazenda, mas também estabeleceram a base para enfrentar os desafios e aproveitar as oportunidades que surgiram a partir dos anos 2000, consolidando práticas agrícolas alinhadas às demandas contemporâneas (Fazenda, 2023).

De acordo com o histórico da propriedade, em 2015, a Fazenda Santa Bárbara passou pela transição geracional com a entrada de Rafael Ramos Tomas, filho do proprietário, e sua esposa, Juliana Rezende Mello, farmacêutica de formação que assumiu a gestão das atividades. Essa sucessão familiar marcou uma fase importante na história da fazenda, já que o Sr. José Tomas, em idade avançada, desejava um merecido descanso (Fazenda, 2023). A transição das responsabilidades para a próxima geração não apenas assegurou a continuidade das tradições familiares, mas também introduziu novas perspectivas e abordagens na condução das atividades agrícolas da propriedade, vez que os novos gestores resolveram retomar a produção de café na fazenda. A partir de então, Juliana Rezende, iniciou uma busca incessante de conhecimentos que alicerçaram uma produção qualificada e a melhora na produtividade da fazenda, com a realização de vários cursos por todo Brasil.

Dentre as práticas diferenciadas da fazenda encontra-se a junção da tecnologia e da informação para o manejo de pragas sem a utilização de defensivos, instalação do sistema de irrigação por gotejamento, recuperação das nascentes, captação de água da chuva, dentre outros. A propriedade conta com um laboratório de controle de qualidade para análise de cada lote de grãos. Atualmente a fazenda possui as seguintes certificações: *UTZ Certified*, *Certifica Minas Café*, *Rainforest Alliance Certified* e *Nespresso A.A.A* (Fazenda, 2023).

A Fazenda Santa Bárbara destaca-se por várias premiações recebidas, fruto do reconhecimento como fazenda modelo no agronegócio sustentável, eficiente e de qualidade, daí uma das justificativas por sua escolha para ser a unidade modelo desta pesquisa. Destaca-se como informações essenciais sobre a sustentabilidade, o registro no Cadastro Ambiental Rural (CAR), a situação trabalhista dos funcionários e o uso de técnicas de manejo de baixo impacto ambiental, todos esses quesitos foram validados pelas certificações conquistadas (*Rainforest*

Alliance, 2023). Existe uma estrutura administrativa cuidadosamente organizada que abrange aspectos como a quantidade precisa de insumos aplicados em cada cultivo e o volume de água utilizado nas lavouras. Além disso, questões sociais, como o perfil dos colaboradores e a inclusão, também são foco na fazenda.

Juliana Rezende, proprietária da Fazenda, apresenta um perfil empreendedor que se assemelha à combinação das definições de Joseph Schumpeter (1949) e de Kirzner (1973), citados por Dornelas (2018, p. 29), os quais afirmaram enfaticamente que, a pessoa que empreende é uma exímia identificadora de oportunidades, curiosa e atenta “às informações, pois sabe que suas chances melhoram quando seu conhecimento aumenta”.

A empresária detém uma capacidade de gestão qualificada, que aliada ao emprego de práticas agrícolas sustentáveis, primam pela preservação do meio ambiente. Além disso, adota técnicas inovadoras no cultivo e no processamento do café, visando sempre melhorar a qualidade do produto. Sua gestão eficiente equilibra aspectos financeiros, sociais e ambientais, investindo no desenvolvimento de sua equipe e agregando valor ao café por meio da rastreabilidade e da diferenciação no mercado.

Mais especificamente, Juliana pratica o empreendedorismo corporativo, a partir da inovação dentro do negócio da família (Dornelas, 2018, p. 29). Mas ressalta-se também, as características presentes de um negócio de impacto socioambiental, com ações práticas em relação às questões ambientais, sociais, mas também econômicas, vez que o negócio visa equilibrar objetivos financeiros com metas socioambientais de forma perene.

Dessa forma, este estudo tem como objetivo contextualizar o caso da Fazenda Santa Bárbara, localizada em Monte Carmelo/MG, a partir de sua trajetória de sucesso. Buscou-se identificar as inovações implementadas na produção de café na região do Cerrado Mineiro, com destaque às práticas sustentáveis adotadas e a valorização agregada ao produto. Ao fazer isso, a propriedade se destaca por oferecer uma experiência genuinamente única aos “amantes” de café.

1.2 MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho é uma pesquisa de abordagem qualiquantitativa, de natureza exploratória. Essa abordagem possibilita uma compreensão mais rica e contextualizada, vez que busca desenvolver, esclarecer e apresentar conceitos e ideias, que proporcionam um aprimoramento do tema para uma investigação mais aprofundada e rigorosa (Gil, 2008).

Para contextualizar toda a trajetória da fazenda, foi realizada uma revisão bibliográfica abrangente em periódicos acadêmicos, utilizando as bases de dados *Web of Science*, *Science Direct*, *Dedalus* e Portal de Periódicos da Capes, abrangendo publicações no período de 2013 a 2023. Foram consultados livros e circulares técnicas relacionados ao tema de gestão de propriedades rurais, sustentabilidade e produção de café arábica, com foco no estudo de caso da fazenda Santa Bárbara. As palavras-chave de busca foram "*Coffea arabica*", "sustentabilidade", "conservação dos recursos naturais", "empreendedorismo rural" e "Região do Cerrado Mineiro" em inglês e português, permitindo uma abordagem abrangente e fundamentada sobre o tema proposto.

Realizou-se um estudo de caso, a partir da compreensão das interações, significados e comportamentos humanos reais que moldam as configurações organizacionais da vida cotidiana (Gephart, 2004). Foram pesquisados os documentos oficiais físicos e digitais da propriedade com o propósito de conhecer o ambiente cafeeiro e descrever as principais formas de manejos realizados na cultura do café, suas formas de colaboração com os princípios da sustentabilidade e da conservação ambiental, juntamente com os impactos gerados pelas certificações na gestão e nos processos da Fazenda Santa Bárbara. O levantamento de dados foi realizado no período de 24 meses, entre novembro de 2021 e novembro de 2023.

Utilizou-se múltiplas fontes de evidência para a análise, incluindo a leitura de mais de 15 documentos internos, o portfólio virtual disponível no aplicativo Instagram da Fazenda (@faz_santa_barbara_cafes), o site da Fazenda Santa Bárbara, pesquisas em websites com informações, entrevistas e divulgações sobre a propriedade, anotações das entrevistas com a proprietária, arquivos históricos da fazenda e observações diretas realizadas pelo pesquisador. Essas informações foram organizadas em quatro categorias principais: (1) Histórico e Trajetória da Fazenda, abrangendo eventos marcantes e mudanças ao longo do tempo; (2) Certificações e Reconhecimentos, detalhando os selos, prêmios e certificações obtidos; (3) Iniciativas Sustentáveis, com foco em práticas agroflorestais e contribuições ambientais; e (4) Produção e Inovação, incluindo técnicas de cultivo e diversificação da produção.

A análise do sistema de produção, das certificações e premiações recebidas pela fazenda permitiu avaliar o grau de sustentabilidade ambiental, econômica e sociopolítica da propriedade, os diversos manejos agroecológicos realizados no local e o impacto que esta propriedade cafeeira exerce na organização social do município de Monte Carmelo–MG. Utilizou-se as certificações como parâmetro, como as certificações *Rainforest Alliance*, UTZ, Certifica Minas Café e AAA, que possuem critérios que podem ser usados como escala

qualitativa para medir a sustentabilidade. Além das certificações, observou-se o impacto real no território, considerando práticas agroecológicas, inclusão social e conservação ambiental. A análise de dados foi realizada por meio da estatística descritiva, vez que se buscou retratar comportamentos e tendências a partir de fenômenos reais, mas também a análise de conteúdo e análise narrativa.

1.3 CONTEXTUALIZAÇÃO E DISCUSSÃO

1.3.1 Características gerais da Fazenda Santa Bárbara

A Fazenda Santa Bárbara, objeto de estudo do presente artigo, situa-se no município de Monte Carmelo/MG, inserida no Bioma Cerrado, a 15 km da zona urbana, nas coordenadas 18°47'17.09"S e 47°33'45.72"O, a uma altitude média de 940 metros. De acordo com a classificação de Koppen-Geiger, o clima da região é Aw, com inverno de temperaturas mais baixas e períodos de seca (maio e julho com máxima diária em média abaixo de 26 °C, junho com a máxima de 25°C e mínima de 15 °C, em média), e verão com altas temperaturas e alta precipitação (de setembro a novembro com máxima média diária acima de 31 °C). A precipitação pluviométrica teve concentração entre o período de outubro a abril, com maior distribuição de chuva no mês de dezembro (Gouveia, 2023). Os solos possuem características das regiões tropicais, muito intemperizadas e baixa fertilidade natural. Há maior ocorrência de solos Latossolo Vermelho distroférico de textura argilosa (CECAFE, 2023).

A Fazenda possui uma área total de 88,97 hectares, sendo 63,96 hectares destinados ao cultivo de café (Figura 03), a qual destaca-se como um verdadeiro bastião na produção de cafés especiais.

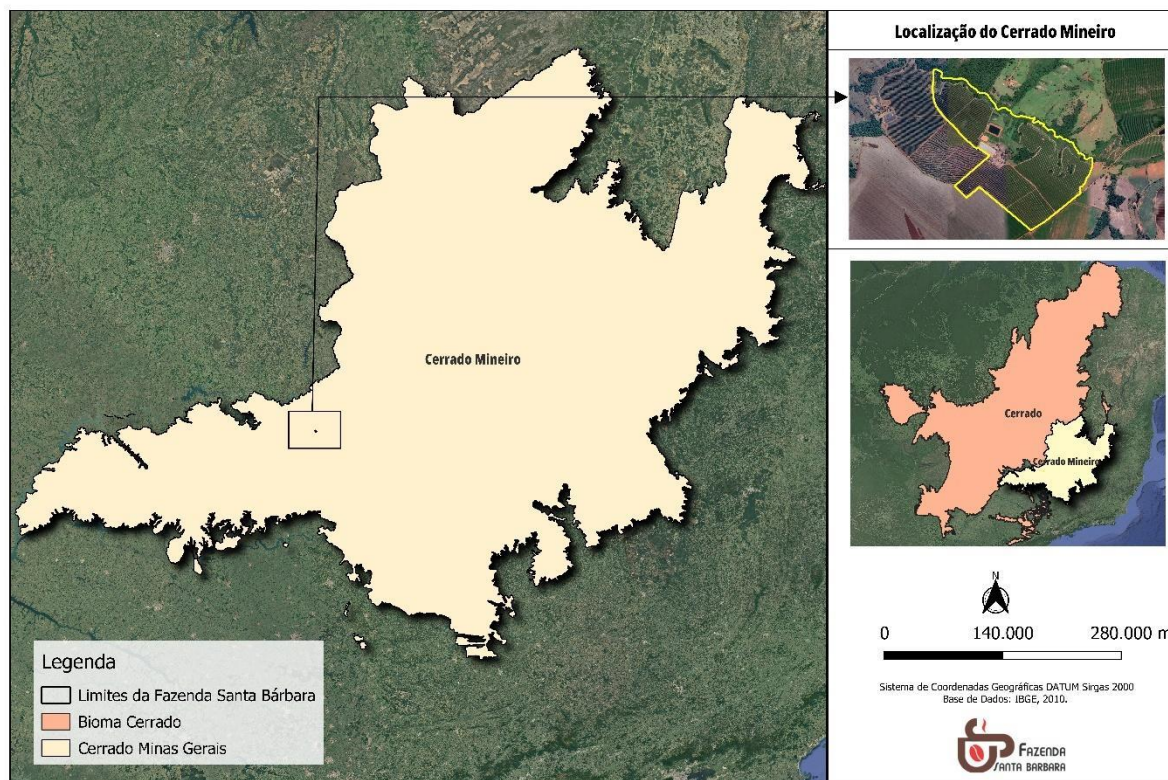


Figura 03. Fazenda Santa Bárbara, com lavoura de café arábica.

Fonte: Software QGis – Versão 3.24 (2024) /próprio autor.

Com uma notável capacidade produtiva de qualidade e excelência, a Fazenda Santa Bárbara tem potencial para uma produção anual de até 4.000 sacas de café de 60 kg (Figura 04). No biênio 2022/2023, a média de produção foi de 3.400 sacas, segundo a proprietária Juliana Rezende (Figura 04), que conta com assistência técnica agrônômica integralmente na fazenda, tanto de forma particular quanto por meio da Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural de Minas Gerais (EMATER-MG). Este suporte tem sido fundamental para garantir a consistência e a alta qualidade dos grãos cultivados, refletindo diretamente no sucesso da produção. Embora a fazenda seja considerada uma pequena produtora, existem outros produtores de grande porte no município de Monte Carmelo, com produções bem maiores, alcançando cifras superiores a 10.000 sacas (MonteCCer, 2024). No entanto, a Fazenda Santa Bárbara se destaca pela extrema qualidade de seus grãos, consolidando-se como um exemplo de excelência dentro do setor.

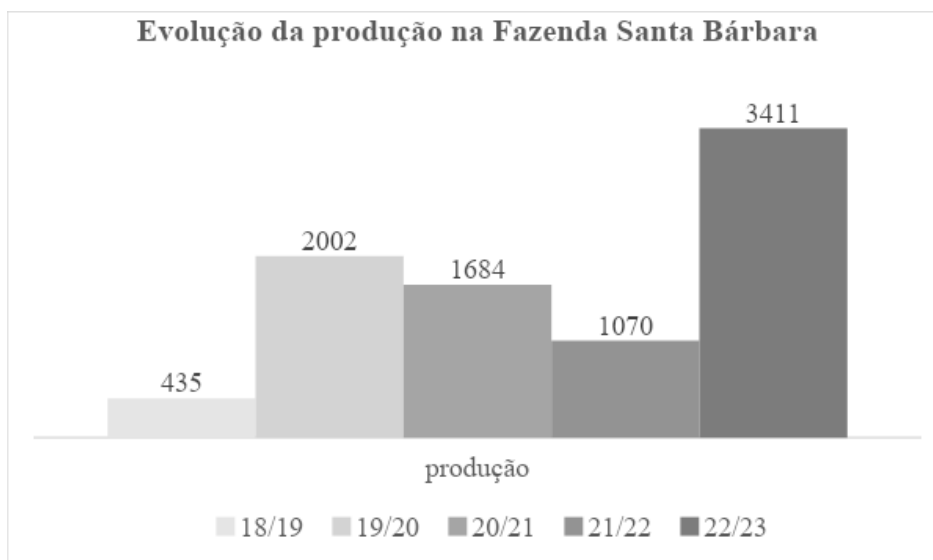


Figura 04. Evolução da produção de café ao longo dos anos (no novo gerenciamento).
Fonte: Santa Barbara Coffee, 2023.

A propriedade agrícola está empenhada no cultivo de diversas variedades de café, como Mundo Novo, Topázio, Paraíso (50 plantas), Arara (10 plantas), Acauã Novo (10 plantas), Bourbon amarelo (500 plantas) e Gueisha (200 plantas). Além disso, a Fazenda é parte integrante da Cooperativa dos Cafeicultores do Cerrado de Monte Carmelo Ltda. (MonteCCer), onde fortalece seus laços e compromisso com a excelência na produção cafeeira. Há uma combinação de fatores geográficos estratégicos, cuidadosa seleção de variedades e filiação a entidades representativas que resulta em cafés de qualidade única, que se destacam por sabores distintos e identidade, toda essa junção é assessorada pela EDUCAMPO, plataforma do Sebrae para acompanhamento das atividades na Fazenda (Sebrae, 2024).

1.3.2 *Histórico e trajetória da Fazenda Santa Bárbara*

Na década de 1970 o Senhor José Tomas de Oliveira e sua esposa foram de Araguaína, município de Tocantins para Monte Carmelo, cidade de Minas Gerais. Nascido em Abadia dos Dourados/MG, formou-se em Medicina em 1969, pela Faculdade de Medicina do Triângulo Mineiro (atual UFTM), em Uberaba/MG. Começou sua carreira da Medicina em Araguaína, Tocantins, a fim de poupar uma renda e voltar para sua região. Após dois anos trabalhando no Tocantins, Dr. José Tomas voltou para trabalhar em Monte Carmelo, onde exerceu suas funções como médico Clínico Geral, médico do Trabalho e Ginecologista na cidade. Logo, formou

família, pai de 3 filhos – Rafael Tomas, Rogério Tomas e Ana Cláudia Tomas (Figura 05), adquiriu a propriedade e iniciou as atividades com café tipo arábica. Até meados da década de 1980 trabalhou com lavouras de café convencional, com pouco uso de tecnologias, inexistentes à época.



Figura 05. (1) Foto enquanto residia em Araguaína/TO (1973). (2) Comemorações da família na Fazenda Santa Bárbara (1978).

Fonte: Acervo da família.

Contudo, ao final de 1980, oscilações no preço da saca do café, devido às condições do mercado exterior, interferiram de forma significativa na renda e lucro da propriedade, fazendo com que o Senhor José Tomas mudasse a forma de uso da terra, passando da produção de café para a bovinocultura de corte, leite e cereais (Santa Barbara Coffee^A, 2023). Após mais de 30 anos na bovinocultura, e com a crescente demanda do café no mercado interno e externo, o Sr. José Tomas resolveu voltar à cafeicultura, mais precisamente focada no café arábica, já em alta na região do Cerrado Mineiro.

Essa nova fase da Fazenda Santa Bárbara conta com o suporte e gerenciamento do filho Rafael Ramos Tomas e sua nora Juliana Rezende Mello (figura 06-1), que tinham como objetivo desenvolver o cultivo do café a partir de preceitos da sustentabilidade, com investimentos em tecnologia e na qualidade do produto (Santa Barbara Coffee^A, 2023). Em 2021, a parceria na Fazenda Santa Bárbara foi ampliada, com toda a família integrando o grupo (figura 06-2) e colaborando para traçar projetos desafiadores em um mercado de elevada exigência. Essa união familiar não só fortaleceu os laços entre os membros, mas também trouxe uma abordagem coletiva na definição de estratégias para enfrentar os desafios e aproveitar as oportunidades no cenário agrícola. A participação de todos os membros da família evidencia um comprometimento conjunto na gestão e no desenvolvimento sustentável da fazenda.



Figura 06. 1- Atuais co-proprietários e gerenciadore da Fazenda Santa Bárbara.
2- Reunião familiar com os filhos e integrantes do grupo que gerencia a fazenda (2020).
Fonte: Acervo da família.

Em comum acordo, iniciou-se a gestão sob os cuidados da Juliana, com a obtenção de sapiência e de um *insight* de ideias, para adoção de práticas sustentáveis. Após uma conversa em família, todos a apoiaram para construir todo um caminho, que ela acreditava (e acredita!) que seria o melhor para a propriedade. Atualmente, todo o processo de produção está voltado para a sustentabilidade, a conservação do meio ambiente, o uso de tecnologias e a qualidade, concomitante aos desafios dos processos naturais e dos controles para consistências de cada lote. Segundo Juliana Rezende, “o segredo para um café de qualidade é produzir cafés com o olhar na planta e sua real necessidade. Observar com rapidez e tomar medidas sustentáveis pensando que cada atitude visa uma construção a longo prazo”.

Sagra-se relevante apresentar a trajetória empreendedora da Juliana, cujo início se deu a partir de sua formação como farmacêutica, empresariando no ramo de farmácia, antes em Uberaba e, posteriormente em Monte Carmelo, após se mudar com sua família. Com o passar do tempo, seu esposo Rafael começou a demandar apoio com as atividades de gestão e financeiras da fazenda. A partir de então, Juliana “tomou gosto” pelas atividades da fazenda e foi em busca de suporte tanto para a produção quanto para a gestão, como foi o caso das parcerias com a Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural de Minas Gerais (Emater-MG), do Serviço Nacional de Aprendizagem Rural (Senar) e do Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas (Sebrae).

Além das parcerias institucionais, Juliana fez investimentos em sua qualificação, transformando em Mestre de Terra e *Q Grader* (especialista em prova de café). Devido ao

interesse pela cultura do café, à profissionalização e ao sucesso alcançado por Juliana, os membros da família decidiram, de forma estratégica, delegar a gestão da propriedade a ela, com o intuito de que a fazenda se tornasse um negócio de sucesso. Chama atenção o respeito e a visibilidade conquistados por Juliana na região de Monte Carmelo, visto sua habilidade com as mídias sociais e a divulgação que desenvolve de todo o trabalho que realiza na propriedade. As diversas premiações recebidas enaltecem seu trabalho e impulsionam a busca contínua por inovações.

Este relato se coaduna com as assertivas de Andrade (2022, p. 40), para quem

...os determinantes críticos do sucesso para as mulheres empreendedoras envolvem uma boa gestão de negócios, motivação e ambição, e uma capacidade de explorar, tendo como base um modelo de negócio. [...]. Levam em consideração que não há diferenças entre homens e mulheres empreendedores nas dimensões da personalidade, incluindo motivação para realização, autonomia, persistência, agressividade, independência, (não) conformidade, orientação para metas, liderança e propensão a assumir riscos. Pode haver diferenças na forma como homens e mulheres administram seus negócios. Contudo, comparadas aos homens, as mulheres empreendedoras são mais adaptáveis, mais conscientes socialmente, têm mais experiência em diferentes áreas de negócios, delegam mais e se envolvem em planejamento de longo prazo, tendo a oportunidade de realizarem algum curso de formação para empreendedoras.

Ressalta-se, contudo, que a trajetória empreendedora da Juliana destoa dos resultados de outros estudos que tratam do perfil de mulheres empreendedoras, que trazem a falta de apoio familiar, baixa escolarização (em alguns casos relacionada a questões de discriminação étnico-racial e de gênero), falta de recursos financeiros para investir em formação e capacitação profissional, dificuldade de acesso a recursos financeiros para impulsionar o negócio devido à desconfiança do mercado em relação às suas competências técnicas e de gestão, dificuldade na formação de uma rede apoio, dupla jornada de trabalho nos cuidados com a casa e a família, dentre outros (Andrade, 2022).

Um dos pontos de destaque no processo de gestão da Fazenda Santa Bárbara é a clara definição da missão: "Fazer cafés especiais através de pessoas especiais". Essa declaração, compartilhada pela gestora Juliana Rezende Mello, reflete o compromisso da fazenda em produzir cafés especiais com segurança alimentar, sabores diferenciados e identidade, tudo isso com o firme propósito na sustentabilidade. Essa missão não apenas orienta a qualidade do produto, mas também ressalta a importância das pessoas envolvidas e o papel crucial da equipe na conquista desse objetivo (Santa Barbara Coffee^B, 2023).

1.3.3 Café da Região do Cerrado Mineiro

A região do Cerrado Mineiro é reconhecida mundialmente por sua produção excepcional de café, destacando-se como uma das áreas mais renomadas para o cultivo de grãos de alta qualidade (Roda et al., 2023). As características únicas do solo, combinadas com o clima favorável, conferem aos cafés do Cerrado Mineiro sabores distintos e perfis marcantes. Com uma altitude ideal e uma tradição enraizada na cafeicultura, os produtores da região estão comprometidos em cultivar variedades premium, que resultam em cafés especiais apreciados por sua complexidade, acidez equilibrada e notas únicas (Duarte e Galina, 2021).

Para Duarte e Galina (2021), os cafés provenientes do Cerrado Mineiro frequentemente apresentam nuances que refletem a riqueza do *terroir* local. Notas de frutas tropicais, encorpado e com doçura acentuada são características comuns que proporcionam uma experiência sensorial marcante para os apreciadores de café. A busca incessante pela excelência na produção e o compromisso com práticas sustentáveis tornam o café do Cerrado Mineiro não apenas um produto de qualidade excepcional, mas também testemunha do esmero e da paixão com que os produtores moldam a identidade dessa região cafeeira.

Na vanguarda da cafeicultura, a Região do Cerrado Mineiro celebrou seu jubileu de ouro em 2022, marcando cinco décadas de compromisso com a sustentabilidade e a inovação. Sua abrangência se estende por uma área de produção de 255 mil hectares, reunindo 4.500 cafeicultores distribuídos em 55 municípios (Cerrado Mineiro, 2023).

De acordo com a Cerrado Mineiro (2023), a região destacou-se por suas conquistas notáveis, a região implementou a tecnologia de '*fingerprint*' (impressão digital do café), uma inovação que aprimora a rastreabilidade do café, garantindo sua procedência e qualidade. Além disso, atingiu um marco significativo em 2022 ao embarcar mais de 1 milhão de sacas de café com o selo de Denominação de Origem (D.O.), reforçando seu prestígio internacional, com uma remessa enviada para o Japão. Essas realizações destacam o papel pioneiro e a dedicação contínua da Região do Cerrado Mineiro no cenário global da cafeicultura.

1.3.4 Produção de café e controle de qualidade

1.3.4.1 Produção de café

Conforme Moraes (2020), a produção e transformação do café inclui etapas imprescindíveis como o plantio, tratamentos culturais, colheita, beneficiamento (que abrange a limpeza e classificação) secagem, torrefação e moagem dos grãos.

Na região do Cerrado Mineiro, a cafeicultura é predominante em sistema de monocultura, com a espécie arábica sendo a principal cultivada, devido à elevada altitude da região, variando entre 750 e 1000 metros. Essa espécie, que inclui variedades como Mundo Novo, Topázio e Catuaí, beneficiam-se das condições edafoclimáticas específicas do Cerrado, resultando em grãos de alta qualidade. O solo latossolo vermelho e o relevo plano, predominante na área, permite a mecanização completa do cultivo devido ao seu baixo declive, otimizando as operações agrícolas e contribuindo para a eficiência produtiva. Este contexto de cultivo proporciona um cenário ideal para a produção de cafés especiais, combinando altitude, solo e práticas agrícolas avançadas, essenciais para a competitividade no mercado global (Silva et al., 2022; EMATER, 2024).

Na Fazenda Santa Bárbara, a atividade de plantio iniciou-se com a análise do solo, que verifica as condições do solo para o plantio, seguida pela limpeza da área a ser cultivada. Utilizando tratores, implementos agrícolas específicos e mão de obra terceirizada, o solo foi corrigido com calcário após ser arado, gradeado e sulcado. Este processo, destinado a implantar as lavouras, tem uma duração média de duas semanas e ocorre normalmente em janeiro. As plantas de café foram dispostas com espaçamento de 3,8 metros entre as linhas e 0,7 metros entre as plantas, configurando um sistema de plantio em renque, onde a rua é mais larga e a linha é mais fechada (Fazenda, 2023).

