



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

ALESSANDRA HELENA RAMIRES MACHADO

**DESEMPENHO FITOTÉCNICO E FITOSSANITÁRIO DE
Coffea arabica L. EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS**

Londrina
2026

ALESSANDRA HELENA RAMIRES MACHADO

**DESEMPENHO FITOTÉCNICO E FITOSSANITÁRIO DE
Coffea arabica L. EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação
em Agronomia da Universidade Estadual de
Londrina – UEL, para a obtenção do título de
Doutora em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Hiroshi Sera

Coorientadora: Dr^a. Patrícia Helena Santoro

Londrina
2026

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

M149d MACHADO, ALESSANDRA HELENA RAMIRES.
Desempenho fitotécnico e fitossanitário de *Coffea arabica* L. em sistemas
agroflorestais / ALESSANDRA HELENA RAMIRES MACHADO. -
Londrina, 2026.
145 f.: il.

Orientador: Gustavo Hiroshi Sera
Coorientadora: Patrícia Helena Santoro.
Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina,
Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia,
2026.
Inclui bibliografia.

1. Cafeeiros - Tese. 2. Sistemas agroflorestais - Tese. 3. Sustentabilidade
- Tese. 4. Microclima - Tese. I. Sera, Gustavo Hiroshi. II. Santoro, Patrícia
Helena. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias.
Programa de Pós-Graduação em Agronomia. IV. Título.

CDU 63

ALESSANDRA HELENA RAMIRES MACHADO

**DESEMPENHO FITOTÉCNICO E FITOSSANITÁRIO DE
Coffea arabica L. EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS**

BANCA EXAMINADORA

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina – UEL, para a obtenção do título de Doutora em Agronomia.

Dra. Francieli De Fatima Missio,
Universidade Estadual de Londrina – UEL

Dr. Wesley Machado
Universidade Federal de Viçosa – UFV

Dra. Ângela Beatriz Ferreira Da Costa
IDR-Paraná

Dr. Alison Fernando Nogueira
Universidade Unopar Pitágoras Anhanguera

Londrina, 27 de fevereiro de 2026.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força, sabedoria e perseverança concedidas ao longo desta caminhada, sustentando-me nos momentos de desafio e renovando minha esperança a cada etapa vencida.

À Universidade Estadual de Londrina (UEL), pela oportunidade de realização do Doutorado e pela formação científica sólida que contribuiu de maneira decisiva para meu crescimento acadêmico e profissional.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, pela estrutura oferecida, pelo ambiente acadêmico estimulante e pelo compromisso com a excelência na formação de pesquisadores.

À Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado, fundamental para a viabilização desta pesquisa e para a consolidação da minha formação acadêmica. O apoio da CAPES é essencial para a qualificação de novos doutores e para o fortalecimento da ciência no Brasil.

Ao Consórcio Pesquisa Café, pelo fomento concedido ao projeto, contribuindo para a execução das atividades experimentais e para o avanço científico da cafeicultura brasileira.

Ao Prof. Dr. Gustavo Hiroshi Sera, pela orientação, pelas contribuições científicas e pelo acompanhamento durante o desenvolvimento desta tese.

À Prof^a Dr^a Patrícia Helena Santoro, pela coorientação e pelas contribuições do desenvolvimento deste trabalho.

Ao Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná (IDR-Paraná), pela disponibilização da área experimental e pelo suporte técnico na condução dos experimentos.

Aos professores membros da banca examinadora, pela disponibilidade, atenção e valiosas contribuições compartilhadas ao longo deste processo. As sugestões e considerações apresentadas foram fundamentais para o aprimoramento e fortalecimento científico deste estudo.

Aos colegas de pesquisa e de campo, que contribuíram direta ou indiretamente para a coleta de dados e execução das atividades experimentais, pela colaboração e companheirismo.

À minha família, meu alicerce e minha maior fonte de força, por todo o amor, apoio incondicional e compreensão nos inúmeros momentos de ausência ao longo desta caminhada. Aos meus filhos, Cainan e Thaynara, à minha filha Victoria, aos meus genros Fabio Henrique e Marcos, à minha nora Sabrina, e aos meus amados netos Gianna, Maria Valentina e Henrique, que iluminaram meus dias e renovaram minhas forças mesmo nos períodos mais difíceis. Cada gesto de carinho, incentivo e compreensão foi essencial para que eu mantivesse a coragem e a determinação necessárias para seguir em frente e concretizar este grande sonho.

A todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa, meus sinceros agradecimentos.

Na natureza, nada existe sozinho

Rachel Carson

RESUMO

MACHADO, Alessandra Helena Ramires. **Desempenho Fitotécnico e Fitossanitário de *Coffea arabica* L. em Sistemas Agroflorestais**: 2026. 143 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Centro de Ciências Agrárias Universidade Estadual de Londrina, 2026.

A adoção de sistemas agroflorestais (SAFs) na cafeicultura tem sido considerada uma alternativa ao monocultivo para a adaptação às variações climáticas. Contudo, ainda são limitadas as informações sobre os efeitos de diferentes espécies arbóreas no desempenho do sistema. Esse estudo avaliou o desempenho fitotécnico do cafeeiro e o crescimento dendrométrico de espécies arbóreas em SAFs, os efeitos sobre a maturação dos frutos, a incidência da broca do café (*Hypothenemus hampei*) e a ocorrência de plantas daninhas, em comparação ao monocultivo. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados, com quatro tratamentos e quatro repetições (monocultivo, cafeeiros com *Moringa oleifera*, cafeeiros com *Croton floribundus* e cafeeiros com *Senna macranthera*), entre 2017 a 2021, em Londrina, PR. Foram avaliadas variáveis de crescimento vegetativo do cafeeiro, estádios de maturação dos frutos, incidência da broca do café, cobertura do solo, massa seca e composição florística de plantas daninhas, e variáveis dendrométricas das espécies arbóreas. Os dados foram analisados conforme a estrutura experimental e temporal das avaliações, utilizando-se modelos lineares mistos quando apropriado, com comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. O crescimento das árvores ao longo das avaliações, evidenciando respostas distintas de adaptação às condições edafoclimáticas locais. A maturação dos frutos, a incidência da broca do café e a dinâmica das plantas daninhas variaram em função do sistema de cultivo e da época de avaliação, indicando que a presença e as características estruturais das espécies arbóreas interferem na dinâmica produtiva e fitossanitária do cafeeiro. A comunidade de plantas daninhas apresentou variação sazonal, com predominância de *Parthenium hysterophorus* em diferentes períodos., além de alterações na composição florística ao longo do ciclo avaliado, enquanto a cobertura do solo e a massa seca responderam de forma distinta às condições dos sistemas avaliados. Os resultados demonstram que os SAFs com cafeeiros promovem alterações integradas no ambiente, cuja magnitude depende das características da espécie arbórea consorciada e da variabilidade climática temporal. Esses resultados contribuem para o entendimento da dinâmica integrada de SAFs de cafeeiros e para a seleção de espécies arbóreas com maior potencial de uso em arranjos agroflorestais.

Palavras-chave: *coffea arabica*; sistemas agroflorestais; sombreamento; maturação dos frutos; *hypothenemus hampei*; plantas daninhas.

ABSTRACT

MACHADO, Alessandra Helena Ramires. **Phytotechnical and Phytosanitary Performance of *Coffea arabica* L. in Agroforestry Systems**: 2026. 143 p. Tese do Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Thesis (Doctorate in Agronomy) – Center for Agricultural Sciences, State University of Londrina, 2026.