Os tratos culturais realizados na lavoura abrangem diversas práticas, incluindo o manejo da irrigação, controle fitossanitário, adubações periódicas, entre outros. Essas ações visam sempre manter o equilíbrio nutricional da planta, resultando em uma florada saudável e um alto pegamento dos frutos (Fazenda, 2023). Na fazenda Santa Bárbara, o acompanhamento da florada e da maturação dos grãos nos talhões é feito via satélite. A colheita é feita de forma mecânica e a pós-colheita possui uma estrutura adequada a tal propósito com: Terreiro de cimento; Terreiro Suspenso; Despoldador; Desmucilador; Secador Rotativo (Horizontal); e, Ecco Filtro. A colheita tem início no mês de maio e termina em junho, sendo realizada pelos próprios produtores com o auxílio de colhedoras adquiridas pela fazenda. Esse método garante que a colheita ocorra quando a maioria dos grãos se encontram em estágio de maturação, de cor vermelha, minimizando desperdícios e garantindo a qualidade do café.

Após a secagem, os grãos de café passam pelo beneficiamento, que consiste na remoção das cascas, conhecidas como pergaminho. Em seguida, os grãos são peneirados e selecionados, separando os de melhor qualidade dos demais. Os grãos selecionados para a torrefação são processados automaticamente por uma máquina de beneficiamento, capaz de beneficiar 600 kg de café por hora durante 12 horas diárias. A armazenagem e exportação do café são realizadas pela cooperativa MonteCCer, que utiliza bags de 800 kg e sacas de 60 kg para o armazenamento e transporte dos grãos (MonteCCer, 2024; Fazenda, 2023).). O armazenamento então é a finalização de todo um ano de cuidado e atenção. Condições adequadas de armazenamento são indispensáveis para a manutenção da qualidade do produto quanto a cor, aspecto, tipo e qualidade de bebida, além de garantir um produto seguro, livre de contaminação por micotoxinas como a ocratoxina A (OTA) (figura 07).

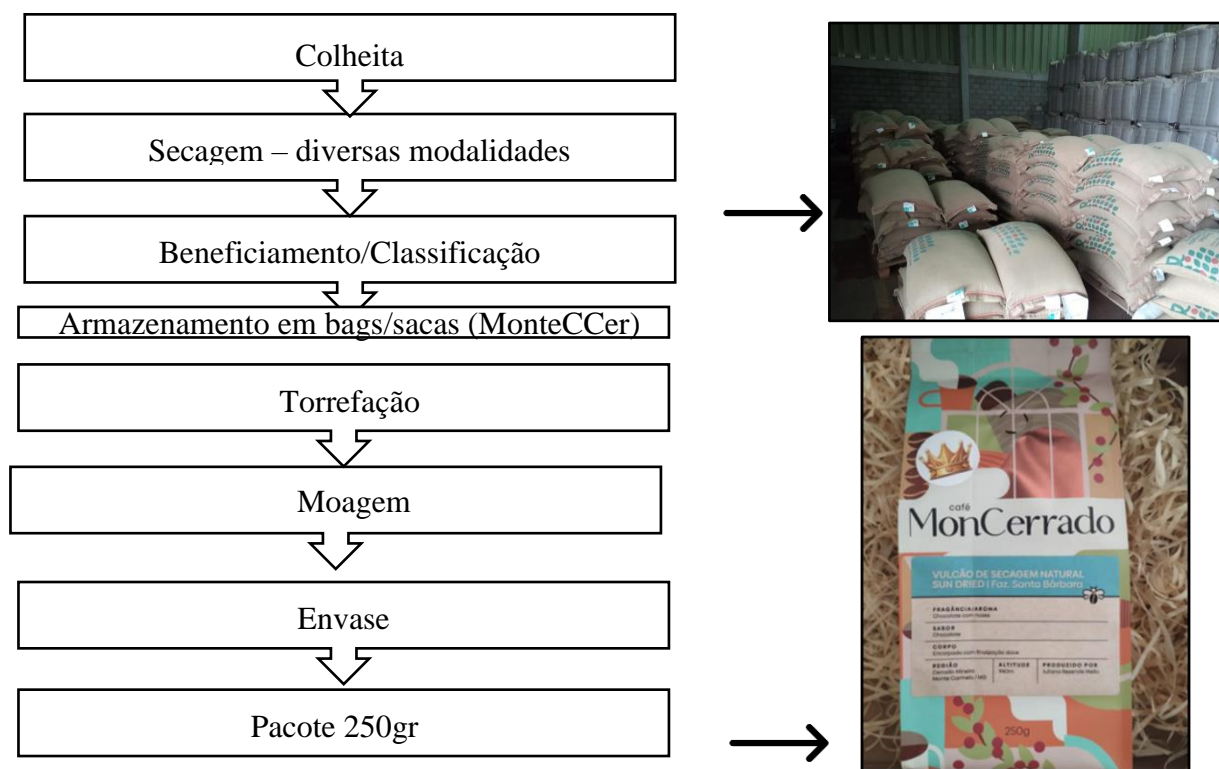


Figura 07. Fluxograma pós-colheita e beneficiamento do café. 1 – Armazenamento do café (MonteCCer); 2 – embalagem do café Fazenda Santa Bárbara.

Fonte: elaborado pelo autor.

1.3.4.2 Tipos de secagem e processos do café

A Fazenda Santa Bárbara adota diversos métodos de secagem e fermentação (figura 08) para o processamento do café, a fim de garantir a qualidade excepcional de seus grãos. Todas

essas técnicas são descritas por Alves et al. (2020), Duarte e Galina (2021) e Oliveira et al. (2021), e utilizadas pela propriedade. Entre os principais processos utilizados estão:

1. Fermentação Anaeróbica sem *Saccharomyces*: o café permanece em bombonas de plástico de 200l fechadas, em anaerobiose, com a válvula que permite a saída de gás carbônico (Figura 8.1). Com esse método consegue-se consistência, repetibilidade e mais controle sobre o processo. As notas sensoriais apresentam-se mais evidenciadas e com mais complexidade.

2. Secagem ao sol em terreiro de concreto: o terreiro de cimento é uma estrutura lisa que evita o rompimento do grão do café (Figura 8.2). Durante o dia, de tempos em tempos, o café é virado e misturado para uma secagem homogênea, dentro dos padrões de temperatura que mantém a qualidade e os sabores. A secagem demora de 10 a 15 dias.

3. Fermentação aeróbica na floresta: processo de fermentação realizado na presença de oxigênio em local de reserva ecológica da Fazenda (Figura 8.3). Ambiente fresco e calmo para que o café possa desenvolver seus melhores sabores.

4. Secagem em Vulcão: após completar meia seca, alguns micros lotes são secos pelo método Vulcão. Esse método proporciona uma secagem mais uniforme e mais lenta, preservando as características do café (Figura 8.5).

5. *African Bed* (Terreiro Suspenso): método utilizado para secagem de micro lotes. É uma estrutura de tela de malhas finas tipo sombrite, suspensa com boa ventilação, evitando o contato com o chão (Figura 8.4). Esta secagem lenta varia de 30 a 35 dias.

6. Fermentação Anaeróbica com *Saccharomyces*: o mesmo processo da fermentação Anaeróbica, mas com adição de levedura para dar mais complexidade e consistência aos sabores (Figura 8.6).



Figura 08. 1- Fermentação Anaeróbica sem *Saccharomyces*; 2 - Secagem ao sol em terreiro de concreto; 3 - Fermentação aeróbica na floresta; 4 - Secagem em Vulcão; 5 - *African Bed* (Terreiro Suspenso); 6 Fermentação Anaeróbica com *Saccharomyces*.

Fonte: <https://santabarbaracoffee.com.br/produtos/> (2023).

1.3.4.3 Controle de qualidade

Em 2019 a Fazenda Santa Bárbara, instalou um laboratório de qualidade com o objetivo de avaliar e melhorar tanto a qualidade da bebida como a segurança alimentar. Assim, reforça seu compromisso com a excelência ao operar um laboratório dedicado à garantia e controle da qualidade de seu café. Contando com uma equipe altamente qualificada, que inclui uma *Q Grader*, *Q Processing* e uma Mestre de Torra, o laboratório realiza uma análise abrangente, desde avaliações físicas até a identificação dos perfis de torra ideais para cada lote. Além disso, a fazenda proporciona uma experiência sensorial mais profunda das bebidas ao oferecer uma variedade de métodos de coagem (Santa Barbara Coffee^C, 2023).

No espaço são realizadas diversas avaliações e testes, sendo análise física do grão, análise sensorial, avaliação da curva de torra, avaliação em diferentes métodos de coagem e avaliação de segurança alimentar (figura 09).



Figura 09. Etapa dos diversos processos de controle de qualidade do café. **1-**Classificação por Tipos de Defeitos; **2-** Análise e classificação sensorial do café **3-** Torra de lote específico; **4-** Análise de bancada no laboratório de café.

Fonte: <https://santabarbaracoffee.com.br/laboratorio/> (2023).

A análise física do grão desempenha um papel crucial na avaliação da safra, examina a granulometria, identifica defeitos físicos e mede a densidade do café para aferir o rendimento da colheita. A densidade, em particular, desempenha um papel significativo na formulação dos perfis de torra pelos mestres torradores, sendo considerada uma informação vital. Ao conduzir a avaliação física, adota-se o padrão da Classificação Oficial Brasileira (COB) que possui extremo renome no país. O COB é uma abordagem rigorosa que destaca o compromisso em manter padrões elevados de qualidade em todas as fases da produção de café, assegurando que cada grão atenda aos critérios exigentes estabelecidos pela indústria (Sampaio, 2019).

A avaliação sensorial dos cafés segue os padrões estabelecidos pela SCA (*Specialty Coffee Association*), sendo conduzida por um profissional certificado pela CQI (*Coffee Quality Institute*) na equipe. Diariamente, uma *Q-Grader* habilitada pela CQI avalia a produção dos cafés na fazenda (Santa Barbara Coffee^C, 2023).

Segundo Juliana Rezende, durante essa avaliação, busca-se pontuar e classificar os cafés como especiais, considerando 10 atributos: Fragrância/Aroma, Uniformidade (cada xícara representa estatisticamente 20% do lote avaliado), Ausência de Defeitos, Doçura, Sabor, Acidez, Corpo, Finalização, Harmonia e Conceito Final (impressão geral sobre o café atribuída pelo classificador, representando a única parcela de subjetividade na avaliação da amostra). A

proprietária destaca ainda que “esse processo meticuloso reflete nosso compromisso em assegurar a qualidade excepcional de nossos cafés, evidenciando suas características distintas e proporcionando uma experiência sensorial única aos apreciadores”.

Já a informação da curva de torra desempenha um papel importante na avaliação sensorial do café. A torra é conduzida por um profissional qualificado, auxiliado por um software dedicado que registra e controla o processo. Na propriedade utiliza-se o *cropster*, para avaliar e registrar a curva. Esse método permite sugerir uma curva de torra personalizada aos clientes quando adquirem os cafés, assegura uma experiência consistente e destaca as características distintas de cada lote (Sampaio, 2019; Santa Barbara Coffee^C, 2023).

O Cropster é uma plataforma tecnológica utilizada na análise e gestão de café, surgiu nos EUA e auxilia todos os produtores na parte sensorial do grão de café. Ela fornece ferramentas para monitorar e otimizar todas as etapas da produção de café, desde o cultivo e a colheita até a torra e a análise de qualidade. Com o Cropster, os produtores e torrefadores podem registrar dados precisos sobre os lotes de café, acompanhar o desempenho em tempo real e ajustar os processos para melhorar a consistência e a qualidade do produto final. A plataforma também oferece funcionalidades para rastreabilidade, facilitando a documentação e a comunicação das práticas sustentáveis e éticas adotadas ao longo da cadeia de produção (Cropster, 2024).

Para garantir e conhecer melhor o produto, uma profissional barista realiza avaliação em vários métodos de bebidas. Essa avaliação conclui todo o trabalho do pé à xícara, sendo possível sugerir qual o melhor café, de acordo com a necessidade de cada cliente.

Os cafés são anualmente submetidos a avaliações por meio de envio a laboratório externo para análise. Além da avaliação dos grãos de café, procede-se à análise do mel extraído na florada do café. No segundo ano consecutivo, alcançou-se a produção de um mel de caráter especial, com mais de 90% de flor do café no material. A última análise realizada em 2023 incluiu a avaliação de resíduos no mel, com mais de 600 substâncias químicas testadas e não detectadas (Santa Barbara Coffee^C, 2023).

Na Fazenda Santa Bárbara^C (2023), o compromisso com a segurança do alimento transcende o produto final. Cada item utilizado na produção é avaliado diariamente com meticulosidade. Desde 2018, abstém-se do uso de glifosato conforme relatório de índice glifosato na lavoura cafeeira (Apêndice B), resultando não apenas na produção de uma bebida de qualidade, mas também com garantia em termos de segurança alimentar. Essa abordagem

cuidadosa reflete o compromisso em oferecer cafés excepcionais em termos de sabor, qualidade e segurança alimentar.

1.3.5 Denominação de origem (DO)

A área do Cerrado Mineiro destaca-se por uma atmosfera inovadora, guiada pela criatividade dos agricultores empreendedores que a constituem. Composta por 55 municípios, abrange uma extensão de 210 mil hectares, dos quais 102 mil hectares recebem certificação. A produção anual na região, proveniente de 4.500 produtores, atinge a marca de 5 milhões de sacas (Cerrado Mineiro, 2023).

A Denominação de Origem (DO) representa uma área geográfica delimitada que produz um produto com características exclusivas, intrínsecas ao seu território. Os cafés originários da Região do Cerrado Mineiro (Figura 10) personificam essa identidade e excelência, moldados pelas interações entre clima, solo, relevo, altitude e o *know-how* dos produtores locais (EXPOCACER, 2021).



Figura 10. 1 – Logomarca do território com Denominação de Origem do Cerrado Mineiro. 2- Produção de café com crotalária na Fazenda Santa Bárbara.

Fonte: 1 – Federação do Cerrado Mineiro (2023); 2- Próprio autor.

De acordo com a Federação dos Cafeicultores do Cerrado (Cerrado Mineiro, 2023), sendo esta, a entidade controladora da Denominação de Origem Região do Cerrado Mineiro, sua função é assegurar a qualidade dos cafés por meio da Certificação de Origem e Qualidade. Esse selo atesta a procedência do produto, garantindo sua origem na demarcação territorial da Região do Cerrado Mineiro.

O processo oficial de produção da Denominação de Origem (DO) enfatiza e valoriza as características distintas da região. O selo "Região do Cerrado Mineiro – D.O." é concedido exclusivamente aos cafés cultivados dentro da área oficialmente delimitada, seguindo

rigorosamente as diretrizes estabelecidas pelo Conselho Regulador. Essa garantia é evidenciada pelo Selo de Procedência Garantida de Origem e Qualidade (Cerrado Mineiro, 2023).

Para obter a Denominação de Origem, as propriedades produtoras de café devem obedecer ao conjunto de regras estabelecidas, dispostas no quadro 01.

Quadro 01. Regras para obtenção da Denominação de Origem pela Região do Cerrado Mineiro.

● Localização dentro da área designada da região;
● Altitude mínima de 800 metros, alcançando até 1.300 metros;
● Utilização exclusiva da espécie de café arábica;
● Qualidade mínima de 80 pontos, conforme a metodologia SCAA;
● Adoção de boas práticas agrícolas em conformidade com as leis brasileiras;
● Armazenamento dos lotes de café apenas em cooperativas licenciadas;
● Utilização exclusiva da embalagem oficial de café, identificada com o Selo de Procedência Garantida de Origem e Qualidade.

Fonte: Cerrado Mineiro, 2023.

O método SCAA (*Specialty Coffee Association of America*) de avaliação é um padrão globalmente reconhecido para a avaliação de cafés especiais. Este método envolve uma série de procedimentos rigorosos para determinar a qualidade dos grãos de café. Aqui estão os principais aspectos do método SCAA (Nascimento, Celestino e Oliveira, 2023).

O processo começa com a *cupping* ou degustação, onde os provadores avaliam vários aspectos do café. Os grãos são moídos e preparados de maneira específica para garantir consistência (Nascimento, Celestino e Oliveira, 2023). O café é avaliado em dez atributos principais:

1. **Fragrância/Aroma:** O cheiro dos grãos moídos e do café recém-preparado.
2. **Sabor:** O gosto geral do café.
3. **Aftertaste:** O sabor residual após a degustação.
4. **Acidez:** A vivacidade do café, que pode ser brilhante ou suave.
5. **Corpo:** A sensação de peso e textura do café na boca.
6. **Uniformidade:** A consistência de sabor entre diferentes xícaras do mesmo lote.
7. **Balance:** A harmonia entre os diferentes atributos de sabor.
8. **Clean Cup:** A ausência de sabores indesejados.
9. **Sweetness:** A doçura natural do café.
10. **Overall:** A avaliação geral do café.

É aplicada uma pontuação onde cada atributo é pontuado de 1 a 10, e a pontuação final é a soma dessas notas. Cafés com pontuação acima de 80 são considerados cafés especiais. Assim como os defeitos durante a avaliação, também são identificados e anotados quaisquer defeitos no café, que podem afetar negativamente a pontuação final (Nascimento, Celestino e Oliveira, 2023).


Este método permite que produtores, torrefadores e consumidores identifiquem e valorizem os cafés de alta qualidade com precisão e consistência, promovendo a transparência e a padronização na indústria do café especial.


Este compromisso com padrões rigorosos reforça a autenticidade e a qualidade dos cafés da Região do Cerrado Mineiro, consolidando sua reputação no cenário cafeeiro nacional e internacional. Os cafés da Fazenda Santa Bárbara são meticulosamente avaliados segundo os padrões e protocolos da SCA - Associação de Cafés Especiais. Após essa avaliação, são concedidos em cada lote um Selo de Origem, o Certificado de Origem e o Laudo de Qualidade, estabelecendo assim um robusto Sistema de Rastreabilidade. Além disso, ostentam a certificação de Denominação de Origem da Região do Cerrado Mineiro. São cafés que refletem uma postura única (Fazenda Santa Bárbara^B, 2023; Cerrado Mineiro, 2023).



1.3.6 Certificações

A Fazenda Santa Bárbara possui três certificações (Quadro 02), sendo uma nacional e duas internacionais, com foco na promoção da melhoria do processo de gestão das atividades agropecuárias, na otimização do uso de insumos e dos recursos naturais, de modo a promover a sustentabilidade econômica, social e ambiental das atividades e, claro, a geração de emprego e renda para região de Monte Carmelo.

Quadro 02. Certificações obtidas pela Fazenda Santa Bárbara

Certificação	Objetivo da certificação	Critério de avaliação	Ano de obtenção	Logo da certificação e site
Certifica Minas Café	O Programa Certifica Minas Café, lançado em 2006 como Agriminas Café, foi o primeiro selo de certificação cafeeira no Brasil emitido por uma instituição governamental. O programa visa evoluir de uma gestão focada apenas na produção para uma abordagem integrada que melhora as condições de produção, sociais e ambientais, promovendo interação com o ambiente e minimizando impactos climáticos. (SEAPA, 2023).	O Programa é acessível para os produtores, com base nos escritórios da Emater-MG, onde iniciam o contato e agendam visitas e diagnósticos para adequação das propriedades. Após as adequações, a propriedade é indicada para auditoria realizada pelo Instituto Mineiro de Agropecuária (IMA), seguindo critérios estabelecidos por portarias e decretos da SEAPA e do IMA. A certificação aborda aspectos específicos da produção, incluindo rastreabilidade, responsabilidade socioambiental,	2018	http://certificaminas.com/ SEAPA (Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais). 

		qualidade do produto e gestão da produção (SEAPA, 2023).		
UTZ	<p>O programa de certificação UTZ nasceu como “UTZ kapeh” (pronuncia-se ootz kahpāy), que significa “bom café” na língua maia guatemalteca de Quiché. A UTZ é um programa de sustentabilidade para café, cacau e chá que opera em conjunto com as marcas existentes. O selo UTZ representa uma agricultura mais sustentável e melhores oportunidades para os agricultores, as suas famílias e o nosso planeta. O programa de certificação UTZ permite que os agricultores utilizem melhores métodos agrícolas, cultivem melhores colheitas e gerem mais rendimentos. Melhorar as condições de trabalho, adaptar-se à mudança climática e proteger o meio ambiente (RAINFOREST, 2023).</p>	<p>A conformidade com os requisitos rigorosos por parte das fazendas e empresas certificadas pela UTZ é auditada por organismos de certificação independentes. Estes requisitos incluem boas práticas agrícolas e gestão agrícola, condições de trabalho seguras e saudáveis, combate ao trabalho infantil e forçado e proteção do ambiente. O rótulo UTZ no seu produto mostra que a sua marca favorita apoia a agricultura sustentável (RAINFOREST, 2023).</p>	2019	<p>http://www.rainforest-alliance.org/business/certification-verification * agora parte da Rainforest Alliance</p> 

<p><i>Rainforest Alliance</i></p>	<p>Certificação <i>Rainforest Alliance</i> ajuda produtores a produzirem lavouras melhores, adaptar a mudança climática, aumentar produtividade e reduzir custos. Estes benefícios fornecem empresas com um suprimento estável e seguro de produtos certificados. O centro de certificação <i>Rainforest Alliance</i> tem a missão de criar um futuro melhor para pessoas e natureza tornando o comércio responsável como o novo normal. (RAINFOREST, 2023).</p>	<p>O selo significa que o ingrediente certificado foi produzido utilizando métodos que apoiam os três pilares da sustentabilidade: social, econômico e ambiental. Auditores independentes avaliam os agricultores em relação aos requisitos em todas as três áreas antes de conceder ou renovar a certificação. Nossos programas de certificação baseados em dados enfatizam o compromisso com a melhoria contínua, treinamento em sustentabilidade e claros benefícios para os agricultores.</p>	<p>2019</p>	<p>http://www.rainforest-alliance.org/business/certification-verification</p> 
<p>Nespresso AAA</p>	<p>O Programa Nespresso AAA de Qualidade Sustentável™ é uma iniciativa criada pela Nespresso em 2003 para garantir a produção de café de alta qualidade de forma sustentável. O programa foi desenvolvido em parceria com a <i>Rainforest Alliance</i> e visa proporcionar benefícios ambientais, sociais e econômicos aos agricultores e suas comunidades. (NESPRESSO, 2024).</p>	<p>1. Melhoria da Qualidade do Café: O programa ajuda os agricultores a implementar práticas agrícolas que aumentam a qualidade do café, garantindo uma produção consistente de grãos de alta qualidade. 2. Sustentabilidade Ambiental: Promove práticas agrícolas sustentáveis que protegem a biodiversidade e conservam os recursos naturais, como água e solo. Isso inclui técnicas de</p>	<p>2019</p>	

		<p>agricultura regenerativa e uso responsável de recursos naturais.</p> <p>3. Apoio aos Agricultores: Oferece suporte técnico e treinamento para os agricultores, ajudando-os a melhorar suas práticas agrícolas e a aumentar sua produtividade e rentabilidade. Garante preços justos e estáveis para o café, proporcionando segurança financeira e melhoria nas condições de vida das comunidades agrícolas.</p> <p>4. Impacto Social Positivo: Investe em infraestruturas comunitárias, como escolas e centros de saúde, e promove o bem-estar das famílias dos agricultores. Incentiva a igualdade de gênero e a inclusão social nas comunidades agrícolas.</p> <p>5. Rastreabilidade e Transparência: O programa assegura a rastreabilidade do café desde a fazenda até a xícara, garantindo que os consumidores saibam a</p>		
--	--	--	--	--

		origem de seu café e que ele foi produzido de maneira ética e sustentável.		
--	--	--	--	--

Em 2018, ano em que obteve a primeira certificação (Certifica Minas Café), a Fazenda Santa Bárbara não apenas consolidou seu compromisso com práticas sustentáveis, mas também alçou voos internacionais. Nesse ano, a propriedade exportou Café ético e rastreável para a Ásia, mais precisamente para Singapura, e para a América do Sul, alcançando destinos como a Colômbia, todos pela Cooperativa MonteCCer (Fazenda Santa Bárbara^A, 2023).

Essa incursão bem-sucedida nos mercados internacionais reforça não apenas a qualidade excepcional do café produzido, mas também a capacidade da fazenda em atender aos padrões globais de excelência. Essa expansão para mercados distantes contribuiu significativamente para a valorização da saca de café ao longo do período de 2018 a 2022, em aproximadamente R\$30,00/saca. Em 2023 a valorização foi de quase 20% no valor global da saca (informação confirmada pela contadora da Fazenda), fato que tem consolidado a Fazenda Santa Bárbara como referência em cafés especiais de alcance global.

A valorização da saca de café na Fazenda Santa Bárbara, entre os anos de 2018 e 2022, justifica-se por uma série de diferenciais que elevam a qualidade e a singularidade do produto. A implementação de práticas agrícolas sustentáveis e a adesão a certificações renomadas, como a Denominação de Origem da Região do Cerrado Mineiro, Certifica Minas Café e o Selo de Procedência Garantida de Origem e Qualidade, atestam o comprometimento da fazenda com padrões excepcionais (Fazenda Santa Bárbara^A, 2023).

Essa comercialização, anteriormente citada, dá-se pelas tradings, que são empresas essenciais no comércio global de café, responsáveis por exportar este produto para diversos países. A Fazenda Santa Bárbara, por exemplo, comercializa seu café por meio das cooperativas MonteCCer e Cooxupé, que cuidam do armazenamento do produto. Essas cooperativas, por sua vez, negociam o café com as tradings, que então enviam o produto para mercados internacionais onde se obtém o melhor valor de venda. Esse processo é regulado por uma série de normas e legislações que garantem a qualidade do produto, a transparência nas transações e a conformidade com as práticas de comércio justo, proporcionando benefícios econômicos e sociais aos produtores e garantindo o cumprimento de padrões internacionais no mercado de exportação (Fazenda Santa Bárbara^A, 2023; MonteCCer, 2024).

1.3.7 Premiações da Fazenda Santa Bárbara

A propriedade tem se destacado no cenário da produção cafeeira ao longo dos anos, conquistando merecidamente diversas premiações e reconhecimentos que atestam a excelência de seus cafés (figura 11). Ao participar de competições renomadas e receber distinções significativas, a Fazenda Santa Bárbara não apenas contribui para elevar o padrão da

cafeicultura regional, mas também inspira outras propriedades a adotarem práticas sustentáveis e inovadoras (Fazenda Santa Bárbara^D, 2023).