The adoption of agroforestry systems (AFS) in coffee cultivation has been considered an alternative to monoculture for adaptation to climate variations. However, information on the effects of different tree species on system performance is still limited. This study evaluated the phytotechnical performance of coffee plants and the dendrometric growth of tree species in AFS, the effects on fruit ripening, the incidence of coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*), and the occurrence of weeds, in comparison to monoculture. The experiment was conducted in a randomized block design, with four treatments and four replications (monoculture, coffee plants with *Moringa oleifera*, coffee plants with *Croton floribundus*, and coffee plants with *Senna macranthera*), between 2017 and 2021, in Londrina, PR. Variables related to coffee plant vegetative growth, fruit ripening stages, coffee berry borer incidence, soil cover, dry mass and floristic composition of weeds, and dendrometric variables of tree species were evaluated. Data were analyzed according to the experimental and temporal structure of the evaluations, using linear mixed models when appropriate, with mean comparisons using Tukey's test at a 5% probability level. Tree growth throughout the evaluations showed distinct adaptation responses to local edaphoclimatic conditions. Fruit ripening, coffee berry borer incidence, and weed dynamics varied depending on the cultivation system and evaluation period, indicating that the presence and structural characteristics of tree species interfere with the productive and phytosanitary dynamics of coffee plants. The weed community showed seasonal variation, with a predominance of **Parthenium hysterophorus** in different periods, in addition to changes in floristic composition throughout the evaluated cycle, while soil cover and dry mass responded differently to the conditions of the evaluated systems. The results demonstrate that agroforestry systems with coffee plants promote integrated changes in the environment, the magnitude of which depends on the characteristics of the associated tree species and temporal climate variability. These results contribute to the understanding of the integrated dynamics of coffee-based agroforestry systems and to the selection of tree species with greater potential for use in agroforestry arrangements.

Key-words: *coffea arabica*; agroforestry systems; shading; fruit ripening; *hypothenemus hampei*; weeds.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Espécie arbórea <i>Moringa oleifera</i>	29
Figura 2 – Espécie arbórea <i>Croton floribundus</i>	30
Figura 3 – Espécie arbórea <i>Senna macranthera</i>	31
Figura 4 – Esquema de distribuição espacial dos cafeeiros e espécies arbóreas na parcela experimental total e na parcela útil em sistemas agroflorestais.	54
Figura 5 – Correlação de Pearson entre variáveis dendrométricas de espécies arbóreas em sistema agroflorestal de cafeeiros. Londrina, PR.	70
Figura 6 – Ordenação multivariada da análise de componentes principais (PCA) de variáveis dendrométricas das espécies arbóreas em sistema agroflorestal de cafeeiros. Londrina, PR.	72
Figura 7 – Altura total dos cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais no 2º, 6º e 8º ano após o plantio. Londrina, PR.	74
Figura 8 – Temperatura mínima do ar a 1,5 m em cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais, no 8º ano após o plantio (setembro e dezembro) e no 9º ano (abril e julho). Londrina, PR.	76
Figura 9 – Temperatura máxima do ar a 1,5 m em de altura cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais no 8º ano após o plantio (setembro e dezembro) e no 9º ano (abril e julho). Londrina, PR.	76
Figura 10 – Amplitude térmica do ar a 1,5 m de altura em cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais no 8º ano após o plantio (setembro e dezembro) e no 9º ano (abril e julho). Londrina, PR.	77
Figura 11 – Umidade relativa do ar a 2 m de altura em cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais no 8º ano após o plantio (setembro e dezembro) e no 9º ano (abril e julho). Londrina, PR.	77
Figura 12 – Diâmetro do caule dos cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais no 2º, 6º e 8º ano após o plantio. Londrina, PR.	78
Figura 13 – Diâmetro da copa dos cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais no 2º, 6º e 8º ano após o plantio. Londrina, PR.	79
Figura 14 – Número de ramos dos cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais no 8º ano após o plantio. Londrina, PR.	81
Figura 15 – Esquema de distribuição espacial dos cafeeiros e espécies arbóreas na parcela experimental total e na parcela útil em sistemas agroflorestais.	91

Figura 16 – Porcentagem de frutos nos estádios de maturação verde (A), cereja (B) e seco (C) em função da espécie arbórea, em cafeeiros conduzidos em monocultivo e sistemas agroflorestais, de 2019 e 2021. Londrina, PR. .95	95
Figura 17 – Porcentagem de frutos nos estádios de maturação verde (A), verde-cana (B), cereja (C), passa (D) e seco (E) em função do ano agrícola, em cafeeiros conduzidos em monocultivo e sistemas agroflorestais, de 2019 e 2021. Londrina, PR.96	96
Figura 18 – Porcentagem de frutos brocados nos estádios de maturação verde (A), verde-cana (B), cereja (C), passa (D) em função da interação entre espécie arbórea e ano agrícola, em cafeeiros conduzidos em monocultivo e sistemas agroflorestais, de 2019 e 2021. Londrina, PR.98	98
Figura 19 – Porcentagem de frutos brocados no estágio de maturação seco para o efeito isolado de espécie arbórea (A) e de ano agrícola (B), em cafeeiros conduzidos em monocultivo e sistemas agroflorestais, de 2019 e 2021. Londrina, PR.99	99
Figura 20 – Maturação dos frutos do cafeeiro e incidência de <i>Hypothenemus hampei</i> por estágio de maturação, em monocultivo e sistemas agroflorestais, de 2017 (A), 2018 (B), 2019 (C), 2020 (D) e 2021 (E). Londrina, PR..... 100	100
Figura 21 – Precipitação mensal entre 2017 a 2021 e média histórica do período de 1976 a 2025. Londrina, PR..... 101	101
Figura 22 – Umidade relativa entre 2017 a 2021 e média histórica do período de 1976 a 2025. Londrina, PR. 103	103
Figura 23 – Temperatura máxima, mínima e média do ar de 2017 a 2021 e média histórica do período de 1976 a 2025. Londrina, PR. 104	104
Figura 24 – Esquema de distribuição espacial dos cafeeiros e espécies arbóreas na parcela experimental total e na parcela útil em sistemas agroflorestais..... 118	118
Figura 25 – Cobertura do solo por plantas daninhas nas entrelinhas de cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais, de julho de 2020 a setembro de 2021. Londrina, PR. 120	120
Figura 26 – Precipitação pluviométrica mensal e temperatura média do ar de julho de 2020 a setembro de 2021. Londrina, PR..... 122	122
Figura 27 – Cobertura do solo por plantas daninhas e composição florística das espécies nas entrelinhas de cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais, de julho de 2020 a setembro de 2021. Londrina, PR.... 124	124

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Desenvolvimento vegetativo e reprodutivo de <i>Coffea arabica</i> L. abrangendo seis fases fenológicas ao longo de 24 meses.	21
Tabela 2 – Crescimento inicial das espécies arbóreas em sistema agroflorestal de cafeeiros, expresso pelas médias de altura total, em diferentes tempos de avaliação. Londrina, PR.	57
Tabela 3 – Diâmetro médio do coleto das espécies arbóreas em sistemas agroflorestais com cafeeiro, em diferentes meses após o plantio. Londrina, PR.	60
Tabela 4 – Diâmetro médio do caule das espécies arbóreas em sistemas agroflorestais com cafeeiro, em diferentes meses após o plantio. Londrina, PR.	60
Tabela 5 – Crescimento inicial das espécies arbóreas em sistema agroflorestal de cafeeiros, expresso pelas médias do diâmetro da copa, em diferentes meses após o plantio. Londrina, PR.....	62
Tabela 6 – Estrutura dendrométrica das espécies arbóreas no 8º e 9º ano após o plantio em sistema agroflorestal de cafeeiros. Londrina, PR.....	64
Tabela 7 – Índices morfométricos das espécies arbóreas no 8º e 9º ano, em sistema agroflorestal de cafeeiros. Londrina, PR.	67
Tabela 8 – Resumo da análise de variância para os estádios de maturação de frutos e incidência da broca do café em cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais, de 2017 a 2021. Londrina, PR	93
Tabela 9 – Plantas daninhas, distribuídas por família, espécie nas entre linhas de cafeeiros em monocultivo e em sistemas agroflorestais no período de julho de 2020 a setembro de 2021, Londrina, PR.	124
Tabela 10 – Massa seca de plantas daninhas nas entrelinhas de cafeeiros em monocultivo e em sistemas agroflorestais, no período de julho de 2020 a setembro de 2021, Londrina, PR.....	135