1. Mérito sustentabilidade Emater - 2021

A Fazenda Santa Bárbara celebrou uma conquista notável ao receber o "Mérito Sustentabilidade Emater" em dezembro de 2021 (Figura 11.1). Essa honraria, fruto de uma parceria exemplar com a Emater, foi concedida pela regional de Uberlândia e escritório local de Monte Carmelo. Esse reconhecimento ressalta não apenas a excelência na produção de cafés especiais, mas também o compromisso firme da fazenda com práticas sustentáveis e a integração eficaz com instituições que promovem o desenvolvimento agrícola na região. Essa premiação reforça o papel da Fazenda Santa Bárbara como produtora de cafés de alta qualidade, e como modelo de sustentabilidade e parceria colaborativa na comunidade cafeeira (EMATER, 2024).

2. 9º Prêmio Ético Rastreável da Região do Cerrado Mineiro - 2021

A Fazenda Santa Bárbara recebeu o Troféu Ético e Rastreável no 9º Prêmio da Região do Cerrado Mineiro, realizado pela Federação dos Cafeicultores do Cerrado Mineiro em 2021 (Figura 11.2). Esse prêmio celebra a safra, reconhece a dedicação dos cafeicultores com a produção de cafés com atitude, ética, rastreáveis e sustentáveis e destaca a abordagem transparente e comprometida da fazenda. No evento, que teve como tema a Intercooperação, produtores das cooperativas e associações da região se reuniram para revelar os melhores cafés produzidos nos 55 municípios demarcados. A Fazenda Santa Bárbara, conhecida por sua inovação e práticas sustentáveis, conquistou o 2º lugar na categoria de fermentação induzida, reafirmando seu papel proeminente na cafeicultura de excelência da região. Esse reconhecimento é um reflexo da qualidade dos cafés produzidos e do compromisso ético e rastreável que permeia todas as etapas de sua produção, consolidando sua posição de destaque no cenário cafeeiro (EXPOCACER, 2021; Santa Barbara Coffee^D, 2023).

3. Congresso Nacional Mulheres Agro 2022 - Bayer

A propriedade brilhou no Congresso Nacional Mulheres Agro 2022, conquistando o 1º lugar na categoria de pequena propriedade, em uma iniciativa promovida pela Bayer (Figura 11.3). Este reconhecimento honra mulheres rurais que se destacam pela gestão sustentável, abrangendo pilares essenciais de governança, responsabilidade social e ambiental. O prêmio evidencia o comprometimento da propriedade com práticas que envolvem o uso consciente dos

recursos naturais, a aplicação de inovações e tecnologias para aprimorar a eficiência produtiva, o desenvolvimento social da comunidade, o bem-estar animal e a valorização do capital humano. Essa distinção, resultado da parceria entre a Bayer e a Abag (Associação Brasileira do Agronegócio), reforça o papel marcante das mulheres que desempenham um papel vital no agronegócio brasileiro (Bayer, 2023; Santa Barbara Coffee^D, 2023).

4. Troféu Mulher Inspiração da Cafeicultura – 2023

A laureada Juliana Rezende recebeu o prestigioso prêmio "Mulher Inspiração Cafeicultura do Brasil" na edição de 2023 (Figura 11.4). Esta distinção foi acolhida com exultação e vivacidade por toda a equipe da Fazenda Santa Bárbara. A participação na competição proporcionou uma experiência enriquecedora, facultando uma compreensão mais aprofundada dos desafios inerentes às cafeicultoras do Sul de Minas, ao mesmo tempo em que fomentou o estabelecimento de uma conexão fraterna com os profissionais do setor. A ExpoCafé, sediada em Três Pontas (MG), foi o ambiente propício para esse relevante reconhecimento, ressaltando o comprometimento e a valiosa contribuição da cafeicultura na região (Expocafé, 2023).

5. Prêmio Fazenda Sustentável Globo Rural - 2023

A Fazenda Santa Bárbara, alcançou o segundo lugar na categoria de Pequena Propriedade durante a sétima edição do prêmio "Fazenda Sustentável Globo Rural 2023" (Figura 11.5). Vale destacar que o prêmio é em âmbito nacional. O reconhecimento destaca as boas práticas adotadas na produção agropecuária, evidenciando o compromisso com a sustentabilidade. Juliana Rezende Mello expressou sua gratidão à equipe, considerando-a como a essência de todas as realizações na fazenda, e enfatizou que o prêmio proporciona uma oportunidade valiosa para compartilhar as práticas sustentáveis, demonstrando a viabilidade dessas iniciativas (Globo Rural, 2023).

6. Etapa Estadual Prêmio Sebrae Mulher de Negócios – 2023

Na etapa estadual do Prêmio Sebrae Mulher de Negócios 2023, Juliana Rezende Mello, venceu na categoria "Produtora Rural", conquistando o 1º lugar (Figura 11.6). Ela também desempenha um papel importante como líder na Aliança Internacional das Mulheres do Café (IWCA) na região do Cerrado Mineiro. A premiação destaca as realizações notáveis das mulheres no mundo dos negócios, reconhecendo seus esforços na expansão de empresas, na criação de empregos e na promoção do empreendedorismo feminino. O reconhecimento visa

valorizar e dar visibilidade ao trabalho excepcional das mulheres na gestão de empreendimentos, destacando seu papel transformador na sociedade e suas virtudes empreendedoras. Segundo Juliana Rezende “O Sebrae foi, é e sempre será minha escola de desenvolvimento do meu negócio. Através do Sebrae conquistamos novos espaços” (SEBRAE, 2024; Santa Barbara Coffee^D, 2023).



Figura 11. 1 Prêmio Destaque Sustentável - Regional Emater/Uberlândia (2021); 2 – Prêmio ético & rastreável - Expocacer (2021); 3 - Congresso Nacional Mulheres Agro- Bayer (2022); 4 – Troféu Mulher Inspiração da cafeicultura - Expocafé (2023); 5- Prêmio Fazenda Sustentável Globo Rural (2023); 6 - Prêmio Sebrae Mulher de Negócios (2023).

Fonte: <https://santabarbaracoffee.com.br/premios/> (2023).

Para finalizar, destaca-se o reconhecimento internacional que a Fazenda Santa Bárbara alcançou ao ter seu café selecionado para a cerimônia na Embaixada do Reino Unido, em Brasília, durante a coroação do rei Charles III (2023) (figura 12). Este evento histórico não só elevou a visibilidade da fazenda, mas também solidificou sua fama global pela produção de cafés de altíssima qualidade. A presença do café da Fazenda Santa Bárbara numa ocasião tão prestigiosa é um testemunho de excelência, dedicação e inovação que caracterizam a produção da propriedade (FAEMG, 2023).



Figura 12. Foto do café da Fazenda na cerimônia durante a Coroação do Rei Charles na Embaixada no Brasil.
Fonte: <https://www.faemg.org.br/noticias/agro-mineiro-na-coroacao-do-rei-charles-iii> (2024).



Esses prêmios não apenas enaltecem a qualidade singular dos grãos produzidos, mas também refletem o comprometimento incessante da fazenda com práticas sustentáveis, inovação e aprimoramento contínuo. Além disso, a liderança visionária de Juliana Rezende, à frente da gestão da propriedade, desempenha um papel fundamental no direcionamento estratégico e no sucesso da fazenda, consolidando ainda mais sua posição como referência na produção de cafés especiais na Região do Cerrado Mineiro.

1.3.8 Projetos e inovações empreendedoras realizadas pela gestão da fazenda.

1.3.8.1 Eco Farm Santa Barbara Coffees

Na fazenda Santa Bárbara, as práticas adotadas na propriedade envolvem diversos projetos que visam economia na utilização de energia, melhoria na qualidade das bebidas (café), segurança alimentar e otimização do uso da água e do solo, com foco na agricultura regenerativa. A Fazenda procura unir a sustentabilidade e a inovação para transformar a produção agrícola. Com uma abordagem centrada em práticas ambientais responsáveis, tecnologia de ponta e foco na qualidade do produto, a fazenda implementou o conjunto de projetos *Eco Farm Santa Barbara Coffees*. Estes projetos não visam apenas o desenvolvimento econômico e a geração de renda, mas também promovem a preservação ambiental e a responsabilidade social, destacando a fazenda como um modelo de excelência no setor cafeeiro. Os projetos realizados na fazenda são apresentados no quadro 03.

Quadro 3. Projetos desenvolvidos pela Fazenda Santa Bárbara voltadas para a aplicação da sustentabilidade.

	PROJETO	APLICAÇÃO
1	<p>Projeto <i>Green Trash</i>: constitui-se em tratar os resíduos da propriedade de forma sustentável. Instalação da Fossa Séptica Ambiental (Tanque de Evapotranspiração-TEvap), que garante o correto destino da água proveniente de sanitários. Instalação do Ciclo da Bananeira (Ciclo de Águas Cinzas) que trata de forma correta o uso das águas provenientes de pias, tanques e chuveiros. Instalação da Esterqueira que faz o tratamento dos dejetos gerados pelos suínos da propriedade, e proporciona adubo orgânico utilizado na fazenda. Todos os projetos foram desenvolvidos junto a Emater/MG (Fazenda, 2023).</p>	
2	<p>Projeto <i>River Friend</i>: é um sistema voltado à recuperação e proteção dos recursos hídricos da propriedade. Na prática os resultados são: a recuperação de duas (2) nascentes, o aproveitamento da água da chuva, por meio da captação no terreiro de secagem, para utilização na irrigação. Instalação dos tensiômetros que analisam a retenção de água nos solos em diversos pontos da fazenda, sistema de inteligência de utilização da água (ICrop), com estação meteorológica e melhor aproveitamento do sistema de irrigação e uso de plantas de cobertura para aumentar a retenção de água, mantendo a umidade e otimizando a irrigação por gotejamento (Fazenda, 2023).</p>	

3 O projeto *Love Bee*: utiliza dois parques de colmeias com instalação permanente, e o mel produzido é comercializado pelo colaborador Rafael. Durante a florada do café, as abelhas desempenham um papel importante, realizando um trabalho seletivo nas flores devido à alta demanda. A presença dessas polinizadoras não só contribui para a produção de mel, mas também melhora significativamente a produtividade e a qualidade dos grãos de café, evidenciando a importância das abelhas para a agricultura sustentável” (Fazenda, 2023). As abelhas também desempenham um papel importante na polinização e na florada do bioma do cerrado.



4 Projeto *Jungle Friends*, projeto “Amigo da Floresta”: desde 2015, o monitoramento da fauna nativa silvestre tem sido fundamental para preservar a biodiversidade, avaliar a saúde dos ecossistemas e compreender seu impacto nas atividades agrícolas. Utilizando máquinas digitais, a identificação dos animais da floresta que visitam a lavoura, permite um reconhecimento detalhado da fauna e contribui para práticas mais sustentáveis (Fazenda, 2023).



5 Projeto *My Tree My Life*: este projeto faz parceria com o Viveiro de Atitude, um programa desenvolvido pela Cooperativa MonteCCer. O objetivo é preservar a fauna e a flora por meio da utilização de alimentos nativos, com o suporte e acompanhamento da Universidade Federal de Uberlândia. (UFU). A partir de 2023, iniciou-se o plantio de árvores alinhado com a fauna identificada no Projeto *Jungle Friends* (Fazenda, 2023; MonteCCer, 2024).



6 Projeto *Glifosato Free*, o foco foi a eliminação do uso de glifosato para controle de plantas invasoras, por meio da adoção de práticas sustentáveis, priorizando métodos mais ecológicos e ambientalmente responsáveis. Utiliza-se também plantas de cobertura entre as linhas de café para reduzir pragas e doenças, prevenir a erosão, e melhorar a estrutura e umidade do solo. Além disso, emprega-se tecnologia com a instalação de armadilhas para monitoramento e controle da broca do café, bem como o mapeamento de pragas do solo para implementar estratégias de controle biológico (Fazenda, 2023).
Essas práticas contribuem significativamente para a redução do uso de máquinas agrícolas, resultando em uma redução das emissões de CO₂ e, conseqüentemente, na mitigação dos Gases de Efeito Estufa (GEE).



7 Projeto Expedição Carbono (Cerrado Mineiro): geração de dados mais precisos e eficientes sobre a cafeicultura e o impacto que ela vem proporcionando na remoção de carbono. O trabalho científico de responsabilidade do Programa de Pós-Graduação em Agronegócio da Universidade Federal de Goiás, sob a orientação da Prof^a Dr^a Cleonice Borges e da equipe de pesquisa do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, sob a orientação do Prof. Dr. Niro Higuchi. A equipe é composta de um Engenheiro Agrônomo (Diego Rezende) e quatro Engenheiros Florestais (Adriana Simonetti, Adélia Sampaio, Daisy Souza e Israel Sampaio-Filho) (Fazenda, 2023; INPA, 2024).



1.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No transcorrer de todo relato sobre a Fazenda Santa Bárbara, pôde-se vislumbrar não apenas uma trajetória agrícola, mas uma história de resiliência, reinvenção e compromisso com a excelência na produção de cafés especiais. Desde a sua fundação, passando pela transição de culturas até os dias atuais, a fazenda experimentou uma evolução notável sob a liderança de Juliana Rezende e sua família.

A Fazenda se destaca pelo cuidado rigoroso em todas as etapas do processo, desde o plantio até a xícara. O uso de tecnologias como a '*fingerprint*' na rastreabilidade do café, o controle preciso da curva de torra por profissionais habilitados e a análise detalhada do mel extraído na florada são fatores determinantes para a diferenciação e valorização do produto. O compromisso com a segurança alimentar é outro diferencial relevante, evidenciado pela ausência de uso de glifosato (apêndice 2) desde 2018. Esses cuidados refletem não apenas a preocupação com a qualidade final do café, mas também o respeito ao consumidor e ao meio ambiente.

A busca pela sustentabilidade, aliando práticas regenerativas e inovação, foi o fio condutor dessa jornada. Esse compromisso se reflete em práticas agrícolas responsáveis, na implementação de tecnologias avançadas e em manejos sustentáveis que preservam o solo e a água. A missão da fazenda, “fazer cafés especiais através de pessoas especiais”, transcende a produção agrícola, destacando a importância das pessoas envolvidas, desde uma equipe comprometida até os líderes visionários. Essas práticas têm o potencial de tornar a fazenda mais resiliente às oscilações do clima, garantindo uma produção sustentável e adaptada às adversidades ambientais, fortalecendo sua posição no mercado de cafés especiais e sua contribuição para a sustentabilidade global.

As premiações conquistadas pela Fazenda Santa Bárbara, seja pelo mérito sustentável, ético e rastreável, ou pelos reconhecimentos nacionais, validam o esforço incansável e a dedicação ao aprimoramento contínuo. A participação em eventos, como o Congresso Nacional de Mulheres Agro, evidencia não apenas o destaque na cafeicultura, mas também a contribuição significativa das mulheres na gestão e excelência no agronegócio.

Ao longo dos anos, a Fazenda Santa Bárbara não apenas se consolidou como produtora de cafés especiais de alta qualidade, mas também como um modelo inspirador de sustentabilidade, inovação e responsabilidade social. A trajetória de sucesso da fazenda reflete

a dedicação contínua à produção de cafés que não apenas encantam os paladares, mas também respeitam o meio ambiente, valorizam a comunidade local e promovem práticas éticas.

Em suma, a Fazenda Santa Bárbara é mais do que uma propriedade cafeeira; é um exemplo de como a paixão pela cafeicultura, aliada a uma visão social, sustentável e inovadora, pode transformar uma fazenda em um bastião de excelência, contribuindo para o fortalecimento do setor e inspirando outros produtores a trilharem caminhos similares.

REFERÊNCIAS

¹Fazenda Santa Bárbara cafés. O começo de tudo. Monte Carmelo, 29 de junho de 2020. Instagram: @ faz_santa_barbara_cafes. Disponível em: <https://www.instagram.com/p/CCBRFMqAKuP/>. Acesso em: 20 de novembro de 2023.

Andrade, V.G. Empreendedorismo feminino sustentável: um estudo sobre os modelos de negócios das muncípices de Barreirinha/AM. Trabalho de Conclusão de Curso/UFAM. 2022. Disponível em:< <https://riu.ufam.edu.br/handle/prefix/6586>>. Acesso em: 15 de maio de 2024.

Alves, E. A.; Souza, C.A.; Rocha, R.B.; Pereira, L.B.; Lima, P.P.; Lourenço, J. L. R. Efeito da fermentação na qualidade da bebida de robustas amazônicas. Revista Ifes Ciência, v. 6, n.3, p.159-170, 2020.

BAYER. Prêmio Mulheres do Agro, 2023. Disponível em:<<https://premiomulheresdoagro.com.br/>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

CONSELHO DOS EXPORTADORES DE CAFÉ DO BRASIL. CECAFE. Tudo sobre a safra (2023). Disponível em:<<https://www.cecafe.com.br/publicacoes/tudo-sobre-a-safra/>>. Acesso em 15 de out. 2023.

CENTRO DO COMÉRCIO DE CAFÉ DO ESTADO DE MINAS GERAIS. CCCMG. Cafés e qualidade, 2023. Disponível:< <https://cccmg.com.br/sustentabilidade-premiada-e-reconhecida-como-fator-de-qualidade-dos-cafes-no-cerrado-mineiro/>>. Acesso em: 06 de maio de 2023.

CONSELHO DOS EXPORTADORES DE CAFÉ DO BRASIL. CECAFE. Tudo sobre a safra (2023). Disponível em:<<https://www.cecafe.com.br/publicacoes/tudo-sobre-a-safra/>>. Acesso em 15 de out. 2023.

COOPERATIVA DOS CAFEICULTORES DO CERRADO. EXPOCACCER. 9ª premiação. 2021. Disponível em:< <https://expocaccer.com.br/blog/e-dada-a-largada-para-os-preparativos-da-etapa-campeoes-expocaccer/>>. Acesso em: 12 jun, 2023.

Cropster. Software for better coffee. Site oficial. 2024. Disponível em:< <https://www.cropster.com/>>. Acesso em: 30 de junho de 2024.

Dornelas, J. C. A. Empreendedorismo: transformando ideias em negócios. 7. ed. São Paulo: Empreende, 2018. 288 p.

Duarte, R. N.; Galina, S. V. R. Coopetição entre cafeicultores, cooperativas e associações: evidências no mercado brasileiro de cafés especiais. *Organizações Rurais & Agroindustriais*, v. 23, 2021. Disponível em: < <https://repositorio.usp.br/item/003070706>>. Acesso em: 08 jun. 2023.

EMATER. Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural. Prêmio mérito Sustentabilidade. 2024. Disponível em: <https://www.emater.mg.gov.br/portal.do/site-noticias/sustentabilidade-da-cafeicultura-e-destaque-na-abertura-da-sic-2023-/?flagweb=novosite_pagina_interna_noticia&id=27802> Acesso em: 11 de set. 2023.

Expocafé. Exposição de máquinas e tecnologias para a cafeicultura no Brasil. Troféu Mulher Inspiração da Cafeicultura, 2023. Disponível em: <<https://www.expocafeoficial.com.br/>>. Acesso em: 11 dez, 2023.

FAEMG. Federação da Agricultura e Pecuária do estado de Minas Gerais. Comemoração da Coroação do Rei Charles. 2023. Disponível em:< <https://www.faemg.org.br/noticias/agro-mineiro-na-coroacao-do-rei-charles-iii>>. Acesso em: 15 de junho de 2024.

FEDERAÇÃO DOS CAFEICULTORES DO CERRADO. Cerrado Mineiro. Denominação de Origem (2023). Disponível em:<<https://www.cafedocerrado.org/index.php?pg=denominacaodeorigem>>. Acesso em: 10 jun. 2023.

Frederico, S. Agricultura científica globalizada e fronteira agrícola moderna no Brasil. *Revista Confins*. Paris, vol. 17, p. 1-17, 2013.

Gephart, R. *Qualitative Research and the Academy of Management Journal*. *Academy of Management Journal*. v. 47, n. 4, 454-462, 2004.

Gil, Antonio Carlos. *Como elaborar projetos de pesquisa*. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

Globo Rural. Prêmio Fazenda Sustentável Globo Rural, 2023. Disponível em:<<https://globorural.globo.com/especiais/fazenda-sustentavel/noticia/2023/08/sustentabilidade-e-a-receita-de-um-cafe-especial.ghtml>>. Acesso em 12 set. 2023.

Gomes, M.T.S. Dinâmica econômica e cidades médias: uma análise sobre a cidade de Uberaba na região do Triângulo Mineiro. *Revista GEOUSP*, 2022. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/81733/195330#info>. Acesso em: 15 de out. 2023.

Gouveia, R. D. Distribuição espaço-temporal de chuvas no estado de Minas Gerais. Monografia (2023). Geografia. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: < <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/39956/1/Distribui%C3%A7%C3%A3oEspa%C3%A7oTemporal.pdf>>. Acesso em 10 de maio de 2023.

INPA. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Expedição Carbono. Disponível em: <<https://www.gov.br/inpa/pt-br>>. Acesso em: 15 de junho de 2024.

Moraes, M. Produção de café em 7 passos até o seu consumo! 2020. Disponível em: <https://agropos.com.br/producao-de-cafe/>. Acesso em: 20 de junho de 2024.

MonteCCer. Cooperativa dos Cafeicultores do Cerrado de Monte Carmelo Ltda. Site oficial Disponível em: <https://www.monteccer.com.br/>. Acesso em 15 de junho de 2024.

Nascimento, M. O., Celestino, S.M.C., Oliveira, L. L. Manual de análise sensorial descritiva de café. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, junho/2023, 41pg.

Nespresso. Certificação AAA. 2024. Disponível em: <https://www.nespresso.com/br/pt/sustentabilidade/manejo-cafe/programa-aaa>. Acesso em: 20 de junho de 2024.

Oliveira, A. C.; Oliveira, A.M.; Minozzo, M. G. M.; Judacewski, P. Efeito de diferentes métodos de secagem em *Coffea Canephora* produzido em diferentes altitudes no estado do Espírito Santo. Revista Ifes Ciência. v.7 n.1, p.01-09, 2021.

Rainforest Alliance. Café Certificado Rainforest Alliance. 2023. Disponível em: <<https://www.rainforest-alliance.org/pt-br/intuicoes/cafe-certificado-rainforest-alliance/>>. Acesso em: 11 de set. 2023.

Roda, N.M. et al. Manejo Sustentável da Produção de Café no Cerrado Mineiro: A Contribuição do Caulim para Cultivos Comerciais. Edição Especial - ANAIS do II Fórum Online de Educação, Meio Ambiente e Sustentabilidade Scientific Journal ANAP ISSN 2965-0364, v. 01, n. 02, 2023.

Roth, R. L. Efeitos da produção cafeeira no desenvolvimento socioeconômico brasileiro e seu impacto na balança comercial entre 2000 e 2018. Monografia. Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2019.

Sampaio, E. Qualidade de serviços: Um estudo multicaso nas cafeterias independentes da cidade de São Paulo. 2019, 182 f. Dissertação. (Mestrado em Agronegócio) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

Santa Barbara Coffee. Site oficial da Fazenda Santa Bárbara. 2023. Disponível em: <<https://santabarbaracoffee.com.br/>> Acesso em: 05 de set. de 2023.

Santa Barbara Coffee^A. Certificações. Aba: A Fazenda. 2023. Disponível em: <<https://santabarbaracoffee.com.br/a-fazenda/>> Acesso em: 05 de set. de 2023.

Santa Barbara Coffee^B. Missão da Fazenda. Aba: Origem. 2023. Disponível em: <<https://santabarbaracoffee.com.br/origem/>> Acesso em: 16 de set. de 2023.

Santa Barbara Coffee^C. Análises realizadas no café. Aba: Laboratório. 2023. Disponível em: <<https://santabarbaracoffee.com.br/laboratorio/>> Acesso em: 21 de set. de 2023.

Santa Bárbara Coffee^D. Prêmios ganhos pela fazenda. Aba: Prêmios. 2023. Disponível em: <<https://santabarbaracoffee.com.br/premios/>> Acesso em: 25 de out. de 2023.

SEAPA. Secretaria de Estado de Agricultura, Pecuária e Abastecimento de Minas Gerais. Certifica Minas Café. 2023. Disponível em: <http://www.agricultura.mg.gov.br/certificaminas/website/index.php/pages/cert-cafe>. Acesso em: 11 de set. 2023

SEBRAE. Serviço Brasileiro de Apoio às Micro e Pequenas Empresas. Prêmio Mulher de Negócios, 2024. Disponível em: <<https://sebrae.com.br/sites/PortalSebrae/empreendedorismofeminino/premiomulherdenegocios>>. Acesso em: 12 dez. 2023.

Silva, F. A. A. C., Santos, V. C., Rocha D., Moura, F. C. S., Ferreira, N. A. G., Dornelas, A. M. A. Revista Foco, Curitiba (PR), v.15.n.5, p.01-22, 2022.

Souza, L. L. E. A dinâmica da cafeicultura nos municípios de Araguari, Monte Carmelo e Patrocínio. Monografia (2020). Ciências Econômicas. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <<https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/30859/4/Din%C3%A2micaDaCafeicultura.pdf>>. Acesso em 01 de maio de 2023.

CAPÍTULO 2. Alometria para estimativa de biomassa total e de carbono do Café (*Coffea arabica*) sem processo de poda

2.1. INTRODUÇÃO

A alometria desempenha um papel fundamental na estimativa de biomassa e no cálculo do carbono armazenado em diferentes sistemas vegetais, sendo uma ferramenta necessária para estudos de sustentabilidade e mitigação da mudança do clima. Por meio de equações alométricas, é possível quantificar a remoção de carbono de forma eficiente e precisa, contribuindo para entender o papel dos sistemas agropecuários, como o cultivo de café no Cerrado Mineiro, na captura de dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera (IPCC, 2019).

Estudos como os de Poorter et al. (2011) e Chave et al. (2014) destacam a aplicabilidade das equações alométricas na avaliação da biomassa acima e abaixo do solo, enquanto pesquisas específicas sobre sistemas agrícolas, como as de Kuyah et al. (2012), evidenciam a relevância dessas metodologias em áreas de cultivo. Assim, o manejo sustentável dessas áreas agrícolas não garante apenas a produtividade, mas também potencializa seu papel como sumidouros de carbono, contribuindo significativamente para a redução de gases de efeito estufa e o combate à mudança climática global.

As questões socioeconômicas desempenham um papel imprescindível no desencadeamento das questões ambientais, particularmente nas emissões de gases de efeito estufa (GEE). O crescimento populacional e o desenvolvimento econômico impulsionam a demanda por energia, alimentos, transporte e habitação, resultando em maior consumo de combustíveis fósseis e desmatamento. Atividades industriais e agrícolas intensivas, frequentemente motivadas por interesses econômicos, liberam grandes quantidades de CO₂, metano e outros GEE's na atmosfera (EMBRAPA, 2024).

A urbanização descontrolada e a expansão agrícola levam à destruição de ecossistemas naturais, reduzindo a capacidade de absorção de carbono das florestas e aumentando as emissões. A desigualdade econômica também agrava o problema, pois comunidades mais pobres, com menos acesso a tecnologias limpas, frequentemente dependem de práticas insustentáveis para a subsistência. Assim, as pressões socioeconômicas, se não geridas de forma sustentável, amplificam as emissões de GEE, contribuindo significativamente para a mudança climática e a degradação ambiental (EMBRAPA, 2024).

Tão logo, a necessidade de estimar as emissões de carbono torna-se imperativa para compreender e controlar o impacto das atividades humanas sobre o meio ambiente. Diversas análises e metodologias estão disponíveis para esse fim, como inventários de emissões, análises de ciclo de vida (ACV) e uso de tecnologias de monitoramento, que permitem quantificar as emissões de GEE em diferentes setores. Essas ferramentas não apenas ajudam a identificar as principais fontes de emissões, mas também facilitam o desenvolvimento de estratégias eficazes para reduzi-las (SEEG, 2023).

A remoção de carbono e a estocagem de carbono, destaca-se atualmente frente aos problemas relacionados à mudança climática. Esta “remoção” é possível porque a vegetação realiza fotossíntese, processo durante o qual as plantas retiram carbono da atmosfera, em forma de CO₂, e o incorporam à sua biomassa (tronco, galhos e raízes). Desta forma, foi proposto pelo Protocolo de Quioto, o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) que funciona como um instrumento que possibilita que países industrializados negociem com países em desenvolvimento através de projetos que evitem a emissão de GEE (Nascimento, 2019).

Por conseguinte, analisar os desafios que se colocam para uma produção de café do Cerrado compatível com os princípios do desenvolvimento sustentável, unindo preservação e lucratividade tornam-se cada dia mais desafiadores. Tornar a cultura rentável economicamente de modo a garantir a sucessão familiar no campo, bem como, reduzir graves problemas ambientais das últimas décadas, causados por vezes, pela atividade antrópica excessiva nas principais *commodities*, sendo uma delas, o café.

No bioma Cerrado, seu solo e suas plantas com raízes profundas permitem que o mesmo seja capaz de estocar grande quantidade de água das chuvas, o suficiente para distribuí-la para milhões de nascentes, como também reter milhões de toneladas de dióxido de carbono – drenando CO₂ da atmosfera e mantendo significativos estoques de carbono na vegetação e no solo (Bergamaschine, 2018).

Portanto, é fundamental a compreensão do ciclo global do carbono, sendo, necessário, a precisão na estimativa da biomassa. Ao agregar valor às atividades que já priorizam a mitigação de GEE, a partir da sustentabilidade, é possível promover práticas agrícolas e industriais mais limpas, incentivar o uso de energias renováveis e implementar sistemas de gestão de resíduos mais eficientes. Adotar tais medidas contribui para a construção de uma economia de baixo carbono, além de oferecer benefícios econômicos e sociais, como a criação de empregos verdes e a melhoria da qualidade de vida das comunidades (SEEG, 2023). Dessa forma, a integração de análises precisas de emissões de carbono com práticas sustentáveis é

essencial para enfrentar os desafios da mudança do clima e garantir um futuro mais resiliente e equilibrado.

2.1.1 REVISÃO DA LITERATURA

2.1.1.1 Biomassa e carbono: contexto geral

A biomassa vegetal tem sido um dos temas mais discutidos nos últimos anos, principalmente relacionado com o seu papel sobre a mudança climática global. Segundo o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2019), as florestas, a agricultura e outros sistemas, que podem absorver e armazenar carbono, são chamados de “sumidouros”. Esses são depósitos naturais que absorvem e capturam o CO₂ da atmosfera, reduzindo sua presença no ar (IPCC, 2019). A biomassa ou fitomassa é definida como a quantidade, expressa em unidades de massa, do conteúdo de material vegetal por unidade de área em uma floresta ou plantio (Araújo et al., 1999).

Em 1992, durante a Conferência das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas que aconteceu no Rio de Janeiro, também conhecida como Rio 92 ou Cúpula da Terra, foi aprovada a Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas (UNFCCC) ou simplesmente Convenção do Clima. O tratado, assinado por representantes de 179 países, visa minimizar os problemas ambientais mundiais, a partir de um modelo de crescimento econômico e social que alia preservação ambiental e equilíbrio climático em todo o planeta. Para tanto, os países signatários, denominados Partes da Convenção, definiram compromissos e obrigações, com base no princípio da responsabilidade comum, mas diferenciada (BRASIL, 2024).

Antes da Convenção do Clima em 1992, havia no Brasil, alguns estudos voltados à estimativa da massa de plantas como o de Loetsch et al. (1973) e Brown et al (1989), cujo foco estava nos estoques de nutrientes, numa tentativa de equilibrar a saída pelas colheitas (atmosférica) e as entradas (por meio da fertilização), essas práticas buscavam desenvolver métodos mais precisos e eficazes de gestão dos recursos agrícolas. Na agricultura, esse equilíbrio era, prioritariamente, entendido pela análise de nutrientes no solo. Na Amazônia, a baixa fertilidade natural do solo contrastava com a exuberância da cobertura florestal. De acordo com o *chapter 4 (Amazonian ecosystems and their ecological functions)* (IPCC, 2021), o interesse científico pela massa das árvores da Amazônia era movido, principalmente, pela baixa presença de alguns nutrientes no solo. A hipótese inicial nesses estudos pioneiros era de que, sem nutrientes no solo, eles estariam na biomassa. Esse mistério continua na maior parte da Amazônia já que alguns macronutrientes não são encontrados no solo e nem nas árvores.

Ademais, para Higuchi et al., (1998) e Araújo et al., (1999) essa fina camada fértil é oriunda da própria floresta, nela os organismos (insetos, fungos, algas e bactérias) vivos que reciclam os nutrientes dispostos no ambiente. Além disso, outros fatores contribuem para o processo, como a temperatura, que permanece alta o ano todo; a enorme umidade relativa do ar presente na região e a restrita variação do clima. Tudo isso garante a sustentação da floresta Amazônica.

Após a Rio 92, o IPCC publicou o primeiro guia de boas práticas para inventários nacionais das emissões de GEE para os setores de agricultura, floresta e outros usos da terra (AFOLU, sigla no inglês). Segundo o guia (IPCC, 2003), no contexto dos inventários, devem ser considerados os seguintes componentes da planta: (1) Biomassa ou carbono (C) na matéria viva acima do nível do solo (tronco, galhos, folhas, frutos e flores); (2) Biomassa ou C na matéria viva abaixo do nível do solo (raízes grossas com diâmetro de colo $\geq 2\text{mm}$); e, (3) Biomassa ou C na matéria morta em pé ou no chão – necromassa. Ao mesmo tempo, o IPCC introduziu níveis de categorias de estimativas (da biomassa ou do C, por exemplo), da seguinte maneira: (1) categoria 1 – pouco conhecimento, “default” do IPCC ou informações da literatura; (2) categoria 2 – condições de estimar os estoques do projeto, com equações próprias e inventário de campo; (3) categoria 3 – combinação de inventário de campo e sensoriamento remoto (modelagem), condições para escalar no espaço e no tempo, para vários projetos, vários municípios etc.

O IPCC (2006) dedica um capítulo inteiro (*chapter 3*) de 66 páginas sobre “incertezas” das estimativas. A incerteza pode ser definida como a falta de conhecimento do valor verdadeiro que pode ser descrito como uma função de densidade probabilística que caracterize o intervalo e as semelhanças dos possíveis valores. É a margem de erro da média estimada em relação à média verdadeira da população. O guia de boas práticas recomenda a utilização do intervalo de confiança com 95% de confiança (p). Da fórmula abaixo, do intervalo de confiança (IC), a incerteza é o produto que vem seguido do mais ou menos (\pm), para populações infinitas (teste-z) ou finitas (teste-t).

$$IC(p) = \bar{x} \pm z^* e_{\bar{x}} \quad \text{ou} \quad IC(p) = \bar{x} \pm t^* e_{\bar{x}}$$

$$\bar{x} = \text{média aritmética} \quad e_{\bar{x}} = \text{erro padrão da média}$$

Equação 01. Intervalo de confiança

A agropecuária brasileira está inserida no debate sobre mudança do clima, desde a aprovação da Convenção do Clima, em 1992. No início, a preocupação estava atrelada,

principalmente, às questões de emissões pela supressão da cobertura florestal. Mais tarde, as remoções pelas plantas utilizadas na agropecuária começaram a ganhar espaço nesse debate. Atualmente, o grande debate é o entendimento das vulnerabilidades (variabilidade e extremidade climática, mudanças na temperatura e precipitação, degradação do solo, dentre outras) da agropecuária sob os efeitos da mudança do clima da Idade Contemporânea. No debate atual, é necessário se apoiar em métodos diretos e indiretos confiáveis para estimar os estoques de biomassa das plantações para entender essas vulnerabilidades e, com isso, se preparar para as possíveis adaptações (IPCC, 2019; Higuchi *et al.*, 2022).

2.1.2. Equações alométricas para estimativa de biomassa

De uma planta ou de uma árvore se extrai, principalmente, água e carbono. Do peso total de uma árvore viva da Amazônia, 40% é água e 30% é carbono (Silva, 2007). Água e carbono dão origem aos três principais precursores de GEE's, vapor d'água, dióxido de carbono (CO₂) e metano (CH₄); apesar de ser GEE, o vapor d'água não consta da lista de GEE da Convenção do Clima (UNFCCC, 2024).

No contexto da mudança climática global, as equações de regressão são chamadas de equações alométricas. A alometria é composta das palavras *allos* (outra) e *metron* (medida), ambas em grego (Niklas, 1994). É o estudo das variações das formas e dos processos dos organismos e tem dois significados: (I) o crescimento de uma parte do organismo em relação ao crescimento do organismo inteiro ou de parte dele e (II) o estudo das consequências do tamanho sobre as formas e os processos. Na área florestal, é o estudo da biomassa (todo) em função de partes do todo (diâmetro a altura do peito (DAP), altura total e altura comercial).

Em florestas, o DAP, medido a 1,3 m do solo, é uma variável que tem demonstrado, em qualquer situação ou bioma, correlação positiva e significativa com o peso da árvore. A altura total é uma variável que, segundo Loetsch et al. (1973), caracteriza o sítio em que a floresta se desenvolve. A presença dessa variável no modelo é fundamental quando ele é utilizado para estimar estoques de biomassa vegetal em regiões afastadas de sua origem (dos dados). A altura comercial é o comprimento do tronco que vai da base até a primeira inserção significativa de galhos. Essa variável não é tão biológica quanto a total, mas pode ser um diferenciador importante entre árvores com o mesmo DAP. Essa altura é mais fácil de ser medida, no campo, do que a altura total, por ser próxima ao solo (Silva, 2007).

A medida da altura comercial é essencial para o manejo agrônomico, estimativas de biomassa e avaliação econômica. Ela facilita práticas de poda e colheita, melhora a precisão

das equações alométricas para estimar biomassa e a remoção de carbono, e reduz a variabilidade nas medições, proporcionando consistência nos dados. Além disso, plantas com altura uniforme são mais fáceis de colher mecanicamente, aumentando a eficiência e reduzindo os custos operacionais (Meireles et al., 2020).

A biomassa pode ser avaliada por métodos diretos e indiretos, cada um com seus pontos positivos e negativos. Entre os métodos indiretos, destacam-se o sensoriamento remoto e as equações alométricas, que permitem estimativas práticas e abrangentes, mas que podem apresentar incertezas. Já os métodos diretos incluem as análises destrutivas, que foram adotadas neste caso. Esse método, embora mais caro e laborioso, oferece maior precisão. No processo, a avaliação da biomassa inicia-se com a derrubada da planta e a pesagem de seus diferentes componentes, como raízes, tronco, galhos, folhas, flores e frutos, garantindo uma análise detalhada e assertiva da biomassa total (Kuyah et al., 2012; Silva, 2007). Após obter o peso total da planta e discriminar o peso dos vários componentes, são retiradas amostras de cada parte para secagem a 65°C até que o peso se estabilize, permitindo a determinação do teor de água e dos nutrientes, com foco especial no carbono devido às implicações da mudança climática (Silva, 2007). Esta abordagem, conhecida como "verdade de campo", fornece dados cruciais que alimentam as equações alométricas usadas para descrever a relação entre a biomassa e variáveis independentes da planta, como o diâmetro à altura do peito (DAP) e a altura total (Silva, 2007). Há autores que defendem a inclusão da densidade da madeira como variável independente (Overman *et al.*, 1994; Chave *et al.*, 2005).

Os modelos utilizados para descrever a relação entre a biomassa e as variáveis independentes da árvore originam-se dos modelos alométricos, de biomassa e de aplicação local para volume de madeira (Santos, 1996; Higuchi et al., 1998; Araújo et al., 1999). Esses modelos têm produzido resultados satisfatórios, com coeficiente de determinação (r^2) sempre superior a 0,90. A questão que emerge é sobre a relação custo-benefício ao introduzir esta variável a um modelo que apresenta $r^2 = 0,90$. Outra questão é conceitual, já que a densidade da madeira é a relação entre massa e volume.

Dependendo do número de variáveis independentes, o modelo pode ser simples ou múltiplo e, dependendo da natureza das equações, podem ser lineares e não lineares. Em geral, os modelos não lineares são linearizados utilizando-se da transformação em logaritmo (natural ou base 10). Furnival (1961), Sprugel (1983) e Santos (1996) apresentam fórmulas para correção do erro padrão de estimativa, principalmente, quando se querem comparar modelos

logarítmicos e não logarítmicos. Com avanço dos programas estatísticos, a transformação de modelos não lineares em lineares, já não faz mais sentido.

West et al. (1999) apresentam o seguinte modelo alométrico para biomassa, como universal para qualquer bioma.

$$M = a D^b$$

Equação 02. Modelo alométrico para biomassa (West et al., 1999)

onde: **M** = massa seca acima do solo;

D = DAP;

a = coeficiente de escala; e,

b = expoente da escala.

Este modelo é baseado na teoria da distribuição de recursos por meio do conjunto de galhos hierárquicos das plantas vasculares. O pressuposto deste modelo é que as variações relacionadas com tamanho podem ser caracterizadas por este modelo com um expoente universal, que são simples múltiplos de ¼ (West et al. 1999). Segundo Pilli et al. (2006), o expoente universal pode assumir diferentes valores de acordo com os estágios das plantas.

Entretanto, Kozłowski e Konarzewski (2004) consideram que esse modelo não tem fundamentação biológica e nem matemática. De outro lado, Zianis e Mencuccini (2004) e Pilli et al., (2006) simularam diferentes expoentes e aplicaram sobre o modelo original em diferentes tipos florestais e concluíram que o modelo é confiável, mas sem o expoente universal. Os argumentos em favor do modelo de West et al. (1999) estão relacionados com a eliminação do método destrutivo. Mais sensato e mais seguro é utilizar o método destrutivo para estimar os coeficientes **a** (de escala) e **b** (expoente do coeficiente de escala) (Brown et al., 1989; West et al. 1999).

O modelo de Brown, West e Enquist (Brown et al., 1989; West et al. 1999), que consideram variáveis como DAP, altura total e a forma do tronco tem sido amplamente utilizado em alometria de biomassa de árvores. Na realidade, esse modelo tem sido linearizado utilizando-se do logaritmo natural para a transformação dos dados. O modelo assume, então, a seguinte forma

$$\ln PF = a + b \ln D$$

Equação 03. Modelo de Brow, West e Enquist (Brown et al., 1989; West et al. 1999)

sendo: **PF** = peso da massa fresca em kg, em vez de **M** e

D = DAP em cm (Santos, 1996 e Higuchi et al., 1998).

2.1.3. Intensidade amostral para coletas destrutivas

Nos livros clássicos de inventário florestal e de dendrometria não há fórmulas para o cálculo da intensidade de amostragem para as equações alométricas para volume ou biomassa (Husch et al., 1972; Loetsch et al., 1973; Péllico Netto e Brena, 1997, Campos e Leite, 2002; Machado e Figueiredo Filho, 2003 e Sanquetta et al., 2006). Em geral, essas coletas são demoradas e caras. Para superar isso, a alternativa é utilizar-se de métodos que trabalham com dados de distribuição livre. Um dos métodos alternativos é o “*jackknife*”.

2.1.3.1 Método “*jackknife*”

Segundo Schreuder e Brink (1983), Quenouille (1956) introduziu, pela primeira vez, em 1949, um método de redução de tendência (*bias*, em inglês) de uma estimativa, que foi rotulada, mais tarde, como “*jackknife*” por John W. Tukey, em um trabalho não publicado. O nome “*jackknife*” foi usado para refletir a utilidade versátil desse método analítico. Efron (1982) descreveu o método como uma preciosidade estatística ainda não totalmente lapidada. Duncan (1978) afirma que, talvez, um dos aspectos mais úteis do método é que o modelo matemático pode ser desdobrado e os pseudovalores podem ser analisados separadamente. De acordo com Efron e Gong (1983), este método pode ser aplicado em qualquer estatística que seja uma função de n variáveis independentes e identicamente distribuídas. Segundo Schreuder e Brink (1983), este método tem sido muito utilizado na redução de tendência de dados de distribuição livre como também para a estimativa do erro padrão.

O método “*jackknife*” reutiliza a amostra várias vezes, dividindo os dados em subgrupos para recombiná-los, em seguida, para estimar os parâmetros desconhecidos (Bissel e Ferguson, 1975). Este método foi, originalmente, formulado para eliminar tendência em uma ordem de $1/n$ de um estimador (Quenouille, 1956). Em geral, a tendência dos estimadores práticos é, aproximadamente, inversamente proporcional ao tamanho da amostragem e, neste caso, o “*jackknife*” frequentemente produz uma melhoria substancial (Bissel e Ferguson, 1975). Um outro aspecto é que o “*jackknife*” dá uma medida precisa da variabilidade baseada apenas nos dados observados. Este método estima a variabilidade de diferenças ponderadas entre as estimativas computadas de todos os dados e estimativas quando cada subgrupo é removido. De acordo com Mosteller (1971), ao computar essas diferenças, um grupo de números é obtido, e frequentemente pode ser usado como se fosse normalmente distribuído.

Os coeficientes de regressão, o coeficiente de determinação e o erro padrão de estimativa pode ser submetidos ao “*jackknife*” para r subgrupo, como segue:

$$\bar{\theta}_* = (1/r) \sum_{j=1}^r \hat{\theta}_{*j}$$

Média aritmética do coeficiente ou do erro submetido ao “*jackknife*” de r subgrupos

Em que:

$$\hat{\theta}_{*j} = (r) \hat{\theta} - (r-1) \hat{\theta}_{-j} \Rightarrow \text{pseudo valor, para } j = 1, 2 \dots r$$

$$\hat{\theta} \Rightarrow \text{estimativa de cada subgrupo}$$

$$\hat{\theta}_{-j} \Rightarrow \text{estimativa parcial com exclusão do } j\text{-ésimo subgrupo}$$

Equação 04. Coeficientes de regressão

Esse método foi aplicado com êxito em equações de volume para árvores da Amazônia (Higuchi, 1992). Antes, Yang e Kung (1983) tinham aplicado este método, com sucesso, a um problema prático florestal com um povoamento equiano de *Cryptomeria japonica*.

2.1.4. Tamanho e forma de parcelas para o inventário florestal

No planejamento de inventários florestais, o profissional tem duas alternativas: fixa o custo do trabalho ou a precisão. Em geral, os inventários são realizados com a fixação dos custos e a precisão é estimada após os trabalhos de campo. Segundo Péllico Netto e Brena (1997) e Sanquetta et al. (2006), o limite de erro para inventários florestais é de 10%. Para inventários de emissões e remoções de carbono de plantas, mais importante do que a média aritmética, é a incerteza (ou limite de erro), desde que as condicionantes da distribuição normal não sejam violadas.

Em geral, os plantios tendem a seguir a distribuição normal. Neste caso, é importante definir o tamanho da parcela amostral para inventários florestais em plantações, seja para volume ou para biomassa. Num plantio de teca no sul de Benin, Atindogbe et al. (2011) concluíram que parcelas de 400 m² são suficientes, assim como faixas com número fixo de árvores (5, 10 e 15). Couto (2008) recomenda parcelas que devem ter, no mínimo 30 árvores, como nos plantios equiâneos (mesma idade). Para plantios de alta variabilidade e dissintâneos o tamanho da parcela deve conter mais de 50 árvores.

Tentando combinar as sugestões de Couto (2008) e Atindogbe et al. (2011), os inventários de biomassa de cafezais, pela primeira vez, citam o café e podem obedecer a um layout do tipo conglomerado (Figura 13), ou seja, um conglomerado para cada 20 hectares

plantados. Esse arranjo permitirá uma análise de variância para testar a hipótese: os conglomerados são iguais. Se a hipótese não for rejeitada, a análise poderá ser realizada com base na amostragem inteiramente aleatória. Se for rejeitada, a análise dos dados com base nos princípios da amostragem aleatória restrita, estratificada, será mais apropriada.

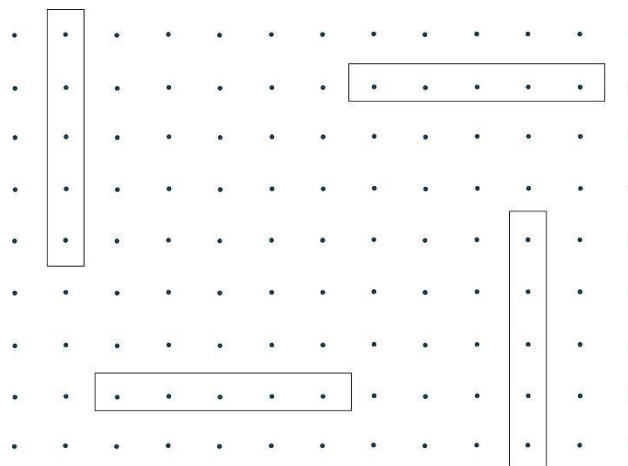


Figura 13. Conglomerado para inventário de biomassa de cafezal, com 4 unidades contendo 5 árvores de café cada.

Fonte: Atindogbe et al. (2011) e Couto (2008).

2.1.5. Biomassa de plantas de café

O café está intimamente relacionado com a mudança do clima devido à sua sensibilidade às variações de temperatura e precipitação, que afetam diretamente a produção, qualidade e distribuição geográfica do cultivo. O aquecimento global pode aumentar a incidência de doenças e pragas, alterando as condições ideais para o cultivo e deslocando as regiões produtoras (Bunn, Läderach e Rivera, 2015). Por outro lado, os cafezais podem contribuir para a mitigação da mudança climática através da remoção de carbono na biomassa das plantas e a adoção de práticas sustentáveis, como cultivo agroflorestal e certificações ambientais. A pesquisa e o desenvolvimento de variedades resilientes e o uso de tecnologias de monitoramento são cruciais para adaptar o cultivo às novas condições climáticas (Läderach et al., 2017).

A cafeicultura brasileira desempenha papel importante na economia nacional; daí a necessidade de conhecimentos e de planos adequados para se preparar aos diferentes cenários da mudança do clima (Coltri et al., 2019). No Brasil, Coltri et al. (2019) demonstraram preocupação relacionada com os possíveis impactos da mudança do clima sobre as plantações de café sob diferentes regimes, sob sol ou sob sombra. Esses autores sugerem modelos de

simulação para complementar as medições em campo. A combinação de campo com sensoriamento remoto e modelagem pode qualificar a estimativa (de biomassa, neste caso) no nível mais alto (IPCC, 2003), que seria o ideal para a cafeicultura brasileira. Em geral, os estudos sobre biomassa do café são relacionados com o *Coffea arabica*.

As medições de campo (alometria e inventário de biomassa) são obrigatórias para o inventário de emissões e remoções de gases de efeito estufa (GEE) dos plantios (IPCC, 2006). A Decisão 4 da Conferência das Nações Unidas sobre as Mudanças Climáticas (COP15) em Copenhague (IPCC, 2009) definiu, ainda que seja para o REDD (Redução de Emissões por Desmatamento e Degradação florestal), os procedimentos para inventários para projetos que envolvam o balanço entre emissões pelas fontes e remoções pelos sumidouros. Isso está no item 1.d.(i), na página 12 desta decisão, que estabelece que os inventários do balanço entre emissões e remoções têm que utilizar a combinação de sensoriamento remoto e inventário de campo; como também para se reportar sobre os estoques de carbono florestal e as mudanças das áreas florestais. Diante da ausência de guias do IPCC para a cafeicultura, o bom senso indica que deve ser utilizado o mesmo para as florestas, com as devidas adaptações.

Em consultas no *Web of Science* foram encontradas equações de biomassa para estimar a biomassa do café, desenvolvidas na Nicarágua (Segura et al., 2006), Colômbia (Andrade et al., 2018 e Andrade et al., 2021), Costa Rica (Defrenet et al., 2016) e na Indonésia (Meirelles et al., 2019). No Brasil, o único trabalho que testa diferentes equações alométricas é de Coltri et al. (2015) motivada pelo fato que as equações desenvolvidas em outros países subestimam a biomassa da parte aérea. O trabalho de Meirelles et al. (2019) apenas aplica diferentes equações para comparar a biomassa de sistema agroflorestal (SAF) orgânico com SAF convencional; essas equações foram desenvolvidas em plantações de café da Nicarágua, Colômbia, Costa Rica e Indonésia.

No trabalho de Coltri et al. (2015) foram testados 4 modelos alométricos, sendo dois modelos utilizando apenas com a circunferência a 10 cm do solo (**ct**), como variáveis independentes e dois com a altura total (**h**). São modelos de regressão múltipla sendo **ct** a primeira variável independente e as demais como potências de **ct** ou **ct** associada a uma constante. Segundo Weter e Wasserman (1974), esses polinômios com uma única variável independente podem gerar a colinearidade ou a multicolinearidade. Quando as variáveis independentes são altamente correlacionadas, não somente os coeficientes de regressão tendem a ser imprecisos (erráticos de caso a caso, de planta a planta), como também os coeficientes de correlação parcial entre a variável dependente e cada uma das variáveis independentes

(altamente correlacionadas). Isso afeta também a interpretação da análise de variância de regressão.