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABC+	Programa de Agricultura de Baixa Emissão de Carbono
CONAB	Companhia Nacional de Abastecimento
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
FAO	Food and Agriculture Organization
ICRAF	International Centre for Research in Agroforestry
ICO	International Coffee Organization
ILP	Integração lavoura-pecuária
ILPF	Integração lavoura-pecuária-floresta
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
MAPA	Ministério da Agricultura e Pecuária
MIPD	Manejo integrado de plantas daninhas
PLANAPO	Plano Nacional de Agroecologia e Produção Orgânica
PRONAF	Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar
Programa	
SAFs	Sistemas agroflorestais
SASP	Sistemas agrossilvipastoris
UEL	Universidade Estadual de Londrina
UNFCCC	United Nations Framework Convention on Climate Change

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL.....	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
2.1 BOTÂNICA, FENOLOGIA E IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DO CAFEEIRO	19
2.2 SISTEMAS AGROFLORESTAIS E MODIFICAÇÃO MICROCLIMÁTICA	23
2.3 DESENVOLVIMENTO FITOTÉCNICO DO CAFEEIRO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS.....	25
2.4 ESPÉCIES ARBÓREAS EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM CAFEEIROS	27
2.5 INCIDÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS EM MONOCULTIVO E SISTEMAS AGROFLORESTAIS DE CAFEEIROS	32
2.5.1 Plantas Daninhas em Monocultivo de Cafeeiros	32
2.5.2 Alterações da Comunidade de Plantas Daninhas sob Sombreamento	33
2.6 MATURAÇÃO E QUALIDADE DOS GRÃOS DE CAFÉ EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS	34
2.7 Comportamento de <i>Hypothenemus hampei</i> em Diferentes Sistemas De Cultivo do Cafeeiro	37
2.7.1 Influência da Temperatura Sobre o Ciclo Biológico de <i>Hypothenemus hampei</i>	37
2.7.2 Número de Gerações Anuais de <i>Hypothenemus hampei</i>	38
2.7.3 Sistemas Agroflorestais e a Dinâmica de <i>Hypothenemus hampei</i>	39
REFERÊNCIAS.....	42
3 ARTIGO A - ESTRUTURA DENDROMÉTRICA DE ESPÉCIES ARBÓREAS E MICROCLIMA ASSOCIADOS AO CRESCIMENTO DE CAFEEIROS EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS	50
3.1 RESUMO	50
3.2 ABSTRACT.....	50
3.3 INTRODUÇÃO	51
3.4 MATERIAL E MÉTODOS	53
3.4.1 Avaliações	54
3.4.1.1 Avaliações das espécies arbóreas	54
3.4.1.2 Avaliações das plantas de cafeeiro	55
3.4.1.3 Temperatura e umidade relativa do ar.....	55
3.4.1.4 Análises estatísticas	56
3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	57
3.5.1 Crescimento Inicial e Estabelecimento das Espécies Arbóreas	57
3.5.1.1 Altura total das espécies arbóreas	57
3.5.1.2 Diâmetro do coleto e diâmetro à altura do peito das espécies arbóreas	59
3.5.1.3 Diâmetro de copa das espécies arbóreas	61

3.5.1.4 Estrutura dendrométrica do componente arbóreo	62
3.5.1.4.1 <i>Altura total das espécies arbóreas</i>	62
3.5.1.4.2 <i>Altura do fuste das espécies arbóreas</i>	65
3.5.1.4.3 <i>Diâmetro de copa das espécies arbóreas</i>	65
3.5.1.4.4 <i>Diâmetro à altura do peito das espécies arbóreas</i>	65
3.5.1.5 Índices morfométricos e de arquitetura das espécies arbóreas	66
3.5.1.5.1 <i>Comprimento da copa das espécies arbóreas</i>	66
3.5.1.5.2 <i>Proporção da copa das espécies arbóreas</i>	68
3.5.1.5.3 <i>Proporção do fuste das espécies arbóreas</i>	68
3.5.1.5.4 <i>Índice de esbeltez das espécies arbóreas</i>	68
3.5.1.5.5 <i>Relação copa/altura das espécies arbóreas</i>	68
3.5.1.5.6 <i>Área basal das espécies arbóreas</i>	69
3.5.1.6 Integração entre variáveis estruturais das espécies arbóreas	69
3.5.1.7 Implicações ecológicas e funcionais para os sistemas agroflorestais com cafeeiros	71
3.5.2 Desenvolvimento das Plantas de Cafeeiro	73
3.5.2.1 <i>Altura total das plantas de cafeeiro</i>	73
3.5.2.2 <i>Diâmetro do caule das plantas de cafeeiro</i>	77
3.5.2.3 <i>Diâmetro da copa das plantas de cafeeiro</i>	79
3.5.2.4 <i>Número de ramos plagiotrópicos das plantas de cafeeiro</i>	80
4 CONCLUSÃO	82
REFERÊNCIAS	83
5 ARTIGO B - MATURAÇÃO DOS FRUTOS DE CAFÉ E INCIDÊNCIA DA BROCA DO CAFÉ (<i>Hypothenemus hampei</i>) EM CAFEEIROS CONDUZIDOS EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS	87
5.1 RESUMO	87
5.2 ABSTRACT	87
5.3 INTRODUÇÃO	88
5.4 MATERIAL E MÉTODOS	90
5.4.1 Avaliação da Maturação dos Frutos de Café e Incidência de <i>Hypothenemus hampei</i>	92
5.4.2 Temperatura, Umidade Relativa do Ar e Precipitação Pluviométrica	92
5.4.3 Análises Estatísticas	92
5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	93
5.5.1 Maturação dos Frutos de Café e Incidência da Broca do Café	93
5.5.2 Caracterização Climática do Período Experimental	106

5.5.3 Discussão	106
6 CONCLUSÃO	110
REFERÊNCIAS.....	111
7 ARTIGO C - COMPOSIÇÃO FLORÍSTICA, COBERTURA E BIOMASSA DE PLANTAS DANINHAS EM CAFEEIROS CONDUZIDOS EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS	113
7.1 RESUMO	113
7.2 ABSTRACT.....	114
7.3 INTRODUÇÃO	114
7.4 MATERIAL E MÉTODOS	117
7.5 Avaliações	118
7.5.1 Ocorrência de Plantas Daninhas.....	118
7.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	119
7.6.1 Cobertura do Solo por Plantas Daninhas	119
7.6.2 Identificação das Principais Espécies de Plantas Daninhas.....	123
7.6.3 Massa Seca de Plantas Daninhas.....	134
8 CONCLUSÃO	137
REFERÊNCIAS.....	139

1 INTRODUÇÃO GERAL

A cafeicultura brasileira enfrenta, nas últimas décadas, o desafio de conciliar produtividade, qualidade e sustentabilidade ambiental em um contexto marcado por mudanças climáticas, maior variabilidade térmica e crescente demanda por sistemas produtivos menos dependentes de insumos químicos. Embora o cultivo a pleno sol possa favorecer maiores produtividades em sistemas intensificados e bem manejados, esse modelo tem sido associado à maior exposição a oscilações microclimáticas e, em determinadas condições, maior pressão de plantas daninhas e pragas, além de maior vulnerabilidade a extremos térmicos e hídricos. Nesse cenário, os sistemas agroflorestais (SAFs) têm sido propostos como alternativa de base ecológica capaz de promover maior estabilidade produtiva por meio da inserção do componente arbóreo no sistema cafeeiro.

Coffea arabica L., principal espécie cultivada no Brasil, apresenta plasticidade fisiológica sob condições de sombreamento moderado, característica compatível com sua origem em ambientes florestais sombreados. A introdução de espécies arbóreas pode alterar significativamente a radiação incidente, a temperatura do ar e do solo e a dinâmica hídrica do sistema, modificando o microclima do cafeeiro. Essas alterações influenciam processos fisiológicos, o crescimento vegetativo e os padrões de maturação dos frutos, podendo também interferir na incidência de *Hypothenemus hampei*, a broca do café, praga cujo desenvolvimento é dependente das condições térmicas.