2.2 MATERIAL E MÉTODOS

2.2.1 Caracterização da área de estudo e localização

A Fazenda Santa Bárbara, objeto do presente estudo, está situada no município de Monte Carmelo/MG (Figura 14). Inserida no Bioma do Cerrado, localiza-se a 15 km da zona urbana. Suas coordenadas geográficas são 18°47'17.09"S, 47°33'45.72"O, com uma altitude de 940 metros.

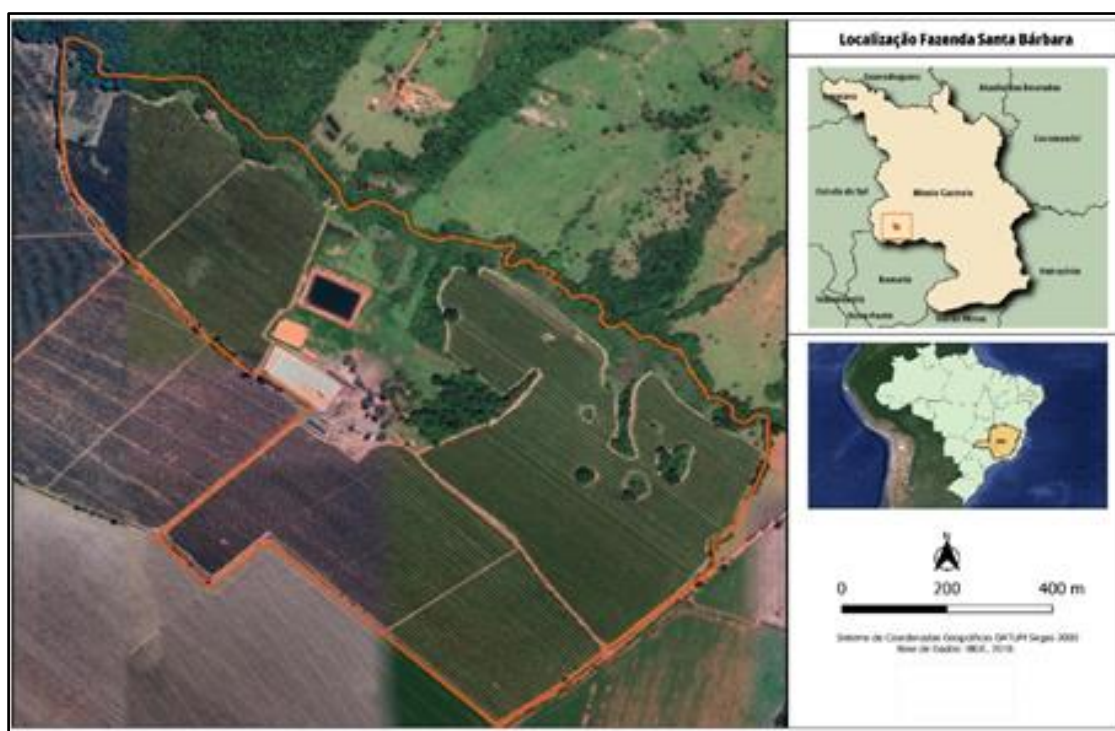


Figura 14. Delimitação da área da Fazenda Santa Bárbara no município de Monte Carmelo/Minas Gerais.
Fonte: Software QGis – Versão 3.24 (2024) /próprio autor.

O relevo da região varia de plano a suave ondulado e o solo é classificado como Latossolo vermelho, de acordo com os critérios da Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA, 2013). Os solos possuem características das regiões tropicais, muito intemperizados e de baixa fertilidade natural. Há maior ocorrência de solos Latossolo Vermelho distroférico de textura argilosa (CECAFE, 2023). O clima predominante na região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Aw, ou seja, clima tropical, com inverno

de temperaturas mais baixas e períodos de seca (maio e julho com máxima diária em média abaixo de 26 °C, junho com a máxima de 25°C e mínima de 15 °C, em média), e verão com altas temperaturas e alta precipitação (de setembro a novembro com máxima média diária acima de 31 °C) (SISMET, COOXUPÉ, 2021). A temperatura mínima anual oscila entre 6 °C e 15 °C e a máxima de 30 °C e 38 °C. A umidade do ar atinge níveis muito baixos no inverno seco, chegando a 18% e níveis muito elevados no verão chuvoso de até 98% (SISMET, COOXUPÉ, 2021). A precipitação pluviométrica teve concentração entre o período de outubro a abril, com maior distribuição de chuva no mês de dezembro (Gouveia, 2023).

A Fazenda Santa Bárbara, objeto deste estudo, abrange uma área total de 88,97 hectares, dos quais 63,96 hectares são dedicados ao plantio de café (*Coffea arabica*) (Figura 15). Os plantios são divididos da seguinte forma:

- 15,81 ha da cultivar Mundo Novo - idade 6 anos;
- 22,39 ha da cultivar Mundo Novo - idade 4 anos;
- 16,15 ha da cultivar Topázio - idade 5 anos;
- 8,01 ha da cultivar Topázio - idade 4 anos.
- 1,6 ha de cultivares exóticas - plantadas nos finais das ruas das citadas anteriormente (utilizando o mesmo espaço).

O espaçamento adotado é de 3,8 m entre linhas e 0,7 m entre plantas. A lavoura é toda dividida em talhões e conduzida sob irrigação via gotejamento, conforme figura abaixo. O manejo da calagem e as adubações são realizadas de acordo com as recomendações do livro 5ª aproximação para o estado de Minas Gerais.

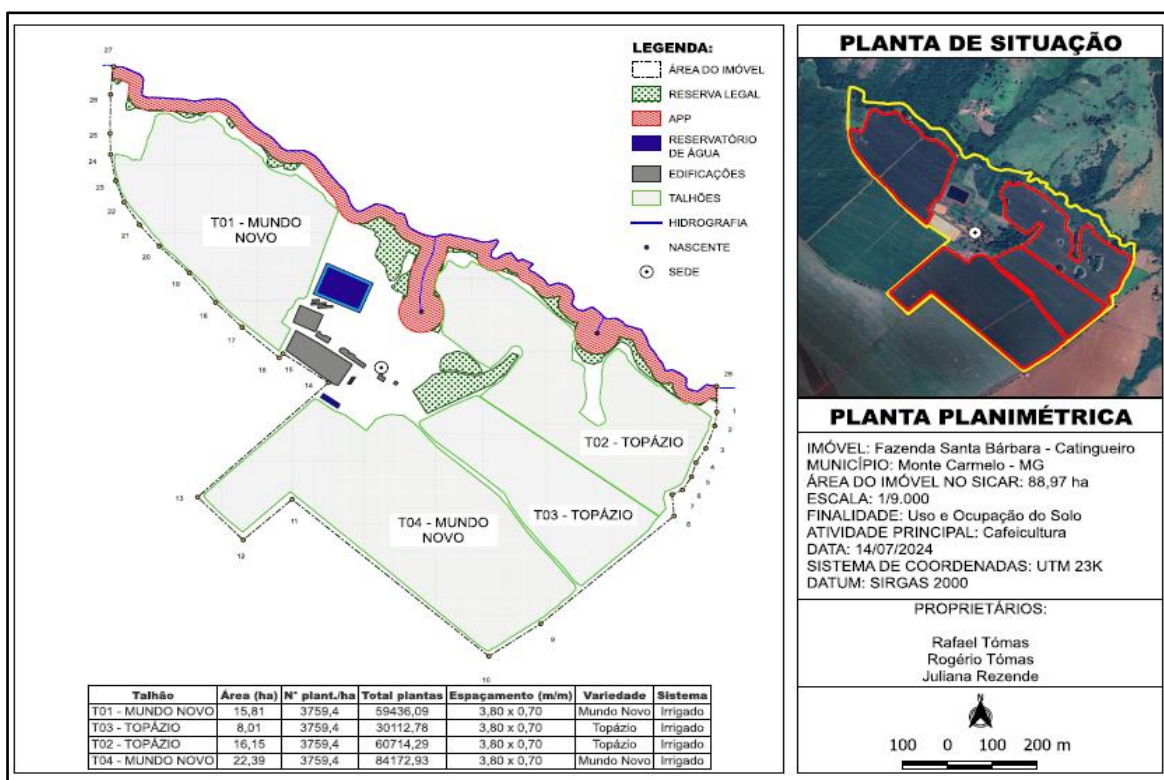


Figura 15. Distribuição das cultivares – Fazenda Santa Bárbara.

Fonte: Software QGis – Versão 3.24 (2024) /próprio autor.

A cultivar estudada foi a Mundo Novo, escolhida por representar uma parcela significativa das lavouras da região e de todo o Brasil, destacando-se por sua rusticidade, porte alto, excelente qualidade de bebida além de elevada produção de café beneficiado, aliada a ótimo aspecto vegetativo. As plantas adultas, com 12 a 14 anos, podem alcançar altura média de 3,4 m (3 a 3,8m) e diâmetro da copa médio, a 0,5 m do solo, de 2,0 m (1,4 a 2,7 m) (Consórcio Pesquisa Café, 2024). Durante o período de coleta de dados, as plantas de café estavam no início da fase vegetativa de expansão dos frutos (Figura 16).



Figura 16. Fase vegetativa – Expansão dos frutos.
Fonte: Próprio autor (2021).

2.2.2 Coleta de dados: biomassa

As coletas foram realizadas entre os dias 29 de novembro e 11 de dezembro de 2021, período final da fase fenológica (florada, chumbinho e expansão dos frutos). Foram selecionadas de forma aleatória (excluindo-se as plantas das bordaduras), 12 plantas para quantificação de biomassa, representando fielmente a lavoura objeto de estudo. A amostragem foi realizada de forma destrutiva², envolvendo a derrubada da vegetação. Destas, foram escolhidas seis plantas com idade de quatro anos e seis plantas com idade de seis anos. Cada parcela continha 3 plantas, totalizando duas parcelas para cada faixa etária, espaçadas por 15 ruas entre elas.

As estimativas do estoque de carbono acima e abaixo do solo seguiram a metodologia proposta por Silva (2007). Neste estudo a autora seguiu as categorias de biomassa consideradas pelo IPCC (2003), onde não se considera as raízes finas (diâmetro de colo inferior a 2 mm). Segundo o IPCC (2006), essas raízes não podem ser separadas, empiricamente, da matéria orgânica. Neste estudo com a planta café, todas as raízes foram lavadas e separadas de outras partes da planta (Figura 17), o que permitiu estratificá-las em finas e grossas. Assim, aqui foram consideradas as seguintes categorias:

- i) **Acima do solo (ou biomassa aérea):** toda a biomassa viva acima do solo, incluindo folhas, galhos, tronco, flores e frutos.

² A metodologia destrutiva apresenta desafios significativos devido ao seu alto custo operacional e à complexidade dos processos envolvidos. Além da necessidade de equipamentos específicos e mão de obra qualificada, essa abordagem demanda tempo e recursos elevados, tornando sua aplicação menos viável em larga escala.

ii) **Abaixo do solo:** toda a biomassa de raízes grossas vivas (diâmetro de colo ≥ 2 cm) e raízes finas (diâmetro de colo < 2 cm).

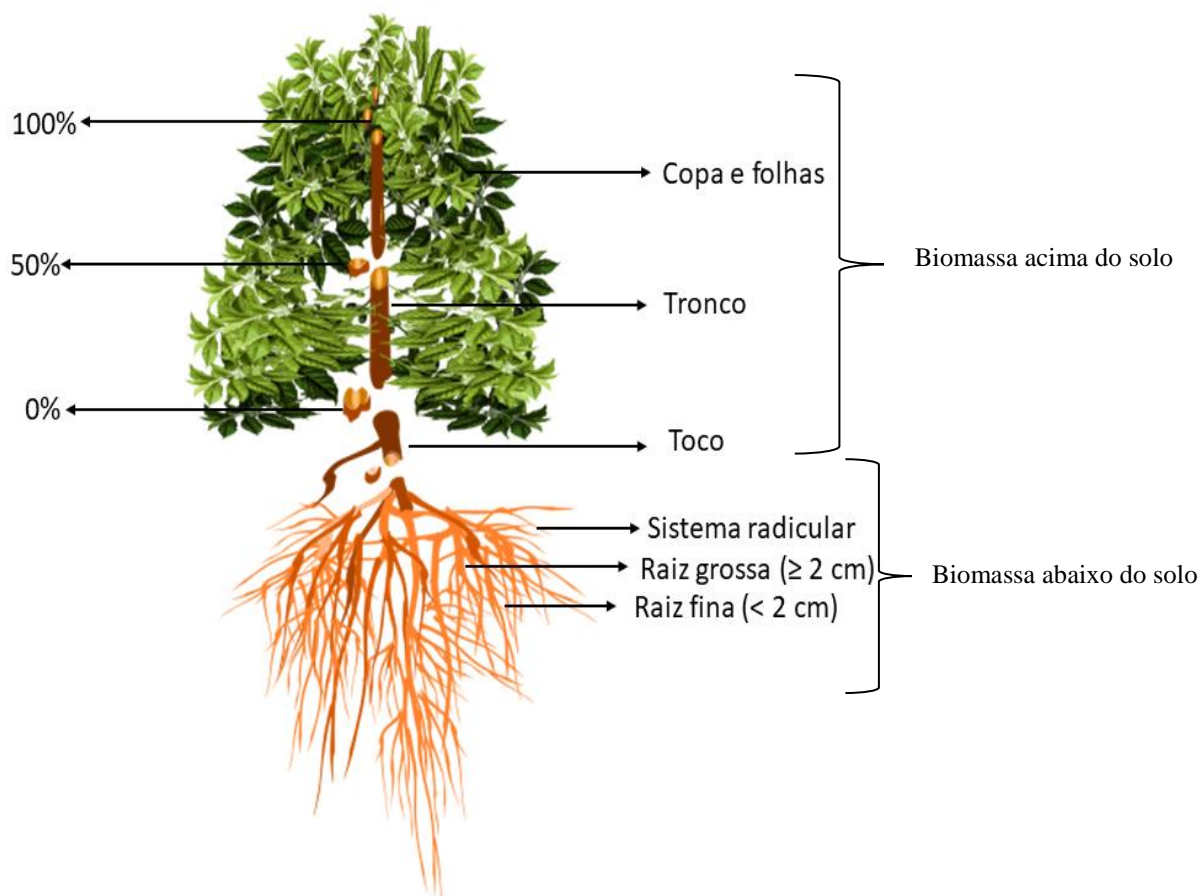


Figura 17. Ilustração esquemática da separação dos compartimentos da árvore de café (parte acima e abaixo do solo).

Fonte: Próprio autor (2023).

Antes dos indivíduos de café serem derrubados, foram medidos os diâmetros da copa em dois sentidos, norte-sul e leste-oeste (Figura 18a). Cada indivíduo selecionado teve seus compartimentos separados e pesados. Todas as variáveis dendrométricas, exceto o diâmetro da copa, foram obtidas após o arranquio dos indivíduos. As variáveis referentes à altura e ao diâmetro foram obtidas com auxílio de uma trena de fibra de vidro marca Lufkin. As variáveis foram coletadas da seguinte forma (Figura 18 b/c):

- i) Altura da copa: altura total da planta subtraída a altura do fuste, ou seja, o comprimento da copa.
- ii) Altura total (h): distância da base do café até o seu topo.
- iii) Altura comercial (h_c): a parte do fuste com valor comercial, ou seja, a porção utilizável do tronco.

- iv) Diâmetros da copa: coletados dois diâmetros (sentidos norte-sul e leste-oeste);
- v) Número de nós: contagem manual de todos os nós.



Figura 18. Coleta das variáveis dendrométricas. (a) mensuração do diâmetro da copa, (b) mensuração da altura comercial e total e (c) contagem de nós.

Fonte: Próprio autor (2021).

2.2.3 Biomassas

2.2.3.1 Biomassa acima do solo

Para estimar a biomassa acima do solo, foi considerada toda a biomassa viva presente na parte aérea das plantas, a qual foi subdividida em quatro compartimentos: tronco, galhos, folhas e frutos.

Para derrubar as plantas, foram abertas trincheiras ao redor das mesmas com aproximadamente 4 metros de profundidade (Figura 19a). Após essa etapa, deu-se início ao processo de lavagem das raízes com o auxílio de mangueiras de água (Figura 19b). As plantas foram coletadas usando uma serra manual, deixando um toco com altura de cerca de 10 cm a partir do nível do solo. Após a separação das raízes, esse toco foi pesado e adicionado ao peso do tronco. Esse procedimento garantiu a inclusão do toco no cálculo da biomassa acima do solo.



Figura 19. (a) Abertura da trincheira para derrubada das árvores de cafés, (b) Processo de lavagem inicial.
Fonte: Próprio autor (2021).

Após o tronco ser coletado, os galhos foram removidos e desfolhados (Figura 20a/b). O exemplo demonstrado inicialmente refere-se ao tronco. No entanto, o mesmo procedimento foi realizado para as outras partes (compartimentos) (Figura 20b). Após a separação de cada compartimento, ele foi pesado separadamente para determinação da massa fresca (Figura 20).



Figura 20. (a) Remoção, separação e armazenamento dos compartimentos das árvores, (b) galhos e folhas do tronco, (c) Armazenamento de folhas, (d) armazenamento de fruto.
Fonte: Próprio autor (2021)

As amostras foram pesadas com duas balanças, uma de bancada com capacidade para até 40kg marca Toledo e uma balança da marca Clink de Alta Precisão Eletrônica de 1g a 10 kg (conforme mostrado na figura 21). Geralmente, todas as partes precisavam ser cortadas em

pedaços menores para facilitar a pesagem. As serragens resultantes da separação do tronco e do toco foram coletadas, pesadas e adicionadas ao peso. A separação de todos os compartimentos foi realizada sobre uma lona (como ilustrado na Figura 20a/b). Amostras de todas as partes dos cafés foram coletadas para determinar os teores de água e carbono.

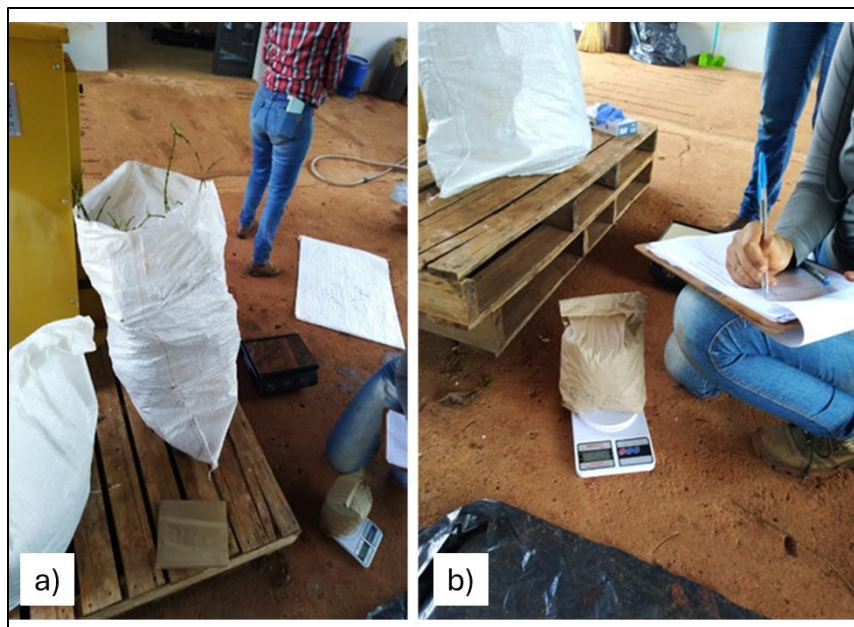


Figura 21. Pesagem dos compartimentos do café (a) galhos e (b) frutos.
Fonte: Próprio autor (2021).

2.2.3.2 Biomassa abaixo do solo (raízes)

Para determinar a biomassa abaixo do solo foi considerada toda a biomassa viva abaixo do nível do solo. A massa da planta foi dividida em raízes grossas (diâmetro de colo ≥ 2 cm) e raízes finas (diâmetro de colo < 2 cm). Para coletar as raízes (finas e grossas) ao redor de cada indivíduo/pé de café, começou-se a escavação a uma distância de, aproximadamente, 40 cm da base das plantas (Figura 22a/b - da derrubada). Para proteger às raízes durante o processo, além de respeitar a distância estabelecida, foram utilizadas espátulas para a remoção cuidadosa do solo, seguidas de uma lavagem. (Figura 22c). Esse método garantiu a preservação das raízes durante a coleta. Em seguida, as raízes foram separadas em dois compartimentos: raízes grossas e finas.



Figura 22. Remoção do solo das raízes com auxílio de mangueira de água.
Fonte: Próprio autor (2021).



Figura 23. a) equipe INPA e UFU na separação das raízes e b) Raiz de café ainda integral.
Fonte: Próprio autor (2021).

2.2.4 Coleta de dados

2.2.4.1 Teor de água

As amostras da parte aérea para a determinação dos teores de água e C, foram coletadas de acordo com metodologia adaptada de Higuchi e Carvalho Jr. (1994). Em vez de 6 discos do tronco, foram retirados 3 discos de, aproximadamente, 2-5 cm de espessura nas seguintes alturas do tronco: base (0%), no meio (50%) e no topo (100%).

Todos os indivíduos/plantas de café foram compartimentados em tronco, galhos, folhas, frutos, raízes grossas e finas. Para determinar os teores de água e carbono, foram retirados três

discos em diferentes alturas do tronco: base, meio e topo. As outras partes (galhos, folhas, frutos, raízes grossas e finas) foram retiradas, aproximadamente, 1 kg. Todas as amostras foram identificadas no pátio e imediatamente pesadas para a obtenção da biomassa fresca. Em seguida, foram armazenadas em sacos de papel e levadas ao laboratório para secagem.

A secagem foi realizada no Laboratório de Análises físico-químicas da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - Campus Monte Carmelo. Esse processo ocorreu em uma estufa com circulação forçada de ar a 65 °C (Figura 24). A primeira pesagem foi feita no dia seguinte após a entrada do material na estufa. Sendo a partir de então, realizada diariamente até que a amostra alcançasse o peso constante. Foi considerado peso constante quando ele era repetido durante 3 dias (ou pesagens) seguidos. Os resultados foram então convertidos para kg por hectare (kg/ha^{-1}).



Figura 24. Etapas para obtenção de massa fresca e seca no laboratório de físico-química/UFU Monte Carmelo.
Fonte: Próprio autor (2021).

2.2.4.2 Teor de Carbono

Para a quantificação dos teores de carbono, foram realizadas análises utilizando o Analisador Elementar (CHN) modelo Carla Erba 110, de fabricação italiana, Milão (Figura 25). As amostras foram processadas no Laboratório de Manejo Florestal do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). A Análise Elementar é uma técnica usada para determinar as porcentagens de carbono, hidrogênio e nitrogênio em uma amostra. O seu funcionamento baseia-se na combustão das amostras em uma atmosfera de oxigênio puro. Os gases resultantes dessa combustão são quantificados em um detector de condutividade térmica.

Para proceder à análise, as amostras, dos diferentes compartimentos, foram secadas em uma estufa e moídas a fino pó. Após serem moídas a fino pó, foram pesadas subamostras de cada amostra, com 2,0 a 3,0 mg, acondicionadas em cápsulas de alumínio. Estas cápsulas foram então introduzidas no analisador elementar, que por meio de combustão determinou a concentração total de carbono.

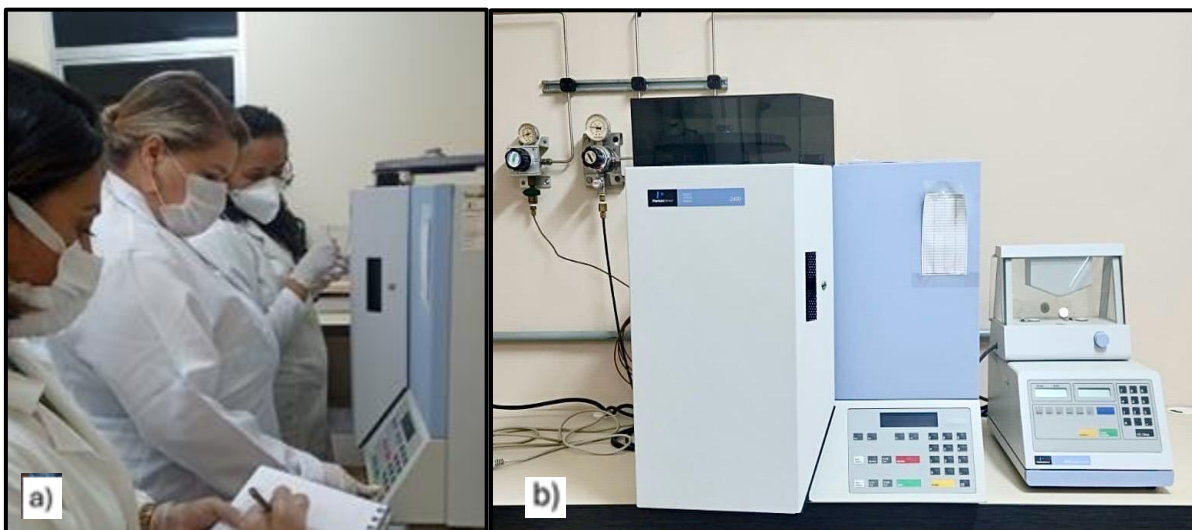


Figura 25. Análise Elementar (CHN), analisada no LMF – Manaus/AM.
Fonte: Laboratório de Manejo Florestal, LMF.

2.2.5 Análises estatísticas

Os dados foram organizados e tabulados com o software de planilha eletrônica Excel 2007, enquanto as análises foram conduzidas utilizando o software R 4.2.2. As inferências estatísticas dos resultados são apresentadas com base nas recomendações do IPCC, segundo Mastrandrea et al. (2010).

2.2.5.1. Modelos testados

A escolha dos modelos foi fundamentada nas contribuições de Santos (1996), Higuchi et al. (1998) e Silva (2007). Os dois primeiros autores são referências pioneiras em estudos alométricos de biomassa em árvores da Amazônia, enquanto Silva (2007) dispõe de uma das maiores bases de dados dos trópicos úmidos. Contudo, optou-se por adotar exclusivamente modelos não logaritmizados tentando seguir West et al. (1999) com o seu modelo universal para qualquer bioma ou espécie envolvida, que vem a ser um modelo não linear de simples entrada.

Além disso, a decisão de descartar modelos logarítmicos está relacionada com base em estudos alométricos de biomassa na Amazônia, os quais têm indicado que esses modelos não apresentam melhor ajuste aos dados quando comparados aos modelos não logaritmizados (Silva, 2007). Os parâmetros dos modelos não logaritmizados permitem interpretações mais diretas das relações entre as variáveis, como a relação entre o diâmetro ou altura total e a massa fresca. Por fim, os modelos não logaritmizados tendem a ser mais simples de calcular e implementar, especialmente em situações práticas ou de coleta de dados em campo, como é o caso de plantios de café.

A engenharia florestal brasileira sempre trabalhou com o volume da madeira, não com a biomassa da árvore (Higuchi, 1992). Quando as primeiras árvores foram derrubadas e pesadas na Amazônia para desenvolver equações de biomassa (alométricas), a questão era saber se as duas principais variáveis independentes (diâmetro à altura do peito a 1,3 m do solo – DAP – e altura) correlacionaria tão bem com biomassa quanto fora com o volume (Higuchi, 1992). Na literatura, o diâmetro da planta é o diâmetro de colo, mas quase sempre um pouco acima da superfície do solo; a 15 cm – D15 (Segura et al., 2006). O importante é definir a altura em que o diâmetro (ou circunferência) é medido. Neste caso, em vez do diâmetro, foi utilizada a circunferência do tronco a uma altura do colo (CAC), a 10 cm do solo.

Os modelos selecionados para as estimativas foram:

1. $B_{tot} = \beta_0 CAC^{\beta_1} + \varepsilon_i$ (West et al., 1999)
2. $B_{tot} = \beta_0 CAC^{\beta_1} HT^{\beta_2} + \varepsilon_i$
3. $B_{tot} = \beta_0 HT^{\beta_1} + \varepsilon_i$

Equação 05. Modelos selecionados para as estimativas

Em que:

B_{tot} = massa fresca de cada planta, em kg;

CAC = circunferência a altura do colo (10 cm do solo) de cada planta, em cm;

HT = altura total de cada planta, em m;

β_0 , β_1 e β_2 = coeficientes de regressão;

ε_i = erro aleatório.

Na seleção do modelo estatístico mais adequado, foram seguidos os procedimentos convencionais da ciência florestal. Esses procedimentos são delineados por Draper e Smith (1966) e Santos (1996). Os indicadores de qualidade do modelo são: maior coeficiente de determinação, menor erro padrão de estimativa e melhor distribuição de resíduos.

2.2.5.2. Aplicação do método *Jackknife*

Diante das dificuldades previsíveis em coletar dados de biomassa até que se atenda a intensidade mínima recomendada pelo Teorema de Limite Central ($n = 30$) e que não viole as condicionantes da normalidade, foi tomada a decisão de aplicar o método “*Jackknife*” para estimar os coeficientes de regressão. Primeiramente, foi desenvolvida uma equação utilizando todos os dados disponíveis ($n = 12$). Em seguida, foram ajustadas equações utilizando o método “deixe um de fora”, o que resultou em 12 equações com $n = 11$. Posteriormente, os pseudo valores dos parâmetros das equações foram calculados para cada equação gerada. Por fim, os parâmetros submetidos ao método *Jackknife*, foram calculados como a média dos pseudo valores dos mesmos parâmetros.

2.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.3.1 *Estatísticas descritivas do material coletado*

2.3.1.1 Biomassa total (parte aérea + raízes), Circunferência a Altura do Colo (a 10 cm do solo) e altura total (HT) das plantas coletadas das duas idades

A tabela 1 apresenta os dados e a média aritmética e medidas de dispersão (desvio padrão e limite de erro) dos dados coletados (biomassa total, circunferência a altura do colo e altura total), para cada idade de plantio. As incertezas para a biomassa total acima e abaixo do solo (B_{tot}) e circunferência a altura do colo (CAC 10) estão, estatisticamente, dentro dos limites de erro toleráveis da engenharia florestal, que é 10%, segundo Oliveira et al. (2014). A variável altura total (HT) é mais homogênea com LE's inferiores a 5%.

Tabela 1- Estatísticas descritivas sobre biomassa total, circunferência e altura dos dados coletados (n = 12) de duas idades diferentes.

n	Plantio – 4 anos			Plantio – 6 anos		
	Btot	CAC	HT	Btot	CAC	HT
1	10,045	7,4	2,24	21,566	20,2	3,57
2	9,718	8,6	2,23	17,119	15,9	3,46
3	11,722	7,6	2,17	19,472	14,5	3,55
4	7,844	6,5	1,94	20,356	19,8	3,42
5	8,790	6,0	2,02	18,606	15,0	3,23
6	10,570	7,2	2,01	23,557	15,0	3,34
Média	9,782	7,2	2,10	20,113	16,7	3,43
Desvio	1,356	0,9	0,13	2,266	2,6	0,13
IC(95%)	1,085	0,7	0,10	1,813	2,1	0,10
LE(%)	11,095	10,0	4,86	9,016	12,3	3,01

Btot = biomassa total em quilos; CAC = circunferência a altura do colo (a 10 cm do solo) em centímetros e HT = altura total da planta em metros.

Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

2.3.1.2 Contribuição (%) de cada parte da planta (tronco, galhos, folhas, raízes finas e raízes grossas) à biomassa total considerando as duas idades de plantios

A tabela 02 apresenta as estatísticas descritivas da contribuição (%) de cada parte das árvores de café coletados em relação à biomassa total. Em geral, segundo Oliveira et al. (2014), a incerteza tolerada para inventários florestais é de 10%. Essa incerteza pode ser baixada com a utilização de mais amostras (mais plantas de café derrubadas, arrancadas e pesadas). De qualquer forma, para o guia do IPCC (IPCC, 2006), o importante é apresentar a incerteza junto com a média aritmética; a certeza de usar a média ou a estimativa mínima provável ou a estimativa máxima provável caberá ao tomador de decisão. Ao contrário das árvores da Amazônia, as folhas da planta de café contribuem tanto com a biomassa total quanto a do tronco. A contribuição conjunta de galhos e folhas atinge 55% da biomassa total.

Tabela 02. Contribuição da porcentagem (%) do tronco, galhos, folhas, raízes finas e grossas a biomassa fresca total de uma planta de café (n = 12).

Medidas	Tronco	Galhos	Folhas	Raízes finas	Raízes grossas
Média	33,4	25,2	29,7	2,3	9,4
Desvio padrão	12,1	3,6	8,4	0,9	1,5
IC (95%)	6,8	2	4,8	0,5	0,8
Incerteza (%)	20,5	8	16,1	21,3	8,8

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Essas contribuições são apresentadas, resumidamente, na Figura 26. As contribuições, quando considerados os 12 indivíduos derrubados e pesados, do tronco, galhos, folhas, raízes finas e grossas foram, respectivamente, 33,4% \pm 6,8; 25,2% \pm 2,0; 29,7% \pm 4,8; 2,3% \pm 0,5 e 9,4 \pm 0,8.

As contribuições apresentadas neste estudo mostraram-se díspares em relação ao trabalho de Nogueira Junior et al. (2023), apresentaram uma grande variação entre os valores mínimos e máximos da biomassa total. Essa variação evidencia a heterogeneidade das 16 árvores amostradas, que incluíam duas variedades e quatro classes de idade. Por exemplo, o volume da copa varia entre 5 e 24 m³, a biomassa seca das árvores entre 22 e 224 kg e o carbono total por árvore entre 10 e 100 kg. Da mesma forma, a biomassa seca e o carbono total refletem as diferenças na eficiência da remoção de carbono ao longo do ciclo de vida das árvores. Esses resultados reforçam a necessidade de considerar a diversidade estrutural e funcional das árvores em análises de biomassa e carbono em sistemas agroflorestais e pomares comerciais.

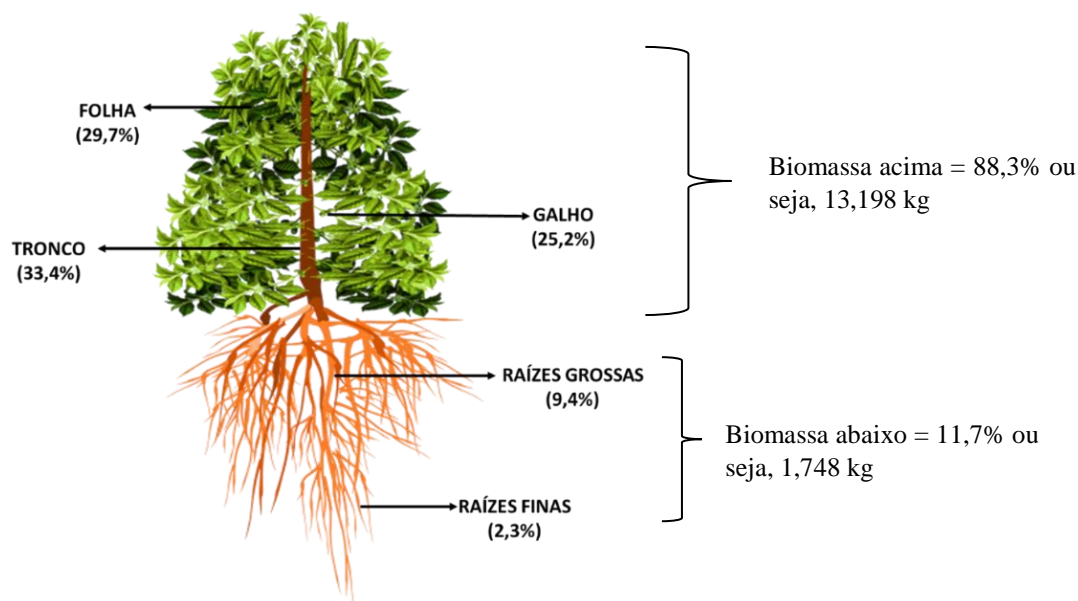


Figura 26. Contribuição em porcentagem do tronco, galhos, folhas, raízes finas e grossas a biomassa fresca total dos cafés.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

2.3.1.3 Contribuição (%) de cada parte da planta (tronco, galhos, folhas, raízes finas e raízes grossas) à biomassa total, por idade.

As 12 plantas foram pesadas separadamente, de acordo com as seguintes partes: tronco, galhos, folhas, frutos, raízes finas e grossas. Os frutos foram descartados das análises porque nem todas as plantas apresentaram essa fenofase. A tabela 03 apresenta as estatísticas descritivas do material coletado.

Tabela 03 - Contribuição em porcentagem (%) do tronco, galhos, folhas, raízes finas e grossas a biomassa fresca total dos cafés com idade de quatro e seis anos.

Variáveis	Tronco		Galho		Folha		Raiz fina		Raiz grossa	
	4 anos	6 anos	4 anos	6 anos	4 anos	6 anos	4 anos	6 anos	4 anos	6 anos
Média	23,6	43,2	27,0	23,5	37,4	22,1	2,9	1,6	9,1	9,7
Desvio padrão	3,0	9,0	2,6	3,8	1,3	3,7	0,6	0,4	0,9	1,9
IC (95%)	2,4	7,2	2,1	3,0	1,1	3,0	0,5	0,3	0,7	1,5
Incerteza (%)	10,4	16,6	7,7	12,8	2,8	13,6	17,6	20,2	7,7	16,0

Fonte: Elaborada pelo autor (2023)

De acordo com a tabela 03, observa-se um aumento na contribuição do tronco para a biomassa total, com o aumento da idade das plantas, de 23,6% para 43,2%. Isso pode indicar

um crescimento mais robusto do tronco com o passar dos anos. Os galhos diminuem ligeiramente, entre as plantas com quatro e seis anos de idade, de 27,0% para 23,5%, respectivamente. Isso sugere uma possível redução na ramificação ou crescimento dos galhos em relação ao tronco. A contribuição das folhas diminuiu de 37,4% para 22,1% com o aumento da idade dos cafés. Isso pode indicar uma diminuição na taxa de produção foliar ou uma maior alocação de recursos para outras partes da planta. Há uma diminuição na contribuição das raízes finas de 2,9% para 1,6% entre as duas idades. Isso pode ser resultado do processo de alocação diferencial de recursos. Essa diferenciação entre meristemas primários e secundários é crucial para compreender como as plantas crescem e se desenvolvem, permitindo adaptações a diferentes ambientes e condições de cultivo (Taiz et al., 2015).

À medida que as plantas amadurecem, é comum designar recursos de forma diferente para atender às demandas do crescimento e manutenção. Assim, uma redução na quantidade de raízes finas em plantas mais velhas pode indicar uma mudança nas prioridades de investimento da planta, com uma maior mobilização de recursos para outros aspectos do crescimento, como o desenvolvimento do tronco, galhos e folhas. Isso sugere uma adaptação da planta ao seu ambiente em mudança à medida que progride para a maturidade. Portanto, a diminuição na quantidade de raízes finas nos cafés com seis anos em comparação com os de quatro anos pode refletir uma estratégia de alocação de recursos para otimizar o crescimento e a sobrevivência da planta em estágios mais avançados de desenvolvimento.

O aumento na contribuição do tronco e a diminuição nas folhas podem refletir um padrão típico de crescimento de árvores jovens para árvores maduras, com uma mudança de distribuição de recursos das partes aéreas para o crescimento do tronco e raízes. Durante a fase juvenil, a planta tende a direcionar seus recursos para o crescimento em altura, priorizando o desenvolvimento do tronco e dos galhos. Isso resulta em uma maior quantidade de folhas, o que é fundamental para o processo fotossintético.

Conforme a planta amadurece, ela começa a investir mais recursos no seu processo reprodutivo, incluindo a produção de flores e frutos. Além disso, à medida que cresce, a planta enfrenta uma competição mais intensa por recursos, como luz e nutrientes, devido ao espaçamento entre outras plantas próximas. Esses fatores influenciam significativamente o padrão de crescimento e desenvolvimento da planta ao longo do tempo. A estabilidade na contribuição das raízes grossas sugere que a planta mantém um investimento constante na sustentação, independentemente da idade.

Essas descobertas podem ter implicações importantes para a gestão de cafezais, incluindo estratégias de poda, fertilização e irrigação, que podem ser adaptadas de acordo com as necessidades específicas das plantas em diferentes estágios de desenvolvimento. Em resumo, a análise das contribuições dos diferentes componentes do café em diferentes idades fornece informações valiosas sobre o desenvolvimento da planta e sugere possíveis estratégias de manejo para otimizar a produção das lavouras de café.

Esses resultados indicam que há necessidade de coletar mais dados tentando cobrir toda as características dessa cultura no Cerrado mineiro. Da mesma maneira, não se pode perder de vista o conceito de alometria, que trata do desenvolvimento da planta e não apenas as suas variáveis dendrométricas. Isso vai refletir no tamanho da incerteza (amplitude de variação do intervalo de confiança das medidas).

2.3.2 Equações alométricas testadas e desenvolvidas

O processamento dos dados foi realizado com software R 4.2.2. A tabela 04 apresenta os coeficientes de regressão (a, b, c) dos modelos testados, assim como os coeficientes de determinação, erro padrão de estimativa ($S_{y,x}$) e a incerteza ou o limite de erro (%).

Tabela 04 - Modelos testados (equações alométricas)

Modelo	a	b	c	r^2	$S_{y,x}$	LE(%)
(1) $B_{tot} = a CAC_{10}^b$	2,2735	0,7668		0,86	2,2407	4,52
(2) $B_{tot} = a CAC_{10}^b HT^c$	2,9600	0,2024	1,0901	0,90	1,9876	4,01
(3) $B_{tot} = a HT^b$	3,4191	1,4338		0,90	1,9319	3,89

B_{tot} = massa fresca de cada planta, em kg; CAC_{10} = circunferência à altura do colo (10 cm do solo) de cada planta, em cm; HT = altura total de cada planta, em m; a, b, c = coeficientes estimados de regressão.

Fonte: Elaborada pelo autor (2023).

Todos os três modelos testados apresentaram resultados confiáveis, com o r^2 maior que 0,85. O modelo (1) de simples entrada, apenas CAC_{10} como variável independente, explica 86% da variação dos dados e apresentou um LE de apenas 4,52%, que é bem inferior o LE tolerável na engenharia florestal que é de 10%. O modelo (3), com apenas a altura total (HT) como variável independente apresentou indicadores melhores do que os modelos (1) e (2); explicando 90% da variação dos dados e LE = 3,89%. Se o técnico se sentir confortável em medir apenas a altura total de todas as plantas durante o inventário de biomassa ou carbono, o modelo (3) é o

melhor. Com base nos indicadores da tabela 04, o modelo (2), que envolve as duas variáveis independentes (CAC_{10} e HT) poderia até ser descartado já que acrescenta muito pouco ao modelo (1) e ainda apresenta um LE maior do que do modelo (2). Isso é válido para estimativas de biomassa da Fazenda Santa Bárbara, em Monte Carmelo, onde os dados foram coletados, destrutivamente.

No entanto, se outro cafeicultor do Cerrado mineiro quiser utilizar uma das equações desenvolvidas a partir dos dados coletados na Fazenda Santa Bárbara, o ideal é utilizar a equação de dupla entrada, com CAC_{10} e HT como variáveis independentes. Isso se aplica em plantios que não sofreram tratamentos culturais, do tipo poda (recepta). A altura total caracteriza melhor a genética de uma planta do que o diâmetro ou circunferência. Além disso, a altura total da planta em um cafezal plantado pode ser facilmente medida em campo, sem riscos de cometer erros não amostrais.

2.3.3 Teste de normalidade

Ao aplicar o teste Shapiro – Wilk para testar a hipótese nula de que a biomassa total das 12 plantas de café veio de uma população normalmente distribuída, o resultado foi o seguinte: $W = 0.88731$, $p = 0.1088$. Saindo do maniqueísmo do “significante” ou “não significativo”, esta probabilidade ($p = 0,1088$) indica que há uma evidência não tão robusta para não rejeitar a hipótese nula.

De acordo com o IPCC (2010), pela verossimilhança do resultado, a conclusão seria que “muito provavelmente” os dados venham de uma população normalmente distribuída. Os termos utilizados pelo IPCC (2010) são apresentados no quadro 04. Para ter certeza da normalidade, melhor seria utilizar o termo “virtualmente certo”, mas o $p = 0,1088$ não permite o enquadramento a este termo.

Quadro 4 – Descrição da incerteza estimada com base na verossimilhança do resultado (probabilidades – Prob.)

Termo	Verossimilhança do resultado
Virtualmente certo	Prob. de 99-100%
Muito provavelmente	Prob. de 90-100%
Provavelmente	Prob. de 66-100%
Mais ou menos provável	Prob. de 33-66%
Improvável	Prob. de 0-33%
Muito improvável	Prob. de 0-10%
Excepcionalmente improvável	Prob. de 0-1%

Fonte: IPCC (2010).

2.3.4. Aplicação do método “jackknife”

Na dúvida sobre a distribuição normal por causa do $p = 0,1088$, o método “jackknife”, não paramétrico operando com dados de distribuição livre, foi utilizado para gerar as equações. Os coeficientes de regressão e de determinação e o erro padrão de estimativa foram estimados utilizando os dados submetidos ao método *jackknife*. Os seguintes modelos foram utilizados:

- 1) $B_{tot} = \beta_0 CAC^{\beta_1} + \varepsilon_i$
- 2) $B_{tot} = \beta_0 CAC^{\beta_1} HT^{\beta_2} + \varepsilon_i$
- 3) $B_{tot} = \beta_0 HT^{\beta_1} + \varepsilon_i$

Equação 06. Modelos – Método *Jackknife*

O método “*jackknife*” foi aplicado utilizando todos os dados coletados das duas idades ($n = 12$) e de uma subamostra desse total, onde foram selecionadas, aleatoriamente, 3 plantas de cada idade totalizando $n = 6$. Os dados utilizados para aplicar o método “*jackknife*” para o $n = 12$ são os mesmos da tabela 01. Os dados selecionados ($n = 6$), aleatoriamente, são apresentados na tabela 05.

Tabela 05. Dados da subamostra (n = 6)

n	Plantio – 4 anos			Plantio – 6 anos		
	Btot	CAC	HT	Btot	CAC	HT
1	10,045	7,4	2,24	17,119	15,9	3,46
2	11,722	7,6	2,17	19,472	14,5	3,55
3	7,844	6,5	1,94	20,356	19,8	3,42

B_{tot} = biomassa total em quilos; CAC = circunferência a altura do colo (a 10 cm do solo) em centímetros e HT = altura total da planta em metros.

Fonte: Dados do autor (2023).

A média aritmética dos pseudo valores dos coeficientes de regressão, coeficiente de determinação, erro padrão de estimativa ($s_{y,x}$) e limite de erro são apresentados na tabela 06. Em comparação aos estimadores produzidos com $n = 12$, os modelos submetidos ao método “*jackknife*” perderam em relação ao coeficiente de determinação, mas o limite de erro foi inferior. Os passos necessários para estimar os coeficientes de regressão, coeficiente de determinação e erro padrão de estimativa, assim como os resultados, são apresentados no Apêndice 2.1.

Tabela 06. Equações utilizando $n = 12$ quando submetidas ao método “*jackknife*”

Modelo	a	b	c	r ²	S _{y,x}	LE(%)
(1) B _{tot} = a CAC ₁₀ ^b	2,3081	0,7514		0,84	2,3830	2,53
(2) B _{tot} = a CAC ₁₀ ^b HT ^c	2,8907	0,2458	0,9914	0,88	2,0776	2,18
(3) B _{tot} = a HT ^b	3,3970	1,4301		0,88	2,0410	2,14

Fonte: Dados do autor (2023).

Foi simulada uma subamostragem de $n = 6$ (3 indivíduos de cada idade de plantio). O método “*jackknife*” foi aplicado para estimar os coeficientes de regressão, coeficiente de determinação, erro padrão de estimativa e limite de erro dos três modelos alométricos utilizados. Os resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7. Coeficientes de regressão, coeficiente de determinação, erro padrão de estimativa e limite de erro da subamostragem ($n = 6$) quando submetida ao “*jackknife*”.

Modelo	a	b	c	r ²	S _{y,x}	LE(%)
(1) B _{tot} = a CAC ₁₀ ^b	2,4587	0,6989		0,90	1,7682	2,64
(2) B _{tot} = a CAC ₁₀ ^b HT ^c	0,5599	0,7467	0,2837	0,91	1,7029	2,80
(3) B _{tot} = a HT ^b	3,5839	1,3165		0,92	1,5955	2,37

Fonte: Dados do autor (2023).

Esses resultados mostram que é possível produzir indicadores de qualidade de equações alométricas (coeficiente de determinação e limite de erro) tão confiáveis quanto aqueles produzidos com a amostragem completa, desde que se aplique o método “*jackknife*”.

2.3.5. Teores de água e de carbono nas plantas de café

Os teores de água de cada parte da planta são apresentados na tabela 8, de amostras retiradas de seis plantas de cada idade. O teor médio de água de cada parte da planta foi ponderado de acordo com a contribuição dessas partes à biomassa total. As plantas mais novas (4 anos) apresentam teor de água superior ao das plantas mais velhas (6 anos). Para escalar essas estimativas considerando todas as idades, a média aritmética das duas médias ponderadas pode ser utilizada, ou seja, teor de água = 54%.

Tabela 08. Teores de água de amostras de diferentes partes da planta (em %)

Partes	T1 (4 anos)	T2 (6 anos)
Folhas	23,89	15,04
Galhos	13,31	13,30
Frutos	8,10	2,86
Raízes grossas	3,67	4,05
Raízes finas	1,31	0,54
Tronco	7,71	14,45
Média ponderada	58,00	50,24

Fonte: Dados do autor (2023).

Os teores de carbono de amostras de cinco plantas das duas idades são apresentados na Tabela 09. O teor médio de carbono é igual a 43,28% \pm 0,23, podendo ser arredondado para 43%.

Tabela 09. Teores de carbono de amostras de cinco plantas de café – Resultados CNS.

Indivíduos	C (%)
Amostra 1	43,67
Amostra 2	43,26
Amostra 3	42,97
Amostra 4	43,37
Amostra 5	43,13
Média	43,28
Dp	0,26
IC (95%)	0,23

Fonte: Dados do autor (2023).

No estudo realizado por Coltri et al. (2015), as análises químicas realizadas no analisador LECO CR-412 indicaram que entre 49% e 50% da biomassa seca das plantas de café (folhas, ramos, troncos e frutos) é composta por carbono, corroborando os dados apresentados pelo IPCC (2006). Com base nesses resultados, considerou-se que 50% da biomassa seca é composta de carbono. Resultados semelhantes foram obtidos por Nogueira Junior et al. (2023), que encontraram 47% de carbono em árvores de laranja. Como ambas são árvores perenes de médio porte, os valores observados para as laranjeiras são comparáveis aos encontrados nas árvores de café.

Os valores foram similares ao do autor supracitado que ao considerar o conteúdo de C das laranjeiras, variou de 46,18 a 47,97%, e dos compartimentos, variou de 42,36 a 44,66% para as folhas, de 46,94 a 48,05% para os galhos, de 46,91 a 48,11% para o tronco, e de 46,24 a 49,67% para as raízes das árvores.

2.3.6. Equações de carbono

O teor médio de água é igual a 54%; logo, a massa seca (em estufa até o peso constante) corresponde a 46% da massa total fresca. O teor médio de carbono é igual a 43% da massa seca. Dessa forma, as equações de carbono com base na amostragem de 12 plantas, assumem as seguintes formas:

$$C_{tot} = (2,2725 \times CAC^{0,7668}) \times (0,46) \times (0,43)$$

$$C_{tot} = (2,9600 \times CAC^{0,2024} \times HT^{1,0901}) \times (0,46) \times (0,43)$$

$$C_{tot} = (3,4191 \times HT^{1,4338}) \times (0,46) \times (0,43)$$

Equações 07. Equações de carbono. Onde: C_{tot} = total (parte aérea + raízes) de carbono em uma planta, em quilos; CAC = circunferência a altura do colo (a 10 cm do solo), em centímetros; HT = altura total em metros.

Para transformar carbono (C) em CO₂ equivalente é preciso considerar a massa atômica do carbono e do oxigênio. C = 12 e O = 16; CO₂ = 12 + 16 x 2 = 44. Logo, para transformar C em CO₂ equivalente é preciso multiplicar pela razão 44/12, ou seja, multiplicar por 3,6666.