Nesse contexto, os efeitos dos SAFs não se restringem ao cafeeiro, mas também se estendem aos componentes bióticos associados, como as plantas daninhas. A redução da luminosidade incidente, o aporte de serapilheira e as alterações na temperatura e umidade do solo influenciam a germinação, o estabelecimento e a composição das comunidades infestantes. Em sistemas conduzidos a pleno sol, a maior disponibilidade luminosa tende a favorecer espécies de rápido crescimento, elevada capacidade competitiva e maior demanda por luminosidade, intensificando a competição por água, luz e nutrientes. Por outro lado, em SAFs, as modificações microclimáticas podem influenciar a estrutura da comunidade de plantas daninhas, embora a magnitude e a direção desses efeitos dependam das características arquitetônicas e fenológicas das espécies arbóreas utilizadas.

Apesar dos avanços sobre os efeitos do sombreamento em variáveis específicas do cafeeiro, ainda são limitadas as avaliações integradas que considerem, simultaneamente, crescimento vegetativo, maturação dos frutos, incidência da broca-do-café e dinâmica de plantas daninhas em SAFs com diferentes espécies arbóreas. Particularmente, permanece pouco esclarecido como a arquitetura e o comportamento fenológico das espécies arbóreas modulam o microclima e, conseqüentemente, afetam a uniformidade de maturação, a incidência da broca do café e a dinâmica das plantas daninhas em comparação ao monocultivo.

Diante dessa lacuna, torna-se fundamental compreender de maneira integrada os efeitos de distintas espécies arbóreas consorciadas ao cafeeiro sobre indicadores de desempenho da cultura. Essa abordagem permite avançar do entendimento conceitual dos SAFs como sistemas sustentáveis para uma avaliação quantitativa de seus impactos fitotécnicos e fitossanitários, subsidiando estratégias de manejo mais eficientes e ajustadas às condições edafoclimáticas.

Assim, este estudo teve como objetivo avaliar os efeitos de sistemas agroflorestais com diferentes espécies arbóreas sobre o desempenho fitotécnico e fitossanitário do cafeeiro, bem como sobre a maturação dos frutos e a dinâmica de plantas daninhas, em comparação ao monocultivo.

Objetivos:

- Favorecer o desenvolvimento vegetativo do cafeeiro em SAFs, caracterizando os efeitos do componente arbóreo sobre indicadores de crescimento e arquitetura da planta;
- Favorecer a uniformidade de maturação dos frutos do cafeeiro e reduzir a incidência de *Hypothenemus hampei* em SAFs, avaliando as diferenças entre os sistemas de cultivo;
- Reduzir a infestação e a competitividade de plantas daninhas em SAFs, caracterizando sua dinâmica e ocorrência em comparação ao monocultivo, considerando os impactos sobre a sustentabilidade do sistema produtivo.

A presente tese está organizada em três artigos, apresentados sob formato de artigos científicos independentes, contemplando aspectos complementares da cafeicultura em sistemas agroflorestais:

Artigo A: Estrutura dendrométrica de espécies arbóreas e microclima associados ao crescimento de cafeeiros em sistemas agroflorestais;

Artigo B: Maturação dos frutos de café e incidência da broca do café (*Hypothenemus hampei*) em cafeeiros conduzidos em sistemas agroflorestais;

Artigo C: Composição florística, cobertura e biomassa de plantas daninhas em cafeeiros conduzidos em sistemas agroflorestais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 BOTÂNICA, FENOLOGIA E IMPORTÂNCIA ECONÔMICA DO CAFEEIRO

A cafeicultura brasileira teve início no século XVIII, quando as primeiras mudas provenientes da Guiana Francesa foram introduzidas no Pará, expandindo-se posteriormente para o Rio de Janeiro e, ao longo do século XIX, para o Vale do Paraíba e o oeste paulista. Nesse período, o café consolidou-se como principal produto de exportação do país, impulsionando o desenvolvimento econômico, a formação de centros urbanos e a construção de ferrovias, tornando-se a base da economia nacional até o início do século XX (Araújo; Silva; Rocha, 2023).

O gênero *Coffea*, pertencente à família Rubiaceae (Delprete; Jardim, 2012), compreende mais de 130 espécies descritas, entre as quais *Coffea arabica* L. e *Coffea canephora* Pierre ex A. Froehner, as duas espécies representam conjuntamente cerca de 99% da produção mundial (Camargo, 2010). O café arábica é originário das regiões montanhosas da Etiópia, Quênia e Sudão, onde se desenvolve sob condições de sub-bosque, com temperaturas médias entre 18 e 22 °C e precipitações anuais de 1600 a 2000 mm (Sylvain, 1955 *apud* Camargo, 2010). Já *C. canephora* (Robusta) tem origem em áreas de baixa altitude da bacia do Congo, sendo adaptado a ambientes mais quentes e úmidos, com temperaturas entre 23 e 26 °C e elevada pluviosidade. Embora tolerante a altas temperaturas, pode ser afetado por calor excessivo associado à baixa umidade do ar, além de apresentar menor tolerância ao frio em comparação ao arábica (Coste, 1992).

A espécie *C. arabica* L. é perene e caracterizada por crescimento contínuo e arquitetura do tipo modelo de Roux, evidenciada pelo dimorfismo de ramos (Hallé; Oldeman; Tomlison, 2012). O eixo principal apresenta crescimento ortotrópico, com folhas opostas e filotaxia decussada, enquanto os ramos laterais e suas ramificações subsequentes, de segunda a quarta ordem, são plagiotrópicos (Rakocevic; Androcioli-Filho, 2010).

O cafeeiro apresenta elevada capacidade de adaptação ambiental, associada à plasticidade de seu sistema radicular (Damatta *et al.*, 2007) e às variações anatômicas de seu sistema vascular (Ribeiro *et al.*, 2026). Essas características são moduladas por fatores como manejo hídrico, nutricional e práticas culturais (Rena; Damatta, 2002), além da relação fonte-dreno (Damatta *et al.*, 2007), das condições

químicas do solo (Rena; Damatta, 2002) e da competição com plantas daninhas (Ronchi; Terra; Silva, 2007).

Neste contexto, *C. arabica* L. é uma espécie adaptada a ambientes de sub-bosque, apresentando plasticidade fisiológica de moderada a alta, o que permite sua aclimação a diferentes regimes de luz (Pompelli *et al.*, 2012). Essa característica favorece o desempenho da cultura sob condições de sombreamento moderado, podendo contribuir para acúmulo de matéria seca e o vigor vegetativo em relação ao cultivo a pleno sol (Tatagiba *et al.*, 2010). Entretanto, as respostas anatômicas podem ser menos pronunciadas que as respostas fisiológicas, indicando que os ajustes estruturais foliares nem sempre constituem o principal mecanismo de aclimação ao sombreamento (Pompelli *et al.*, 2012).

Além das características botânicas e fisiológicas, a compreensão do ciclo fenológico é essencial para interpretar o crescimento, a frutificação e a resposta do cafeeiro às condições ambientais. O ciclo fenológico de *C. arabica* L. caracteriza-se por uma sucessão de fases vegetativas e reprodutivas que se estendem por aproximadamente dois anos, diferindo da maioria das espécies vegetais, nas quais a emissão de inflorescências e a frutificação ocorrem no mesmo ano fenológico (Camargo; Camargo, 2001). No primeiro ano, predomina o desenvolvimento vegetativo, com a formação de gemas reprodutivas, enquanto no segundo ano ocorrem a florada e o desenvolvimento dos frutos. A Tabela 1 apresenta uma síntese do ciclo fenológico do cafeeiro arábica em condições tropicais brasileiras, evidenciando sua relação com as condições agrometeorológicas de cada safra.

Tabela 1 – Desenvolvimento vegetativo e reprodutivo de *Coffea arabica* L. abrangendo seis fases fenológicas ao longo de 24 meses.

Período vegetativo – 1º ano											
Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.
Vegetação e formação das gemas florais							Indução e maturação das gemas florais				
										Repouso	
Período Reprodutivo – 2º ano											
Set.	Out.	Nov.	Dez.	Jan.	Fev.	Mar.	Abr.	Mai.	Jun.	Jul.	Ago.
Florada, chumbinho e expansão dos frutos				Granação dos frutos			Maturação dos frutos			Repouso, senescência dos ramos terciários e quaternários	
Período Reprodutivo (novo período vegetativo)										Autopoda	

Fonte: adaptado de Camargo e Camargo (2001).

O modelo proposto por Camargo e Camargo (2001) subdivide o ciclo em seis etapas, sendo duas vegetativas e quatro reprodutivas:

1ª Fase - Vegetação e formação de gemas foliares (setembro a março): Associada ao período de dias mais longos.

2ª Fase - Indução e maturação das gemas florais (abril a agosto): Associada ao período de dias mais curtos, onde as gemas completam o desenvolvimento e entram em dormência.

3ª Fase - Florada (setembro a dezembro): Inicia-se após o "choque hídrico" (chuva ou irrigação após período seco), abrangendo desde a antese até a expansão dos frutos (chumbinhos).

4ª Fase - Granação (janeiro a março): É uma fase crítica, na qual o déficit hídrico pode comprometer o enchimento dos grãos, favorecendo a formação de grãos chochos e menor tamanho dos frutos.

5ª Fase - Maturação (abril a junho): É influenciada pelo acúmulo térmico e pela disponibilidade hídrica, sendo determinante para a definição do ponto de colheita e para a qualidade dos grãos.

6ª Fase - Repouso e senescência (julho e agosto): Período de autopoda natural e morte de ramos produtivos.

A maturação dos frutos do cafeeiro, com destaque para o estágio cereja, define

o ponto ideal de colheita e exerce influência direta sobre a qualidade da bebida (Meireles *et al.*, 2009). Nesse processo, a composição química dos grãos desempenha papel fundamental, sendo que compostos como a sacarose e os ácidos graxos estão diretamente relacionados a atributos sensoriais, como doçura e acidez, contribuindo para a diferenciação de cafés especiais (Fassio *et al.*, 2017). A temperatura também atua como fator determinante no desenvolvimento dos frutos, uma vez que valores acima de 23 °C tendem a acelerar o amadurecimento, podendo comprometer a qualidade da bebida (Camargo, 2010).

Em contrapartida, o sombreamento pode atenuar a temperatura do ambiente, retardando a maturação e favorecendo a formação de grãos maiores e de melhor qualidade (Bote; Struik, 2011; Muschler, 2001). De forma complementar, Morais *et al.* (2006) demonstram que plantas cultivadas sob sombra produzem frutos e grãos de maior tamanho, em função do prolongamento do período de desenvolvimento.

O café é um dos produtos tropicais mais comercializados no mundo, envolvendo cerca de 25 milhões de famílias de pequenos agricultores (Pendergrast, 2010; Waller; Bigger; Hillocks, 2007), que respondem pela maior parte da produção global (Damatta *et al.*, 2007).

De acordo com a *Food and Agriculture Organization* (FAO, 2024), O café é uma das bebidas mais consumidas em todo o mundo e está entre as commodities mais comercializadas globalmente. Ele sustenta o modo de vida de cerca de 25 milhões de agricultores e cria empregos adicionais em toda a cadeia de valor do café. O Brasil e o Vietnã se destacam como os principais países produtores de café, sendo responsáveis conjuntamente por aproximadamente 50% da produção mundial de café (FAO, 2024). No Brasil, a produção cafeeira encontra-se fortemente concentrada nos estados de Minas Gerais, Espírito Santo, Bahia, São Paulo, Rondônia e Paraná, que, em conjunto, respondem por cerca de 98,3% da produção nacional (CONAB, 2026).

A área total destinada ao café no Brasil em 2025 foi estimada em aproximadamente 2,25 milhões de hectares, dos quais 1,86 milhão estavam em produção. A espécie *C. arabica* L. predomina no país e corresponde a 81,6% da área produtiva e apresenta produtividade média estimada em 30 sacas ha⁻¹ (1,8 t ha⁻¹), resultando em uma produção de 37 milhões de sacas (CONAB, 2025).

A cafeicultura brasileira apresenta elevada relevância socioeconômica, sendo atividade estratégica para a geração de renda, emprego e permanência de agricultores no campo para várias regiões produtoras, onde atividade envolve

participação de agricultores familiares (Araújo; Silva; Rocha, 2023). O país conta com aproximadamente 300 mil cafeicultores, o que confere à atividade um papel estratégico na manutenção de meios de subsistência e na geração de empregos em toda a cadeia produtiva (Araújo; Silva; Rocha, 2023).

Em resposta aos desafios das mudanças climáticas, o setor tem avançado na adoção de práticas sustentáveis e sistemas produtivos resilientes, com destaque para a crescente pesquisa e implementação de SAFs que favorecem a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos (Gomes *et al.*, 2020; López-Sampson *et al.*, 2025).

Nesse cenário, a adoção de sistemas produtivos mais resilientes, como os SAFs, tem se intensificado como resposta aos desafios impostos pelas mudanças climáticas e à necessidade de conciliar produtividade, qualidade e conservação ambiental.

2.2 SISTEMAS AGROFLORESTAIS E MODIFICAÇÃO MICROCLIMÁTICA

Os SAFs podem modificar o microclima dos cultivos agrícolas em função da presença, densidade, arquitetura e distribuição espacial do componente arbóreo. Essas modificações envolvem alterações na radiação incidente, na temperatura do ar e do solo, umidade relativa do ar e velocidade dos ventos, influenciando o funcionamento do agroecossistema.

Lin (2007) observou que o aumento da cobertura arbórea em cafezais sombreados reduziu a variabilidade do microclima, com atenuação das variações de temperatura, incidência de radiação solar e umidade relativa do ar. De forma complementar, Moraes *et al.* (2006) verificaram que o sombreamento de cafeeiros com feijão-guandu (*Cajanus cajan*) reduziu a radiação global incidente em até 87% e a radiação fotossinteticamente ativa em 79%, além de atenuar as temperaturas máximas do ar, do solo e das folhas durante o período diurno.

Além disso, Campanha *et al.* (2004) observaram que em SAFs com cafeeiros houve redução de em 2,6 °C na temperatura máxima em relação ao monocultivo, além de menor variação da amplitude térmica ao longo do período avaliado. Esses resultados indicam que, quando adequadamente manejados, os SAFs podem atuar como reguladores microclimáticos, reduzindo extremos de temperatura no ambiente de cultivo. Nesse sentido, Camargo (2010) e Damatta *et al.* (2007) destacam que a arborização pode reduzir as flutuações térmicas do ar entre 2 e 5 °C e aumentar a

umidade relativa, funcionando como mecanismo de amortecimento microclimático em condições de maior estresse ambiental.

Em cafeeiros, essas modificações microclimáticas influenciam diretamente os processos fisiológicos e produtivos. A redução da temperatura e da radiação incidente a níveis adequados podem contribuir para a diminuição do estresse térmico e hídrico, favorecendo a manutenção da atividade fotossintética e influenciando o desenvolvimento fenológico da cultura (Damatta *et al.*, 2007).

Entretanto, as interações entre o cafeeiro e as espécies arbóreas podem resultar tanto em complementaridade quanto em competição por recursos. Muñoz-Villers *et al.* (2020) verificaram que há complementaridade no uso da água do solo em SAF, com as árvores utilizando principalmente água das camadas mais profundas do solo (>15 a 120 cm), enquanto os cafeeiros utilizaram predominantemente as camadas superficiais (<5 a 15 cm), com variações entre as estações do ano. Por outro lado, Monteith *et al.* (1991) destacam que o componente arbóreo também pode intensificar a competição por luz, água e nutrientes, especialmente em sistemas com alta densidade de árvores, sombreamento excessivo ou manejo inadequado da copa.