2.3.7 Estoques de carbono e água

Considerando as duas idades juntas, a biomassa fresca total (parte aérea + raízes) média por planta é igual a 14,945 kg ± 3,215 (IC 95%). Considerando ainda os teores de água e de

carbono, o carbono total médio por planta é igual a 2,956 kg \pm 0,438 (IC 95%). O resumo dessas estimativas médias e do total da área plantada (n = 236.842 árvores de café) é apresentado na Tabela 10.

Tabela 10. Estoques de carbono, CO₂ e água da Fazenda Santa Bárbara.

Variável	Indivíduo		Plantio = 236.842 plantas		
	média	IC (95%)	média	mínima	máxima
Biomassa (Kg)	14,945	3,215	3.539.604	2.778.157	4.301.051
Carbono (kg)	2,956	0,636	700.134	549.519	850.748
CO ₂ eq. (Kg)	10,839	2,332	2.567.180	2.014.923	3.119.437
Água (Kg)	8,369	1,800	1.982.178	1.555.768	2.408.588

Fonte: Dados do autor (2023).

O estoque médio de carbono em toda área cafeeira (pequena exceção para as variedades exóticas) da Fazenda Santa Bárbara é de 700.134 kg C (variando de 549.519 a 850.748 kg C). Nos aspectos de mudança do clima, todos os gases de efeito estufa têm que ser transformados em CO₂ equivalente. O estoque médio de CO₂ eq. é de 2.567.180 kg CO₂ eq. (variando de 2.014.923 a 3.119.437 kg CO₂ eq.). O estoque médio de água retida nas árvores de café é igual a 1.982.178 kg ou litros d'água ou 396.435 litros de água acumulados por ano. A água armazenada nas plantas desempenha um papel fundamental no ecossistema, onde cada planta pode ser vista como uma “pequena barragem natural³”.

Em 2020, a população brasileira era igual a 211.800.000 e as emissões per capita de CO₂ eq. foram iguais a 7.912 kg por brasileiro (G1, 2020; BRASIL, 2022). Esses resultados fazem uma analogia indicando que as remoções de CO₂ da atmosfera pelas árvores de café da Fazenda Santa Bárbara, com base nas estatísticas de população brasileira e emissões de CO₂ eq. per capita, em 2020, foram suficientes para neutralizar as emissões de 255 a 394 brasileiros. Se for considerada a idade média dos plantios igual a 5 anos, isso significa um incremento médio anual que varia de 402.985 a 623.887 kg CO₂ eq. por ano, ou seja, a neutralização de emissões de 51 a 79 brasileiros anualmente.

³ Essas barragem são pequenas bacias escavadas no solo, geralmente em áreas rurais, para capturar e armazenar água da chuva. Elas ajudam a controlar a erosão, aumentar a infiltração de água no solo e recarregar os lençóis freáticos. Além disso, as barragem podem ajudar a melhorar a disponibilidade de água para as plantas e aumentar a umidade do solo, promovendo um ambiente mais favorável para o cultivo. Em muitos casos, essas estruturas são projetadas para imitar processos naturais de retenção de água, daí o termo "natural" (EMBRAPA, 2009).

Isso destaca a importância das práticas sustentáveis e ambientalmente conscientes realizadas pela fazenda, contribuindo de maneira significativa para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Dessa forma, ao considerar o estoque de carbono gerado pelo cultivo do café e sua contribuição para a mitigação da mudança climática, a Fazenda Santa Bárbara reafirma seu compromisso não apenas com a produção sustentável, mas também com a preservação ambiental e a promoção de um ambiente mais saudável e equilibrado para as gerações futuras.

2.4 CONCLUSÕES

- São considerações relacionadas apenas com a mudança do clima da Idade Contemporânea e um plantio de café que ainda não recebeu nenhum manejo de poda.
- O entendimento do papel da plantação de café no processo de mitigação do aumento de gases de efeito estufa não deve ser dissociado dos objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS).
- A Fazenda Santa Bárbara se qualifica para propor projetos de carbono já que desenvolveu o seu próprio método para estimar os estoques e diferenças de estoques de CO₂ eq., de acordo com o guia do IPCC. O método desenvolvido pode ser considerado MRV (Mensurável, Reportável e Verificável).
- O método “*jackknife*” é efetivo na redução de amostras coletadas, destrutivamente.
- Além dos estoques e diferenças de estoques (com o passar do tempo) de CO₂ e água, a Fazenda realiza outras pesquisas para estimar a capacidade de troca gasosa (vapor d’água, CO₂ e energia solar consumida pela fotossíntese das plantas) entre o plantio de café e a atmosfera. O resultado dessa pesquisa pode estimar, por exemplo, o quanto de CO₂ é necessário para manter o estoque igual a 2.567.180 kg CO₂ eq.
- Ao apresentar essas estatísticas de emissões e remoções de CO₂, é possível quantificar a resposta à para a seguinte reflexão: “quanto e para onde iria esse CO₂ e energia consumidos pelo plantio de café?”
- Embora os dados atuais forneçam uma base sólida para entender a relação entre o cultivo de café e a mitigação das emissões de CO₂, são necessários mais estudos para uma compreensão mais profunda do comportamento do café em face da mudança climática.

REFERÊNCIAS

Araújo, T. M.; Higuchi, N.; Carvalho Jr., J. A. 1999. Comparison of formulae for biomass content determination in a tropical rain forest in the state of Pará, Brazil. *Forest Ecology and Management*, v.117, p.43-52.

Andrade, H.J.C., Segura, M.A., Feria, M., Suárez, W. 2018. Above-ground biomass models for coffee bushes (*Coffea arabica* L.) in Líbano, Tolima, Colombia. *Agroforest Syst* 92: 775-784p. Disponível em:< <https://doi.org/10.1007/s10457-016-0047-4>>. Acesso em: 15 de maio de 2023.

Andrade, H.J., Segura, M.A., Feria, M. 2021. Allometric models for estimating belowground biomass of individual coffee bushes growing in monoculture and agroforestry systems. *Agroforest Syst* 95:215–226. Disponível em:<<https://doi.org/10.1007/s10457-020-00575-6>>. Acesso em: 15 de maio de 2023.

Atindogbe, G., Aouji, A. K., Fonton, N.H., Lejeune, P., Ekpe, R. 2011. Size of sample plots used to characterise teak plantations under farm silviculture in southern Benin. *Bois et Forets des Tropiques*, 310: 69-78.

Bergamaschine, Lívia Carvalho. Políticas públicas e as contribuições potenciais do Cerrado para o cumprimento das metas brasileiras de redução das emissões de gases do efeito estufa. 2017. xv, 132 f., il. Dissertação (Mestrado em Ecologia) —Universidade de Brasília, Brasília, 2017.

Bissel, A.F. e Ferguson, R.A. 1975. The Jackknife – Toy, Tool, or Two-Edged Weapon? *The Statistician* 24(2): 79-100.

BRASIL. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. Brasília, 6ª. ed. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>. Acesso em 07 julho 2024.

Brown, s.; Gillespie, a. J. R.; Lugo, A. E. Biomass estimation methods for tropical forest with applications to forest inventory data. *For. Dci.*, v. 35, n. 4, p. 881-902, 1989.

Bunn, C., Läderach, P., Ovalle Rivera, O. et al. A bitter cup: climate change profile of global production of Arabica and Robusta coffee. *Climatic Change* 129, 89–101 (2015). Disponível em:< <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1306-x>> Acesso em: 12 de maio 2023.

Campos, J.C.C.; Leite, H.G. 2002. Mensuração florestal: perguntas e respostas. Editora UFV. Viçosa. 407p.

Chave, J., Andalo, C. Brown, S., Cairns, M.A., Chambers, J.Q., Eamus, D., Folster, H., Fromard, F., Higuchi, N., Kira, T., Lescure, J.P., Nelson, B.W., Ogawa, H., Puig, H., Riera, B. e Yamakura, T. 2005. Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. *Oecologia*, 145: 85-99.

Chave, J.; Réjou-méchain, M.; Búrquez, A.; Chidumayo, E.; Colgan, MS; Delitti, WBC; Thomas, SC Modelos alométricos aprimorados para estimar a biomassa aérea de árvores tropicais. *Biologia da Mudança Global*, v. 10, pág. 3177–3190, 2014. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/gcb>. Acesso em: 8 jan. 2025.

Coltri, P.P., Zullo Junior, J., Dubreuil, V, Ramirez, G.M., Pinto, H.S., Coral, G., Lazarim, C.G. 2015. Empirical models to predict LAI and aboveground biomass of *Coffea arabica* under full sun and shaded plantation: a case study of South of Minas Gerais, Brazil. *Agroforest Syst* (2015) 89:621–636. DOI 10.1007/s10457-015-9799-5.

Coltri, P.P., Pinto, H.S., Gonçalves, R.R.V., Zullo Junior, J., Dubreuil, V. 2019. Low levels of shade and climate change adaptation of *Arabica* coffee in southeastern Brazil. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2019.e01263>. Acesso em: 15 de maio de 2024.

Consórcio Pesquisa Café. Mundo Novo. Disponível em: <<http://www.consorcioquesquisacafe.com.br/index.php/2016-05-27-17-05-35/518-mundo-novo-cultivares-do-grupo-mundo-novo>>. Acesso em: 15 de junho de 2024.

Couto, H.T.Z. 2008. Metodologias para quantificação e monitoramento de biomassa e carbono em reflorestamento com essências nativas. II Simpósio de Atualização em Recuperação de Áreas Degradadas com ênfase em matas ciliares: 54-63.

Defrenet, E., Roupsard, O., Van den Meersche, K., Charbonnier, F., Pérez-Molina, J.P.P., Khac, E., Prieto, I., Stokes, A., Roumet, C., Rapidel, B., Virginio Filho, E.M., Vargas, V.J., Robelo, D., Barquero, A., and Jourdan, C. 2016. Root biomass, turnover and net primary productivity of a coffee agroforestry system in Costa Rica: effects of soil depth, shade trees, distance to row and coffee age. *Annals of Botany* 118: 833–851. doi:10.1093/aob/mcw153.

Draper, N.R.; Smith, H. 1966. *Applied Regression Analysis*. John Wiley & Sons, Inc. New York, EUA. 407p.

Duncan, G.T. 1978. An Empirical Study of Jackknife-Constructed Confidence Regions in Nonlinear Regression. *Technometrics* 20(2): 123-129.

Efron, B. 1982. The Jackknife, the Bootstrap, and Other Resampling Plans. SIAM, Monograph nº 38, CBMS-NSF.

Efron, B. e Gong, G. 1983. A leisurely look at the bootstrap, the jackknife and cross-validation. *The American Statistician* 37(1): 36-48.

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). "Barraginhas: água de chuva para todos." *Embrapa Milho e Sorgo*, 2009. 49p.

EMBRAPA. Agricultura de baixa emissão de Carbono. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/tema-agricultura-de-baixo-carbono/perguntas-e-respostas>>. Acesso em: 20 de junho 2024.

Furnival, G.M. 1961. An index for comparing equations used in constructing volume tables. *Forest Science*, 7(4):337-341.

G1. Brasil atinge 211,8 milhões de habitantes, diz IBGE. 27 de agosto de 2020. Disponível em: <https://g1.globo.com/economia/noticia/2020/08/27/brasil-atinge-2117-milhoes-de-habitantes-diz-ibge.ghtml>. Acesso em 07 julho 2024.

Higuchi, N. 1992. Utilizando o método “jackknife” para estimar o volume de madeira da floresta amazônica. Atas da 24ª Reunião Regional da Associação Brasileira de Estatística e 12ª Semana do Estatístico, Manaus, AM, 22 a 24 de abril de 1992.

Higuchi, N. e Carvalho Jr., J.A. 1994. Fitomassa e conteúdo de carbono de espécies arbóreas da Amazônia. Em: Anais do Seminário “Emissão e sequestro de CO₂: uma nova oportunidade de negócios para o Brasil”, CVRD, 121p.

Higuchi, N.; Santos, J. dos; Ribeiro, J. R.; Minette, L.; Biot, Y. 1998. Biomassa da parte aérea da floresta tropical úmida de terra firme da Amazônia Brasileira. *Acta Amazonica*, 28 (2):153-166.

Higuchi, N.; Santos, J.; Lima, A.J.N.; Spanner, G.C.; Souza, C.A.; Lovera, L.H.; Ferraz, J.B.S.; DeArmond, D. Impacts to soil properties still evident 27 years after abandonment in Amazonian log landings. *Rev. Impacts to soil properties still evident 27 years after abandonment in Amazonian log landings*. Volume 510, Número 120105, 2022. Disponível em: <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/38490>. Acesso em: 15 de maio de 2024.

Husch, B.; Miller, C.I.; Beers, T.W. 1972. *Forest Mensuration*. The Ronald Press Company. New York. 410p.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2003. Good practice guidance for land use, land-use changes, and forestry. Kanagawa, Japan, Institute for Global Environmental Strategies.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2006. IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Disponível em: www.ipcc.ch. Acesso em: 15 de maio de 2024.

IPCC. 2009. Methodological guidance for activities relating to reducing emissions from deforestation and forest degradation and the role of conservation, sustainable management of forests and enhancement of forest carbon stocks in developing countries. Decision 4/CP.15. <https://unfccc.int/resource/docs/2009/cop15/eng/11a01.pdf#page=11>

IPCC. 2010: Guidance Note for Lead Authors of the IPCC Fifth Assessment Report on Consistent Treatment on Uncertainties. 4p. https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2017/08/AR5_Uncertainty_Guidance_Note.pdf.

IPCC. 2019: Summary for Policymakers. In: *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems* [P.R. Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson-Delmotte, H.- O. Pörtner, D. C. Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)]. <https://doi.org/10.1017/9781009157988.001>.

IPCC. 2021: Chapter 4. Amazonian ecosystems and their ecological functions. Amazon Assessment Report 2021. United Nations Sustainable Development Solutions Network, New York, USA. Available from <https://www.theamazonwewant.org/spa-reports/>. DOI: 10.55161/IKRT9380

Kuyah, S.; Doyle, D.; Kiguru, J.; Mazínia, G.; Nyerere, J.; Chumba, P.; ...; MungiI, L. Equações alométricas para estimar biomassa em paisagens agrícolas: I. Biomassa acima do solo. *Sistemas Agrícolas*, v. 111, pág. 45-56, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880912001892>. Acesso em: 8 jan. 2025.

Läderach, P., Ramirez-Villegas, J., Jarvis, A., & Talavera, T. (2017). Climate change adaptation of coffee production in the Dominican Republic. *Journal of Climate Change Research*, 10(3), 143-156.

Loetsch, F., Zöhrer, F. e Haller, KE. 1973. *Forest Inventory*. BLV Verlagsgesellschaft, Munique. Volume II. 469p.

Kozłowski, J. e Konarzewski, M. 2004. Is West, Brown and Enquist's model of allometric scaling mathematically correct and biological relevant? *Functional Ecology*, 18: 283-289.
Machado, S.A.; Figueiredo Filho, A. 2003. *Dendrometria*. Amaral & Figueiredo Filho (eds). Curitiba. 309p.

Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G-K., Edenhofer, O., Stocker, T.F., Field, C.B., Ebi, K.L., Matschoss, P.R. 2011. The IPCC AR5 guidance note on consistent treatment of uncertainties: a common approach across the working groups. *Climatic Change* (2011) 108:675–691 DOI 10.1007/s10584-011-0178-6.

Meireles, I. et al. Estimativa da biomassa de cafeeiros em sistemas agroflorestais sob manejo orgânico e convencional em diferentes arranjos. *Revista Brasileira de Ciências Ambientais*, n. 53, p. 134–147, 3 fev. 2020. DOI: 10.5327/Z2176-947820190488.

Meireles, I.E.S, Matsumoto, S.N., Reis, C.A.S., Pereira, L.F., Oliveira, U.S., Barreto-Garcia, P.A.B., Prado, T.R., Ramos, P.A.S. 2019. Estimativa da biomassa de cafeeiros em sistemas agroflorestais sob manejo orgânico e convencional em diferentes arranjos. *RBCIAMB*, 53: 134-147. **DOI:** 10.5327/Z2176-947820190488.

Mosteller, F. 1974. The Jackknife. *Rev. Inst. Int. Statist.* 39: 363-368.

Nascimento, A. R. Quantificação de biomassa e carbono em povoamentos de eucalipto. Monografia (Engenharia Florestal). IFMG/São João Evangelista, 2019, 32pg.

Niklas, K.J. 1994. *Plant Allometry: The Scaling of Form and Process*. The University of Chicago Press. Chicago. 395p.

Nogueira Junior, I. R., Ronquim, C. C., Trombin, V., Reina, R., Delgado, F., & Paim, F. A. d. P. Conteúdo e estoque de carbono em *Citrus sinensis* (L. Osbeck) do cinturão citrícola de São

Paulo e triângulo/sudoeste mineiro. Universidade Federal do Paraná/BIOFIX Scientific Journal, v. 8 n. 2 p. 36-42, 2023.

Oliveira, M. M. de; Higuchi, N.; Celes, C. H.; Higuchi, F. G. Tamanho e formas de parcelas para inventários florestais de espécies arbóreas na amazônia central. *Ciência Florestal*, [S. l.], v. 24, n. 3, p. 645–653, 2014. DOI: 10.5902/1980509815744. Disponível em: <https://periodicos.ufsm.br/cienciaflorestal/article/view/3651>. Acesso em: 28 jan. 2025.

Overman, J. P. M.; Witte, H. J. L.; Saldarriga, J.G. 1994. Evaluation of Regression Models for Above-ground Biomass Determination in Amazonia Rainforest. *Forest Ecology and Management*, v.10, p.207-218.

Pilli, R., Anfodillo, T. e Carrer, M. 2006. Towards a functional and simplified allometry for estimating forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 237: 583-593.

Poorter, H.; Karl J. Niklas, Peter B. Reich, Jacek Oleksyn, Pedro Poot, Liesje Mommer. Alocação de biomassa para folhas, caules e raízes: meta-análises de variação interespecífica e controle ambiental. *Novo Fitólogo*, v. 193, n. 2, pág. 334-344, 2011. Disponível em: <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/j.1469-8137.2011.03952.x>. Acesso em: 8 jan. 2025.

Quenouille, M. 1956. Notes on Bias on Estimation. *Biometrika* 43: 353-360.

Sanquetta, C.R.; Watzlawick, L.F.; Corte, A.P.D.; Fernandes, L.A.V. 2006. Inventários florestais: planejamento e execução. Sanquetta et al. (eds). 270p.

Santos, J. dos. 1996. Análise de modelos de regressão para estimar a fitomassa da floresta tropical úmida de terra-firme da Amazônia Brasileira. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. 121 p.

Schreuder, H.T. e Brink, G.E. 1983. The Jackknife – a Useful Statistical Tool. In: *Proceedings of an International Conference: Renewable Resource Inventories for Monitoring Changes and Trends*. Corvallis, Oregon, 531-535.

SEEG. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa Estimativa de Emissões de 2023 - Gases de Efeito Estufa dos Sistemas Alimentares no Brasil. Disponível em: < <https://www.oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/10/SEEG-Sistemas-Alimentares.pdf> >. Acesso em: 20 de junho de 2024.

Segura, M., Kanninen, M., Suárez, D. 2006. Allometric models for estimating aboveground biomass of shade trees and coffee bushes grown together. *Agroforest Syst* 68:143–150. DOI 10.1007/s10457-006-9005-x

Sprugel, D.G. 1983. Correcting for bias in log-transformed allometric equations. *Ecology*, 64(1): 209-210.

Silva, R.P. da. 2007. Alometria, estoque e dinâmica da biomassa de florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM). Tese de Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais/INPA. 152p. Disponível em:

https://repositorio.inpa.gov.br/bitstream/1/4966/1/Roseana_Silva.pdf. Acesso em: 20 de maio de 2023.

Yang, Y.C. e Kung, F.H. 1983. Method for Estimating Bole Volume. *Journal of Forestry*, 81(4): 224 – 227.

Netter, J. e Wasserman, W. 1974. *Applied Linear Statistical Models: Regression, Analysis of Variance, and Experimental Designs*. Richard D. Irwin Inc., Homewood (Illinois): 842p.

Taiz, L. Zeiger, E., Moller, I.M. and Murphy, A. (2015) *Plant Physiology and Development*. 6th Edition, Sinauer Associates, Sunderland, CT.

UNFCCC. *United Nations Framework Convention on Climate Change*. Documents 1992. Disponível em: < <https://unfccc.int/documents> >. Acesso em: 20 de junho de 2024.

Zianis, D. e Mencuccini, M. 2004. On simplifying allometric analyses of forest biomass. *Forest Ecology and Management*, 187: 311-332.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos indicam o potencial de alinhamento entre a produção de café e a remoção de carbono da atmosfera. Desta forma, o carbono passa a representar um potencial indicador da boa gestão das propriedades, evidenciando a presença de um sistema de baixo impacto climático e altamente produtivo.

Neste contexto, as equações alométricas desempenham um papel fundamental, pois permitem a estimativa precisa da biomassa e do carbono armazenado em plantas de café. Estas equações baseiam-se em variáveis facilmente mensuráveis, como a circunferência da altura do colo a 10 cm do solo (CAC) e a altura total das plantas, proporcionando uma abordagem prática e eficiente para o monitoramento do carbono em lavouras de café.

A metodologia destrutiva, apesar de laboriosa e cara, oferece dados essenciais para a calibração e validação de modelos alométricos, garantindo a precisão das estimativas de biomassa. O uso de técnicas avançadas, como o método "*jackknife*", contribui para a redução de vieses e a obtenção de estimativas mais robustas e confiáveis.

Além disso, a adoção de práticas agrícolas sustentáveis, que integram a conservação ambiental e a produção econômica, é vital para enfrentar os desafios da mudança climática. A cafeicultura, quando bem manejada, não só contribui para a mitigação das emissões de GEE através da remoção de carbono, mas também promove a sustentabilidade socioeconômica das comunidades agrícolas.

A análise das equações alométricas desenvolvidas neste estudo para o café do Cerrado Mineiro proporciona uma ferramenta valiosa para os produtores, permitindo a implementação de práticas mais eficientes e sustentáveis. Ao valorizar a capacidade das plantações de café de armazenar carbono, este estudo reforça a importância de políticas agrícolas que promovam a sustentabilidade e a resiliência climática.

Para além disso, a cultura do café tem a capacidade de contribuir significativamente para a mitigação da mudança climática. A mitigação ocorre, principalmente, por meio da remoção de GEE's da atmosfera. Assim, o pé de café, uma planta clorofilada, sequestra o carbono por meio da fotossíntese, ajuda a mitigar o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera. Estes, além de remover o CO₂ e estocar o carbono, armazenam e emitem vapor de H₂O para atmosfera (Martins et al., 2015). Isso leva a manutenção da ciclagem do carbono e da água no ecossistema da paisagem rural e mantém o equilíbrio do microclima local.

Em conclusão, a integração da agricultura regenerativa com práticas agrícolas sustentáveis, aliadas a metodologias precisas para quantificação de biomassa e carbono, é essencial para uma economia de baixo carbono, mitigando a mudança climática e oferecendo benefícios econômicos e sociais. Este estudo contribuiu para o guia de boas práticas do IPCC, demonstrando que o cafeeiro remove CO₂ de forma positiva, representando uma alternativa viável para a proteção ambiental. Espera-se que o carbono possa ser negociado como mercadoria sob o Protocolo de Quioto, agregando valor à cultura do café no Cerrado.

Apesar dos avanços, é determinante realizar mais estudos para aprimorar o conhecimento sobre a captura de carbono pelo cafeeiro e refinar as metodologias de quantificação, o que permitirá o desenvolvimento de políticas mais eficazes e a maximização dos benefícios econômicos, ambientais e sociais dessa prática agrícola.

REFERÊNCIAS

Assad, E. D.; Pinto, H. S. Aquecimento global e cenários futuros da agricultura brasileira. São Paulo: Embrapa/Unicamp. 2008.

Assad, E. D.; Pinto, H. S.; Zullo JR., J. Z.; Ávila, A. M. H. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. In: Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 39, n. 11, 2004. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pab/a/T9BXP8Dz7fMkxPNYQDfnn5s/?lang=pt>. Acesso em 30 Nov 2023.

Barbosa, R.R.N.; Silva, A.A.; Neves, M. G.;Galvão, A.R.A.; Neto, C.F.O. Produção e Sequestro de Carbono na Atmosfera. Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.9, N.16; p. 1783-1798, 2013.

Coltri, Priscila & Zullo Junior, Jurandir & Dubreuil, Vincent & Ramirez, Glaucia & Pinto, Hilton & Coral, Gustavo & Lazarim, Camila. (2015). Empirical models to predict LAI and aboveground biomass of Coffea arabica under full sun and shaded plantation: a case study of South of Minas Gerais, Brazil. Agroforestry Systems. 89. 23. 10.1007/s10457-015-9799-5.

Coltri, Priscila Pereira. Mitigação de emissão de gases de efeito estufa e adaptação do café arábica e condições climáticas adversas. 2012. 148 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Campinas, SP. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.12733/1618457>. Acesso em: 30 jul. 2024.

CONAB. Produção de café cresce 8,2% em 2023 e chega a 55,1 milhões de sacas. Companhia Nacional de Abastecimento. 2023. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5323-producao-de-cafe-cresce-8-2-em-2023-e-chega-a-55-1-milhoes-de-sacas>. Acesso em: 29 jun. 2024.

CONAB. Clima mais favorável e bienalidade positiva apontam produção estimada em 58,08 milhões de sacas de café. 2024. Companhia Nacional de Abastecimento. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/ultimas-noticias/5362-clima-mais-favoravel-e-bienalidade-positiva-apontam-producao-estimada-em-58-08-milhoes-de-sacas-de-cafe#:~:text=A%20produ%C3%A7%C3%A3o%20mundial%20de%20caf%C3%A9,compara%C3%A7%C3%A3o%20com%20a%20temporada%20anterior>. Acesso em: 29 jun. 2024.

CONAB. Acompanhamento da safra brasileira de café. Companhia Nacional de Abastecimento. 2024. Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safra/cafe/boletim-da-safra-de-cafe>. Acesso em: 25 jan. 2025.

CONSELHO DOS EXPORTADORES DE CAFÉ DO BRASIL. CECAFE. Tudo sobre a safra (2023). Disponível em: <<https://www.cecafe.com.br/publicacoes/tudo-sobre-a-safra/>>. Acesso em 15 de out. 2023.

EMBRAPA CAFÉ. *O Cerrado Mineiro*. 2022. Disponível em: <https://www.embrapa.br/cerrados/busca-de-publicacoes/-/publicacao/busca/Culturas%20Perenes?>. Acesso em: 29 jul. 2024.v

FAO. Sustainable agriculture. 2023. Disponível em: <http://www.fao.org/sustainable-agriculture/en/>. Acesso em: 15 de maio de 2023.