A intensidade e a qualidade da sombra são determinantes para o desempenho dos SAFs. Hagggar *et al.* (2021) destacam que a relação entre sombreamento e produtividade do cafeeiro é variável e dependente do contexto, podendo envolver ganhos associados ao sombreamento moderado e perdas sob níveis excessivos de sombra. Em cafeeiros sombreados com feijão-guandu (*C. cajan*), Moraes *et al.* (2006) observaram que a baixa incidência de radiação reduziu a emissão de ramos plagiotrópicos e menor número de nós produtivos, resultando em redução da produção.

Além da intensidade de sombra, as características estruturais e fenológicas das espécies arbóreas condicionam modificações microclimáticas nos SAFs. A densidade de árvores e atributos dendrométricos, como altura total e diâmetro da copa, interferem na interceptação da radiação e a distribuição espacial da luz no sistema, influenciando o ambiente de crescimento do cafeeiro (Beer *et al.*, 1998; Gomes *et al.*, 2020).

Apesar dos avanços no entendimento dessas interações, ainda não há consenso sobre a faixa ótima de sombreamento para maximizar simultaneamente produtividade, qualidade, estabilidade microclimática e serviços ecossistêmicos. Enquanto níveis moderados podem contribuir para a atenuação de extremos térmicos

e manutenção do desempenho da cultura, o excesso de sombra pode comprometer a produtividade e, em determinados contextos, favorecer o desenvolvimento de doenças. Isso evidencia a necessidade de compreender as interações espécie arbórea, intensidade de sombra, manejo e condições edafoclimáticas (Avelino *et al.*, 2020; Durand-Bessart *et al.*, 2020; Gichuru *et al.*, 2021; Hagggar *et al.*, 2011).

2.3 DESENVOLVIMENTO FITOTÉCNICO DO CAFEEIRO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS

O desenvolvimento fitotécnico do cafeeiro em SAFs pode ser influenciado pelas alterações microclimáticas promovidas pelo sombreamento e pela interação com o componente arbóreo, refletindo-se em variáveis estruturais como altura de planta, diâmetro de caule, diâmetro de copa e número de ramos plagiotrópicos. No entanto, as respostas do cafeeiro a essas condições não são uniformes, variando em função da intensidade e distribuição da sombra, da arquitetura e fenologia das espécies arbóreas utilizadas, do manejo do dossel e das condições edafoclimáticas.

Ricci, Cochetto Junior e Almeida (2013), ao avaliarem *C. canephora* em sistemas arborizados, verificaram que o consórcio com *Gliricidia sepium* resultou em maior altura de plantas, maior número de ramos plagiotrópicos, maior distância entre rosetas e incremento da área foliar em relação ao monocultivo. Tais respostas são caracterizadas pelos autores como modificações morfofisiológicas adaptativas, incluindo o estiolamento, visando otimizar a captação de radiação em ambientes sombreados.

Em mudas de cafeeiro submetidas a sombreamento artificial, Tatagiba *et al.* (2010) observaram que níveis de sombreamento de 22% e 50% apresentaram maior acúmulo de matéria seca total e maior área foliar, indicando melhor desenvolvimento vegetativo nessas condições. Em contrapartida, sob sombreamento mais intenso (88%), foi verificada redução significativa no diâmetro do coleto, demonstrando que níveis elevados de sombra podem limitar o crescimento estrutural das plantas.

No nível anatômico, Pompelli *et al.* (2012) observaram que folhas de cafeeiro desenvolvidas sob menor irradiância apresentam alterações estruturais, como redução da massa foliar específica e modificações no parênquima paliçádico, caracterizando respostas de aclimação a ambientes sombreados.

Entretanto, os efeitos do sombreamento sobre o desenvolvimento fitotécnico não são sempre positivos. Moraes *et al.* (2006) verificaram que o cultivo do cafeeiro

sob sombreamento com feijão-guandu (*C. cajan*) reduziu a emissão de ramos plagiotrópicos, o número de nós por ramo e o número de nós com frutos, além de redução da produtividade, atribuída à diminuição da radiação fotossinteticamente ativa.

Em cafeeiros conduzidos em SAFs, Campanha *et al.* (2004) verificaram menor retenção de frutos e produtividade em comparação ao monocultivo, resultado atribuído, em parte, à menor disponibilidade de luz para a cultura.

Haggar *et al.* (2021) destacam que a relação entre sombreamento e produtividade do cafeeiro é variável e dependente do contexto, podendo ocorrer perdas produtivas sob níveis elevados de sombra, especialmente quando há limitação de radiação e menor intensificação agrônômica, principalmente em relação à restrição de nutrientes.

Além da intensidade do sombreamento, a espécie arbórea utilizada no consórcio pode influenciar o desenvolvimento do cafeeiro. Ricci, Cochetto Junior e Almeida (2013) demonstraram que diferentes espécies arbóreas promovem respostas distintas no crescimento das plantas, evidenciando que o efeito do sombreamento depende das características estruturais e da interação entre os componentes do sistema.

Em SAFs multiestratificados, a presença de árvores pode promover melhorias nas condições edáficas, como aumento do aporte de carbono e nitrogênio no solo e melhoria na infiltração de água, fatores que contribuem para o desenvolvimento das plantas (Durand-Bessart *et al.*, 2020; Rolo, 2022).

De modo geral, a literatura indica que, em determinadas condições, o sombreamento moderado pode favorecer o desenvolvimento vegetativo do cafeeiro, promovendo maior crescimento em altura e expansão da área foliar, enquanto níveis excessivos de sombra podem reduzir o crescimento estrutural, limitar a emissão de ramos plagiotrópicos e comprometer a produtividade (Haggar *et al.*, 2021; Morais *et al.*, 2006; Ricci; Cochetto Junior; Almeida, 2013; Tatagiba *et al.*, 2010).

Assim, os resultados divergentes observados na literatura refletem a complexidade das interações entre cafeeiros e espécies arbóreas, bem como a influência da intensidade de sombreamento, das espécies utilizadas, do manejo e das condições edafoclimáticas. Ainda não há consenso sobre as faixas ideais de sombreamento que conciliem crescimento vegetativo, produtividade e qualidade dos frutos, evidenciando lacunas importantes no entendimento do desenvolvimento

fitotécnico do cafeeiro em SAFs.

2.4 ESPÉCIES ARBÓREAS EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM CAFEEIROS

A seleção adequada das espécies arbóreas em SAFs com cafeeiros é um dos fatores centrais para o desempenho agrônômico, a conservação ambiental e a resiliência do agroecossistema (Gomes *et al.*, 2020; Muñoz-Villers *et al.*, 2020). Quando bem escolhidas e manejadas, as árvores proporcionam múltiplos serviços ecossistêmicos, incluindo regulação microclimática, aporte de matéria orgânica, melhoria da fertilidade do solo, redução da erosão e incremento da biodiversidade funcional (Beer *et al.*, 1998; Koutouleas *et al.*, 2022; Melloni *et al.*, 2018). Esses efeitos podem favorecer o desempenho fisiológico do cafeeiro (Damatta *et al.*, 2007; Koutouleas *et al.*, 2022).

A interação entre cafeeiros e espécies arbóreas varia em função de características como porte, arquitetura da copa, profundidade do sistema radicular, densidade de sombreamento e condições edafoclimáticas locais (Beer *et al.*, 1998). Nesse contexto, atributos estruturais das árvores condicionam a interceptação da radiação e a distribuição da luz no ambiente de crescimento do cafeeiro (Gomes *et al.*, 2020). Além disso, espécies que produzem elevada quantidade de serapilheira contribuem para o aumento da matéria orgânica, intensificação da ciclagem de nutrientes e podem contribuir para melhoria da estrutura e fertilidade do solo (Rolo, 2022).

No SAF de cafeeiros com *Araucaria angustifolia* observou-se que a espécie arbórea, quando bem manejada, pode melhorar os atributos físico-químicos do solo, aumentar o aporte de matéria orgânica e favorecer associações micorrízicas, com potenciais reflexos sobre a nutrição e ao desenvolvimento radicular dos cafeeiros (Melloni *et al.*, 2018).

Esses resultados reforçam que a escolha das espécies arbóreas influencia não apenas o nível de sombreamento, mas também a qualidade ecológica e funcional do sistema. A seguir, são apresentadas *Moringa oleifera*, *Croton floribundus* e *Senna macranthera*, espécies avaliadas neste estudo, considerando suas características morfológicas, ecológicas e potenciais interações com o cafeeiro em SAFs.

a) *Moringa oleifera* (moringa)

Moringa oleifera (Figura 1) é uma espécie arbórea decídua, de rápido crescimento e amplamente cultivada em regiões tropicais e subtropicais (Olson; Fahey, 2011; Verdcourt, 1985). Espécies do gênero *Moringa* são frequentemente associadas a regiões áridas e semiáridas, apresentando características adaptativas relacionadas à tolerância ao déficit hídrico, como comportamento caducifólio e redução da atividade vegetativa durante períodos secos (Verdcourt, 1985).

O gênero *Moringa* compreende diferentes formas de crescimento, incluindo ervas, arbustos e árvores, apresentando ampla variabilidade morfológica e distribuição predominantemente tropical (Olson; Fahey, 2011; Verdcourt, 1985). Entre essas espécies, *M. oleifera* destaca-se pelo crescimento vegetativo vigoroso, elevada produção de biomassa e potencial de utilização em SAFs (Olson; Fahey, 2011).

Características relacionadas à arquitetura foliar da espécie, associadas à elevada superfície específica e ao reduzido tamanho dos folíolos, favorecem a rápida decomposição da serapilheira e aceleram a ciclagem de nutrientes, especialmente nitrogênio. Em SAFs, a espécie pode ser manejada por meio de podas sucessivas destinadas à cobertura e adubação orgânica do solo (Rebêlo *et al.*, 2022).

A inserção de *M. oleifera* em consórcios com cafeeiros já é relatada em regiões produtoras brasileiras, visando benefícios relacionados à melhoria das condições do solo e à regulação microclimática do sistema de cultivo (Gomes *et al.*, 2020).

Estudos também indicam que extratos foliares de moringa apresentam potencial atividade alelopática *in vitro* sobre espécies cultivadas e plantas daninhas, podendo promover ou inibir o desenvolvimento vegetal dependendo da concentração e das espécies avaliadas. Contudo, a persistência e a relevância desses efeitos sob condições naturais de campo ainda necessitam de confirmação experimental (Kamanga *et al.*, 2025).

Figura 1 – Espécie arbórea *Moringa oleifera*.



Fonte: Semente Rara.

b) *Croton floribundus* (capixingui)

Croton floribundus (Figura 2), popularmente conhecida como capixingui, pertence à família Euphorbiaceae, é uma espécie arbórea pioneira nativa da Mata Atlântica, amplamente distribuída em formações florestais secundárias, especialmente nos estados de Minas Gerais, São Paulo e Paraná (Carvalho, 2003; Lorenzi, 2002). Trata-se de uma heliófita, de crescimento rápido e ciclo de vida relativamente curto, sendo frequentemente observada em ambientes abertos, como bordas de mata e áreas em regeneração, onde atua na colonização de clareiras e na recuperação de áreas degradadas (Durigan *et al.*, 2002). Em formações primárias, sua ocorrência é menos comum, sendo registrada principalmente por indivíduos de grande porte no estrato superior do dossel (Durigan *et al.*, 2002).

A espécie apresenta porte médio a elevado, podendo atingir até 20 m de altura e 60 cm de diâmetro à altura do peito (DAP), com crescimento monopodial na fase juvenil. Uma característica marcante do capixingui é a exsudação do tronco quando lesionado, o que originou o nome popular “sangra-d’água”. Seu rápido crescimento e elevada produção de biomassa podem favorecer a proteção do solo e cobertura de áreas expostas, contribuindo para a redução da erosão e para a melhoria das condições edáficas (Carvalho, 2003; Durigan *et al.*, 2002).

Nesse contexto, *C. floribundus* apresenta grande relevância em programas de

restauração ecológica e recomposição de matas ciliares, sendo considerada uma importante espécie para reflorestamentos mistos, tanto com finalidade protetiva quanto produtiva (Augusto *et al.*, 2003; Durigan *et al.*, 2002). Seu desenvolvimento inicial rápido pode favorecer o fechamento inicial do dossel e, com a formação de um microclima que facilita o estabelecimento de espécies de estádios sucessionais posteriores (Carvalho, 2003). Dessa forma, o capixingui desempenha papel funcional na dinâmica sucessional, atuando como espécie facilitadora na recuperação de ecossistemas degradados (Augusto *et al.*, 2003; Durigan *et al.*, 2002), contudo, seu papel em SAFs precisa ser estudado.

Figura 2 – Espécie arbórea *Croton floribundus*.



Fonte: Árvores do Brasil.

c) *Senna macranthera* (manduirana)

Senna macranthera (Figura 3) é uma espécie arbórea pioneira, heliófita e de rápido crescimento, indicada para plantios de restauração e recuperação de áreas degradadas. (Carvalho, 2006; Pozitano; Rocha, 2011). A espécie apresenta porte médio, podendo atingir até 15 m de altura e 40 cm de diâmetro à altura do peito (DAP), com copa ampla, que pode alcançar entre 7 e 8 m de diâmetro em condições de crescimento isolado (Carvalho, 2006). Possui ampla distribuição geográfica no Brasil, ocorrendo naturalmente nos biomas Caatinga, Cerrado e Mata Atlântica, com registros

desde o estado do Ceará até o Paraná (Carvalho, 2006; Oliveira; Garcia, 2021).

Trata-se de uma espécie característica de formações secundárias, frequentemente encontrada em áreas de capoeira e capoeirão, o que é compatível com seu comportamento pioneiro em processos de sucessão secundária (Carvalho, 2006). Apesar de seu comportamento pioneiro, apresenta padrão foliar perenifólio, o que contribui para maior continuidade na cobertura vegetal pela copa ao longo do ano (Carvalho, 2006). Sua rusticidade e adaptabilidade a diferentes condições edáficas favorecem sua recomendação para plantios de recuperação de áreas degradadas, especialmente em áreas de preservação permanente, apresentando melhor desempenho em solos férteis, embora tolere condições de fertilidade média (Carvalho, 2006).

Do ponto de vista reprodutivo, *S. macranthera* apresenta início precoce da fase reprodutiva, com florescimento a partir de aproximadamente três anos de idade em plantios, caracterizado por floração abundante e período reprodutivo relativamente prolongado (Carvalho, 2006). Suas sementes apresentam dormência tegumentar associada à impermeabilidade do tegumento à água, o que dificulta a germinação natural (Santarém; Aquila, 1995). A escarificação química com ácido sulfúrico concentrado é descrita como método eficiente superar essa limitação de dormência e promover germinação mais uniforme (Pozitano; Rocha, 2011; Santarém; Aquila, 1995).

Figura 3 – Espécie arbórea *Senna macranthera*.



Fonte: Photosves.

2.5 INCIDÊNCIA DE PLANTAS DANINHAS EM MONOCULTIVO E SISTEMAS AGROFLORESTAIS DE CAFEZEIROS

2.5.1 Plantas Daninhas em Monocultivo de Cafeeiros

Em cafeeiros conduzidos em monocultivo, a maior incidência de radiação solar e a maior exposição do solo promovem condições favoráveis à germinação e ao estabelecimento de plantas daninhas (Koutouleas *et al.*, 2022). O efeito da incidência de radiação solar é particularmente relevante para espécies fotoblásticas positivas, uma vez que a luz atua como estímulo para a germinação dessas plantas.

O crescimento inicial relativamente lento do cafeeiro pode contribuir para a manutenção do solo exposto por períodos mais prolongados, ampliando a janela de estabelecimento das plantas daninhas (Fontes *et al.*, 2022). Espécies como *Amaranthus* e *Conyza*, por exemplo, podem ser favorecidas em ambientes com maior luminosidade na superfície do solo, uma vez que a germinação de espécies desses grupos é estimulada pela luz (Felippe; Polo, 1983; Fontes *et al.*, 2022).