Gouveia, R. D. Distribuição espaço-temporal de chuvas no estado de Minas Gerais. Monografia (2023). Geografia. Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: < <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/39956/1/Distribui%C3%A7%C3%A3oEspa%C3%A7oTemporal.pdf>>. Acesso em 10 de maio 2023.

Guaraldo, M. M. S; Oliveira, A. L. R; Coleti, J. C. Entraves e Potencialidades do Café de Montanha: alternativas de agregação de valor. Revista de Ciências Agrárias, v. 41, n. 1, 2019. DOI: <https://doi.org/10.19084/RCA17141>. Acesso em: 03 jan. 2024.

Higuchi, N.; Santos, J.; Lima, A.J.N.; Spanner, G.C.; Souza, C.A.; Lovera, L.H.; Ferraz, J.B.S.; DeArmond, D. Impacts to soil properties still evident 27 years after abandonment in Amazonian log landings. Rev. Impacts to soil properties still evident 27 years after abandonment in Amazonian log landings. Volume 510, Número 120105, 2022. Disponível em < <https://repositorio.inpa.gov.br/handle/1/38490>>. Acesso em: 15 de maio de 2024.

Houghton, R. A. (2003). "Why are we achieving no net terrestrial carbon sink?" *Global Change Biology*, 9(12), 1629-1632.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). (2014). *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change*. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014.

Itatiaia. Café produzido no Cerrado Mineiro é eleito o melhor do mundo. 2024. Disponível em: <https://www.itatiaia.com.br/ultimas-noticias/2024/02/20/cafe-produzido-no-cerrado-mineiro-e-eleito-o-melhor-do-mundo>. Acesso em 14 maio, 2024.

Martins, L. D. et al. Sequestro de carbono em cultivos de Coffea spp. como estratégia de mitigação de mudanças climáticas. In: SIMPÓSIO DE PESQUISA DOS CAFÉS DO BRASIL, 9., 2015, Curitiba. Anais... Brasília, DF: Embrapa Café, 2015, 4 p.

Mozzer, G. B., Sampaio, M. J. A. M. e Dias, F. R. T. Resiliência e adaptação, 2022. In: Plataforma Visão de futuro do Agro. Disponível em: <https://www.embrapa.br/visao-defuturo/adaptacao-a-mudanca-do-clima/sinal-etendencia/resiliencia-e-adaptacao>. Acesso em: 27 abr. 2023.

ONU. Organização das Nações Unidas- Brasil. Objetivos do Desenvolvimento Sustentável. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 09 de janeiro de 2025.

Rajesh, P.V.; B. N. Goswami. Climate Change and Potential Demise of the Indian Deserts. *Atmospheric and Oceanic Physics*. 2022. Disponível em:< <https://arxiv.org/abs/2212.13711>>. Acesso em 08 de Janeiro de 2025.

SEEG. Sistema de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa. Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil: 1970-2022. 2022. Disponível em: https://oc.eco.br/wp-content/uploads/2023/11/Relatorio-SEEG_gases-estufa_2023FINAL.pdf. Acesso em 15 Junho2023.

Silva, A. B, DA; Mantovani, J. R.; Moreira, A. L.; Reis, R. L. N. Estoques de carbono no solo e em plantas de cafeeiro (*Coffea arabica* L.). *Interciencia*, v. 38, n. 4, p. 286, 2013.

United Nations Development Programme (UNDP). Sustainable Development Goals. 2023. Disponível em: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals>. Acesso em: 10 de junho de 2024.

WMO (World Meteorological Organization). (2021). State of the Global Climate 2021. WMO.

APÊNDICE 1

IMPACTO SOCIAL E RELEVÂNCIA DA PESQUISA

A pesquisa aborda um tema de extrema relevância no contexto atual, marcado por desafios globais relacionados à mudança climática e à busca por práticas agrícolas sustentáveis. O Cerrado Mineiro, uma das principais regiões cafeeiras do Brasil, desempenha um papel estratégico tanto na economia nacional quanto na conservação ambiental, devido à sua biodiversidade e à importância do cultivo do café para a geração de renda e emprego.

O estudo busca mensurar a capacidade das áreas de café em remover e estocar carbono, destacando sua contribuição para a mitigação dos efeitos da mudança climática. Essa abordagem evidencia o papel do manejo adequado das lavouras cafeeiras como uma estratégia de remoção de carbono, alinhando-se às metas de sustentabilidade e aos compromissos internacionais para a redução de emissões de gases de efeito estufa.

Os resultados desta pesquisa têm impactos diretos e indiretos na sociedade. Por meio da valorização das práticas agrícolas sustentáveis, produtores poderão acessar mercados mais exigentes, aumentar a competitividade do café do Cerrado Mineiro e agregar valor ao produto.

Além disso, a pesquisa promove a conscientização sobre a importância do equilíbrio entre produção agrícola e preservação ambiental, contribuindo para a implementação de políticas públicas voltadas ao uso sustentável do solo e à recuperação de áreas degradadas.

Assim, este trabalho não apenas fortalece o papel do café do Cerrado Mineiro como um exemplo de agricultura sustentável, mas também reforça a contribuição do setor agrícola para a mitigação da mudança climática, beneficiando a sociedade e o meio ambiente em curto e longo prazo.

Essa pesquisa está relacionada diretamente com diversos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2024), incluindo:

ODS 2 - Fome Zero e Agricultura Sustentável: ao fomentar práticas agrícolas sustentáveis e produtivas.

ODS 12 - Consumo e Produção Responsável: promovendo o uso eficiente dos recursos naturais.

ODS 13 - Ação contra a Mudança Global do Clima: ao evidenciar o papel do café na remoção de carbono e na mitigação dos efeitos climáticos.

ODS 15 - Vida Terrestre: ao cultivo a conservação de ecossistemas terrestres e a recuperação de áreas degradadas.

Assim, este trabalho não apenas fortalece o papel do café do Cerrado Mineiro como um exemplo de agricultura sustentável, mas também reforça a contribuição do setor agrícola para a mitigação da mudança climática, beneficiando a sociedade e o meio ambiente em curto e longo prazo.

APÊNDICE 2

Passos para estimar os coeficientes de regressão, coeficiente de determinação (r^2) e erro padrão de estimativa ou margem de erro ou limite de erro (EPE%) dos três modelos alométricos quando submetidos ao método “*jackknife*”

1. Modelos alométricos testados:

$$(1) B_{\text{tot}} = \beta_0 \text{CAC}^{\beta_1} + \varepsilon_i$$

$$(2) B_{\text{tot}} = \beta_0 \text{CAC}^{\beta_1} \text{HT}^{\beta_2} + \varepsilon_i$$

$$(3) B_{\text{tot}} = \beta_0 \text{HT}^{\beta_1} + \varepsilon_i$$

Onde: B_{tot} = biomassa total (parte aérea + raízes), em quilos; CAC = circunferência a altura do colo a 10 cm do solo, em centímetros e HT = altura total em metros.

2. Modelos resultantes são:

$$(1) B_{\text{tot}} = a \text{CAC}^b$$

$$(2) B_{\text{tot}} = a \text{CAC}^b \text{HT}^c$$

$$(3) B_0 = a \text{HT}^b$$

3. Aplicação do método “*jackknife*” aos dados observados

Foram considerados dois subgrupos (r), $r = 12$ e $r = 6$. Os coeficientes de regressão, o coeficiente de determinação e o erro padrão de estimativa foram estimados por meio da média aritméticas dos pseudo valores para cada subgrupo submetido ao método “*jackknife*”, como se segue

$$\bar{\theta}_* = (1/r) \sum_{j=1}^r \hat{\theta}_{*j} \Rightarrow \text{para } \begin{cases} j=1, 2, \dots, 12 \\ j=1, 2, \dots, 6 \end{cases}$$

Onde:

$$\hat{\theta}_{*j} = (r) \hat{\theta} - (r-1) \hat{\theta}_{-j} \Rightarrow \text{pseudo valor, } j = 1, 2, \dots, 12 \text{ ou } j = 1, 2, \dots, 6$$

$$\hat{\theta} \Rightarrow \text{estimativa (coeficientes etc.) de cada subgrupo}$$

$$\hat{\theta}_{-j} \Rightarrow \text{estimativa parcial com exclusão do } j\text{-ésima observação do subgrupo}$$

4. Coeficientes de regressão, coeficiente de determinação e erro padrão de estimativa

$$(1) B_{tot} = a CAC^b$$

$$(r = 12)$$

Tabela A1: Estimativas dos coeficientes de regressão, coeficiente de determinação e erro padrão de estimativa de cada subgrupo, quando submetidas ao “jackknife”, $r = 12$

$r = 12$	a	b	r^2	EPE (%)
$\hat{\theta}$	2,2764	0,7655	0,8571	3,66
θ_{-1}	2,3357	0,7566	0,8466	4,64
θ_{-2}	2,5004	0,7337	0,8596	4,40
θ_{-3}	2,1649	0,7829	0,8556	4,65
θ_{-4}	2,5071	0,7315	0,8423	4,43
θ_{-5}	2,3012	0,7617	0,8384	4,61
θ_{-6}	2,2457	0,7703	0,8484	4,66
θ_{-7}	2,1238	0,7965	0,8413	4,89
θ_{-8}	2,2473	0,7753	0,8657	4,67
θ_{-9}	2,2586	0,7639	0,8589	4,74
θ_{-10}	2,0446	0,8139	0,8610	4,66
θ_{-11}	2,2761	0,7642	0,8518	4,88

Tabela A2: Pseudo valores

Pseudo valores	a	b	r^2	EPE (%)
θ_{*1}	1,6242	0,8637	0,9730	1,19
θ_{*2}	-0,1871	1,1154	0,8302	3,76
θ_{*3}	3,5027	0,5744	0,8740	1,09
θ_{*4}	-0,2616	1,1393	1,0202	3,43
θ_{*5}	2,0033	0,8078	1,0629	1,44
θ_{*6}	2,6147	0,7134	0,9529	0,92
θ_{*7}	3,9557	0,4247	1,0309	-1,61
θ_{*8}	2,5966	0,6582	0,7630	0,81
θ_{*9}	2,4720	0,7836	0,8376	0,09
θ_{*10}	4,8269	0,2328	0,8148	0,94
θ_{*11}	2,2794	0,7795	0,9150	-1,52
θ_{*12}	2,2709	0,9239	-0,0268	19,88
Total	27,6976	9,0166	10,0476	30,41
Média	2,3081	0,7514	0,8373	2,53

Os pseudo valores dos coeficientes de regressão (a, b), coeficiente de determinação (r^2) e erro padrão de estimativa (EPE %) foram calculados utilizando os resultados da Tabela A1 da seguinte maneira:

(i) Para o coeficiente “a”

$$\theta_{*1} = 2,2764 \times (12) - 2,3357 \times (11) = 1,6242$$

$$\theta_{*2} = 2,2764 \times (12) - 2,5004 \times (11) = -0,1871$$

etc.

$$\theta_{*12} = 2,2764 \times (12) - 2,2761 \times (11) = 2,2709$$

O coeficiente “a” submetido ao “*jackknife*” é a média aritméticas dos pseudo valores, que é igual 2,3081.

O mesmo para o coeficiente “b”, r^2 e EPE%.

$$(1) B_{tot} = a CAC^b$$

$$r = 6$$

Tabela A3: Estimativas dos coeficientes de regressão, coeficiente de determinação e erro padrão de estimativa de cada subgrupo, quando submetidas ao “*jackknife*”, $r = 6$

$r = 6$	a	b	r^2	EPE (%)
$\hat{\theta}$	2,4450	0,7236	0,9116	4,94
θ_{-1}	2,5615	0,7074	0,8954	5,84
θ_{-2}	2,1174	0,7734	0,9190	5,57
θ_{-3}	3,1007	0,6396	0,9038	4,71
θ_{-4}	2,3954	0,7379	0,9156	6,13
θ_{-5}	2,4091	0,7138	0,9629	3,84
θ_{-6}	2,0694	0,7987	0,8912	6,29

Tabela A4: Pseudo valores

Pseudo valores	a	b	r^2	EPE (%)
θ_{*1}	1,8625	0,8045	0,9924	0,41
θ_{*2}	4,0828	0,4744	0,8743	1,76
θ_{*3}	-0,8337	1,1432	0,9504	6,08
θ_{*4}	2,6929	0,6520	0,8913	-1,04
θ_{*5}	2,6247	0,7722	0,6552	10,43
θ_{*6}	4,3232	0,3477	1,0135	-1,81
Total	14,7523	4,1940	5,3770	15,82
Média	2,4587	0,6990	0,8962	2,64

(i) Para o coeficiente “b”

$$\theta_{*1} = 0,7236 \times (6) - 0,7074 \times (5) = 0,8045$$

$$\theta_{*2} = 0,7236 \times (6) - 0,7734 \times (5) = 0,4744$$

etc.

$$\theta_{*6} = 0,7236 \times (6) - 0,7987 \times (5) = 0,3477$$

O coeficiente “b” submetido ao “*jackknife*” é a média aritméticas dos pseudo valores, que é igual 0,6990.

O mesmo para o coeficiente “a”, r^2 e EPE%.

$$(2) B_{tot} = a CAC^b HT^c$$

$$(r = 12)$$

Tabela A5: Estimativas dos coeficientes de regressão, coeficiente de determinação e erro padrão de estimativa de cada subgrupo, quando submetidas ao “jackknife”, $r=12$

$r = 12$	a	b	c	r^2	EPE (%)
$\hat{\theta}$	2,9542	0,2061	1,0818	0,8991	3,85
θ_{-1}	3,0725	0,1905	1,0860	0,8925	4,12
θ_{-2}	3,0684	0,2348	0,9864	0,8956	4,03
θ_{-3}	2,7677	0,2068	1,1323	0,9021	4,06
θ_{-4}	3,1047	0,2152	1,0203	0,8851	4,01
θ_{-5}	3,0306	0,1954	1,0855	0,8863	4,11
θ_{-6}	2,8246	0,1840	1,1687	0,8975	4,07
θ_{-7}	2,9006	0,2236	1,0589	0,8836	4,44
θ_{-8}	3,0280	0,1039	1,3193	0,9277	3,64
θ_{-9}	3,1992	0,0480	1,3902	0,8959	4,32
θ_{-10}	2,8335	0,2560	1,0057	0,8897	4,40
θ_{-11}	2,9530	0,2066	1,0794	0,8950	4,36
θ_{-12}	2,7371	0,3645	0,7484	0,9592	2,52

Tabela A6: Pseudo valores

Pseudo valores	a	b	c	r^2	EPE (%)
θ_{*1}	1,6532	0,3771	1,0364	0,9716	0,95
θ_{*2}	1,6987	-0,1099	2,1322	0,9380	1,93
θ_{*3}	5,0056	0,1973	0,5264	0,8668	1,59
θ_{*4}	1,2990	0,1057	1,7592	1,0529	2,09
θ_{*5}	2,1139	0,3235	1,0419	1,0400	1,08
θ_{*6}	4,3796	0,4482	0,1268	0,9171	1,51
θ_{*7}	3,5445	0,0131	1,3344	1,0699	-2,65
θ_{*8}	2,1427	1,3298	-1,5297	0,5850	6,24
θ_{*9}	0,2592	1,9448	-2,3095	0,9341	-1,23
θ_{*10}	4,2821	-0,3433	1,9198	1,0023	-2,19
θ_{*11}	2,9680	0,2001	1,1088	0,9443	-1,74
θ_{*12}	5,3422	-1,5370	4,7498	0,2379	18,56
Total	34,6887	2,9496	11,8963	10,5599	26,13
Média	2,8907	0,2458	0,9914	0,8800	2,18

(i) Para o coeficiente “c”

$$\theta_{*1} = 1,0818 \times (12) - 1,0860 \times (11) = 1,0364$$

$$\theta_{*2} = 1,0818 \times (12) - 0,9864 \times (11) = 2,1322$$

etc.

$$\theta_{*12} = 1,0818 \times (12) - 0,7484 \times (11) = 4,7498$$

O coeficiente “c” submetido ao “*jackknife*” é a média aritméticas dos pseudo valores, que é igual 0,9914.

O mesmo para o coeficiente “a”, “b”, r^2 e EPE%.

$$(2) \mathbf{B}_{\text{tot}} = \mathbf{a} \mathbf{CAC}^b \mathbf{HT}^c$$

$$(r = 6)$$

Tabela A7: Estimativas dos coeficientes de regressão, coeficiente de determinação e erro padrão de estimativa de cada subgrupo, quando submetidas ao “*jackknife*”, $r = 6$

$r = 6$	a	b	c	r^2	EPE (%)
$\hat{\theta}$	2,8885	0,3205	0,7905	0,9484	4,36
θ_{-1}	3,0341	0,3051	0,7862	0,9394	5,45
θ_{-2}	2,3734	0,3219	0,9442	0,9712	4,07
θ_{-3}	3,3251	0,3395	0,6326	0,9377	4,64
θ_{-4}	2,8558	0,2612	0,9652	0,9740	4,17
θ_{-5}	2,4051	0,7176	-0,0075	0,9629	4,70
θ_{-6}	6,1317	-0,5336	2,0302	0,9545	4,98

Tabela A8: Pseudo valores

Pseudo valores	a	b	c	r^2	EPE (%)
θ_{*1}	2,1604	0,3976	0,8118	0,9931	-1,09
θ_{*2}	5,4638	0,3137	0,0220	0,8343	5,78
θ_{*3}	0,7056	0,2256	1,5799	1,0017	2,93
θ_{*4}	3,0518	0,6172	-0,0830	0,8201	5,30
θ_{*5}	5,3056	-1,6646	4,7802	0,8760	2,63
θ_{*6}	-13,3275	4,5913	-5,4083	0,9180	1,23
Total	3,3597	4,4806	1,7027	5,4432	16,77
Média	0,5600	0,7468	0,2838	0,9072	2,80

(i) Para o coeficiente de determinação “ r^2 ”

$$\theta_{*1} = 0,9494 \times (6) - 0,9394 \times (5) = 0,9931$$

$$\theta_{*2} = 0,9494 \times (6) - 0,9712 \times (5) = 0,9712$$

etc.

$$\theta_{*6} = 0,9494 \times (6) - 0,9545 \times (5) = 0,9180$$

O coeficiente “ r^2 ” submetido ao “*jackknife*” é a média aritméticas dos pseudo valores, que é igual 0,9072.

O mesmo para o coeficiente “a”, “b” e EPE%.

$$(3) B_0 = a HT^b$$

$$(r = 12)$$

Tabela A9: Estimativas dos coeficientes de regressão, coeficiente de determinação e erro padrão de estimativa de cada subgrupo, quando submetidas ao “jackknife”, $r=12$

r = 12	a	b	r²	EPE (%)
$\hat{\theta}$	3,4173	1,4335	0,8939	3,75
θ_{-1}	3,5437	1,4046	0,8878	3,97
θ_{-2}	3,5854	1,3953	0,8883	3,93
θ_{-3}	3,2037	1,4853	0,8967	3,93
θ_{-4}	3,5999	1,3909	0,8784	3,89
θ_{-5}	3,5183	1,4098	0,8812	3,96
θ_{-6}	3,1994	1,4872	0,8931	3,91
θ_{-7}	3,4515	1,4217	0,8780	4,29
θ_{-8}	3,2524	1,4991	0,9263	3,46
θ_{-9}	3,2936	1,4778	0,8958	4,07
θ_{-10}	3,4367	1,4255	0,8841	4,25
θ_{-11}	3,4171	1,4320	0,8896	4,22
θ_{-12}	3,5279	1,3769	0,9410	2,85

Tabela A10: Pseudo valores

Pseudo valores	a	b	r²	EPE (%)
θ_{*1}	2,0266	1,7512	0,9609	1,36
θ_{*2}	1,5680	1,8540	0,9553	1,78
θ_{*3}	5,7663	0,8642	0,8636	1,75
θ_{*4}	1,4090	1,9024	1,0642	2,16
θ_{*5}	2,3057	1,6943	1,0339	1,45
θ_{*6}	5,8144	0,8436	0,9026	1,92
θ_{*7}	3,0415	1,5633	1,0686	-2,20
θ_{*8}	5,2315	0,7124	0,5379	6,91
θ_{*9}	4,7779	0,9469	0,8733	0,19
θ_{*10}	3,2040	1,5218	1,0014	-1,82
θ_{*11}	3,4189	1,4502	0,9416	-1,40
θ_{*12}	2,2001	2,0568	0,3758	13,59
Total	40,7639	17,1612	10,5790	46,74
Média	3,3970	1,4301	0,8816	2,14

(i) Para o erro “EPE%”

$$\theta_{*1} = 3,75 \times (12) - 3,97 \times (11) = 1,36$$

$$\theta_{*2} = 3,75 \times (12) - 3,93 \times (11) = 1,78$$

etc.

$$\theta_{*12} = 3,75 \times (12) - 2,85 \times (11) = 13,59$$

O erro “EPE%” submetido ao “*jackknife*” é a média aritméticas dos pseudo valores, que é igual 2,14.

O mesmo para o coeficiente “a”, “b” e “r²”

$$(3) B_0 = a HT^b$$

$$r = 6$$

Tabela A11: Estimativas dos coeficientes de regressão, coeficiente de determinação e erro padrão de estimativa de cada subgrupo, quando submetidas ao “*jackknife*”, r =6

r = 6	a	b	r²	EPE (%)
$\hat{\theta}$	3,6772	1,3173	0,9289	4,43
θ_{-1}	3,9280	1,2653	0,9190	5,14
θ_{-2}	3,0348	1,4704	0,9504	4,36
θ_{-3}	4,2125	1,2066	0,9028	4,73
θ_{-4}	3,4660	1,3993	0,9589	4,28
θ_{-5}	3,6686	1,3202	0,9087	6,02
θ_{-6}	3,8651	1,2432	0,9446	4,49

Tabela A12: Pseudo valores

Pseudo valores	a	b	r²	EPE (%)
θ_{*1}	2,4232	1,5777	0,9782	0,86
θ_{*2}	6,8892	0,5520	0,8213	4,76
θ_{*3}	1,0005	1,8710	1,0593	2,90
θ_{*4}	4,7330	0,9076	0,7792	5,15
θ_{*5}	3,7201	1,3029	1,0301	-3,54
θ_{*6}	2,7376	1,6883	0,8505	4,13
Total	21,5036	7,8994	5,5185	29,03
Média	3,5839	1,3166	0,9198	2,38

APÊNDICE 3

RELATÓRIO DE ENSAIO FINAL			
RELATÓRIO DE ENSAIO N°:	2016799-0	São Paulo	(Comp)
Data do Relatório de Ensaio:	25/04/2024		
Página:	1/8		

FAZ STA BARBARA - LUG ESTANC STA
MONICA
Juliana Mello
BRASIL



Cliente:	BR_BARBA_1
Projeto n°:	BR_BARBA_1_SPL_24_00001
Analisado por: MERIEUX NUTRISCIENCES BRASIL-SÃO PAULO(exceto onde →) Rua Vigário Taques Bittencourt, No. 63 - Santo Amaro 04755-060 São Paulo Telefone: +55 11 5645-4700 Fax: +55 E-mail: alimentos.care.br@mxns.com	
Recebido de: FAZ STA BARBARA - LUG ESTANC STA MONICA SANTA BARBARA LUGAR ESTANCIA SANTA MONIC - ZONA RURAL 38500-000 MONTE CARMELO	
Telefone: 34 38422590	
E-mail: jjumello19@cloud.com	
Etiqueta ID: BR-00002153	

Para:

DESCRIÇÃO DA AMOSTRA

Nº da Amostra: 7244182

Nome Comercial:

CAFÉ

Data de Chegada: 29/11/2023 14:00

Temperatura de chegada [°C]: 21,0

Quantidade de Amostra: 250g

Forma de Recebimento: Coletado / entregue ao Laboratório: cliente

RESULTADOS ANALÍTICOS

RESULTADOS QUÍMICOS

Testes	Resultados [incerteza]	Unidades	Limites [Valor Esperado]	LD	LQ
Gifosato e Glifosinato MR - PA 032 - Determinação de gifosato, glifosinato por cromatografia líquida acoplada a espectrometria de massas	ND	mg/kg	-	0,005	0,010
Glifosato	ND	mg/kg	-	0,025	0,050

RESULTADOS DE RESÍDUOS DE CONTAMINANTES

Componentes não detectados, Pesticidas, MR PA 002 - Cromatografia Líquida acoplada a detector de espectrometria de massa (LC-MSMS), [CAS nº], (Unidades, LD, LQ, Recuperação)

25/04/2024	25/04/2024		
2,4-D, [94-75-7], (mg/kg/0,005/0,010)	2,6-Dichlorobenzamide, [2008-58-4], (mg/kg/0,005/0,010)	3,5-Dichloroaniline, [626-43-7], (mg/kg/0,005/0,010)	3-OH Carbofuran, [16655-82-6], (mg/kg/0,005/0,010)
6-Benziladenine, [1214-39-7], (mg/kg/0,005/0,010)	Abamectin, [71751-41-2], (mg/kg/0,005/0,010)	Acephat, [30560-19-1], (mg/kg/0,005/0,010)	Acetamiprid, [135410-20-7], (mg/kg/0,005/0,010)
Acetochlor, [34256-82-1], (mg/kg/0,005/0,010)	Acibenzolar-S-methyl, [135158-54-2], (mg/kg/0,005/0,010)	Aclonifen, [74070-46-5], (mg/kg/0,005/0,010)	Acrinathrin, [101007-06-1], (mg/kg/0,005/0,010)
Alachlor, [15972-60-8], (mg/kg/0,005/0,010)	Aldicarb, [-651437], (mg/kg/0,005/0,010)	Aldicarb sufoxide, [1646-87-3], (mg/kg/0,005/0,010)	Aldicarb sulfone, [1646-88-4], (mg/kg/0,005/0,010)
Aldrin, [309-00-2], (mg/kg/0,005/0,010)	Allethrin, [584-79-2], (mg/kg/0,005/0,010)	Allidochlor, [93-71-0], (mg/kg/0,005/0,010)	Ametoctradin, [865318-97-4], (mg/kg/0,005/0,010)
Ametryn, [-389005], (mg/kg/0,005/0,010)	Amidosulfuron, [120923-37-7], (mg/kg/0,005/0,010)	Aminocarb, [2032-59-9], (mg/kg/0,005/0,010)	Amitraz, [33089-61-1], (mg/kg/0,005/0,010)