Levantamentos fitossociológicos indicam que essas condições favorecem o predomínio de espécies da família Poaceae, reconhecidas por sua elevada capacidade competitiva em ambientes de pleno sol (Canuto, 2020; Fialho *et al.*, 2011; Rodrigues *et al.*, 2022).

Estudos conduzidos no Sul de Minas Gerais confirmam esse padrão, evidenciando as Poaceae como a família mais representativa na comunidade infestante (Faria; Andrade, 2024). Entre as espécies de maior importância, destacam-se *Eleusine indica*, com elevada densidade populacional e alto índice de valor de importância, e *Commelina benghalensis*, frequentemente associada à persistência em sistemas cafeeiros (Faria; Andrade, 2024; Fontes *et al.*, 2022).

Adicionalmente, *Urochloa decumbens* tem sido identificada como uma das espécies mais dominantes em áreas de cultivo, apresentando elevada frequência e ampla distribuição em sistemas convencionais (Barros *et al.*, 2019). Esse conjunto de espécies indica uma comunidade adaptada a ambientes abertos e potencialmente competitiva com o cafeeiro, sobretudo nos estádios iniciais de implantação ou em períodos de maior disponibilidade hídrica.

A persistência dessas espécies está diretamente relacionada à dinâmica do banco de sementes no solo. Espécies com comportamento ruderal, conforme definido

por Carneiro e Irgang (2005), apresentam alta produção de diásporos, germinação rápida e estabelecimento eficiente, garantindo fluxos contínuos de emergência. Nesse sentido, a presença de plantas em estádios reprodutivos avançados contribui para o enriquecimento do banco de sementes, intensificando a infestação nas safras subsequentes (Canuto *et al.*, 2020).

2.5.2 Alterações da Comunidade de Plantas Daninhas sob Sombreamento

Os sistemas sombreados exercem influência sobre a dinâmica das plantas daninhas, uma vez que a redução da luminosidade limita o acúmulo de biomassa dessas espécies. Nestel e Altieri (1992) observaram que o sombreamento reduz a taxa de incremento de biomassa das plantas infestantes, contribuindo para a menor ocorrência dessas espécies em cafeeiros cultivados sob sombra. Além disso, os diferentes tipos de associações vegetais e arranjos de cultivo empregados nos SAFs podem influenciar a densidade, a frequência e o acúmulo de biomassa das plantas daninhas, reduzindo a competição e favorecendo maior equilíbrio ecológico nas áreas cultivadas (Schulz *et al.*, 1994).

O sombreamento também promove alterações importantes na composição florística da comunidade infestante. Segundo Jimenez-Ávila (1979), Nestel e Altieri (1992) e Beer *et al.* (1998), a redução da incidência de radiação solar nos ambientes arborizados restringe a infestação e modifica a composição e a distribuição populacional das plantas daninhas. Staver *et al.* (2001) observaram que sistemas multiestratificados reduzem a disponibilidade de luz e aumentam o aporte de serapilheira, inibindo o crescimento de espécies dependentes de elevada luminosidade. Estudos conduzidos por Nestel e Altieri (1992) demonstraram que ambientes sombreados favorecem mudanças na composição da comunidade infestante, reduzindo a predominância de espécies das famílias *Poaceae* e *Asteraceae* e favorecendo espécies tolerantes ao sombreamento, como as pertencentes à família *Commelinaceae*.

Além das alterações na composição florística, observa-se redução expressiva da biomassa das plantas daninhas em sistemas arborizados. Nestel e Altieri (1992) verificaram que a biomassa das plantas infestantes declinou de aproximadamente 3,6 Mg ha⁻¹ em condições de pleno sol para valores inferiores a 0,1 Mg ha⁻¹ sob níveis de sombreamento de 50%. Resultados semelhantes foram relatados por Ricci *et al.*

(2006), que observaram menor emergência de plantas invasoras em cafeeiros arborizados devido à redução da exposição do solo à radiação solar.

Outro fator relevante nos SAFs é a deposição de serapilheira sobre o solo. Segundo Fontes *et al.* (2022), o mulch atua como uma barreira física e biológica que restringe a emergência de espécies fotoblásticas positivas, dependentes de luz para germinar. Esse efeito contribui para a redução do acúmulo de biomassa e da densidade populacional das plantas daninhas, conforme observado por Melloni *et al.* (2018) em sistemas arborizados. Além disso, os autores verificaram que ambientes sombreados promovem maior acúmulo de matéria orgânica e favorecem a formação de associações micorrízicas, contribuindo para maior estabilidade ecológica do sistema e influenciando indiretamente a dinâmica das plantas infestantes.

Dessa forma, os SAFs promovem uma reorganização estrutural da comunidade infestante, reduzindo a biomassa, alterando a composição florística e favorecendo espécies menos competitivas, o que pode resultar em menor pressão de interferência sobre o cafeeiro.

2.6 MATURAÇÃO E QUALIDADE DOS GRÃOS DE CAFÉ EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS

A maturação dos frutos do cafeeiro é influenciada pela radiação solar e pela temperatura, uma vez que esses fatores regulam a velocidade de desenvolvimento dos frutos, o enchimento dos grãos e a uniformidade da maturação (Cassamo *et al.*, 2022; Meireles *et al.*, 2009). Nesse contexto, os estudos mostram que alterações no ambiente térmico e luminoso podem tanto acelerar quanto retardar o ciclo, com reflexos diretos na qualidade final do café (Cassamo *et al.*, 2022; Meireles *et al.*, 2009; Ricci *et al.*, 2006; Wagner *et al.*, 2021).

Meireles *et al.* (2009) indicam que temperaturas médias anuais superiores a 23 °C aceleram o desenvolvimento e a maturação dos frutos, podendo reduzir o potencial de qualidade do café. Corroborando essa dinâmica, Cassamo *et al.* (2022) demonstraram que o aumento da altitude (de 650 m para 935 m), associado a temperaturas mais baixas e maior disponibilidade hídrica (chuva e neblina), estendeu o período de maturação em quatro semanas. Esse prolongamento do ciclo retardou o amadurecimento e favoreceu um enchimento de grãos mais longo, resultando em melhorias nos atributos físicos e bioquímicos dos frutos. Assim, esses estudos convergem ao indicar que a temperatura é um dos principais fatores que determinam

a velocidade de maturação e a duração total do ciclo produtivo.

A radiação tem efeito sobre a atividade fotossintética e sobre a relação fonte-dreno do cafeeiro, influenciando a disponibilidade de assimilados para o desenvolvimento dos frutos (Koutouleas *et al.*, 2022; Nasiro, 2024). Em determinadas condições, o cultivo a pleno sol pode favorecer um maior número de nós e frutos por ramo, o que intensifica a competição interna por fotoassimilados em comparação ao cultivo sombreado (Cannell; Clifford; Wilson, 1985; Damatta, 2004). Em condições de radiação e temperatura elevadas, os centros de reação tornam-se inadequados para processar a energia luminosa, resultando em saturação do aparato fotossintético, aumento da fotorrespiração e esgotamento de carboidratos, o que compromete o enchimento adequado dos grãos (Damatta; Ramalho, 2006).

Em um SAF composto pelo consórcio entre cafeeiros (*Coffea arabica* L.) e eritrinas (*Erythrina poeppigiana*), Charbonnier *et al.* (2017) demonstraram que as plantas compensam uma redução de 60% na irradiância aumentando a eficiência no uso da luz em até 50%. Essa adaptação fisiológica permite manter a produtividade primária líquida estável em todos os níveis de sombra e protege o aparelho fotossintético contra danos foto-oxidativos (fotoinibição). Complementarmente, no que tange às características dos grãos, Bote e Vos (2017) evidenciam que os atributos físicos e sensoriais respondem à interação entre radiação e nutrição, de modo que a irradiância isoladamente exerce pouco efeito na qualidade da bebida se o suprimento de nitrogênio não for limitante.

Quanto à uniformidade de maturação, Meireles *et al.* (2009) ressaltam que a colheita de frutos em estágio adequado é fundamental para a obtenção de cafés de melhor qualidade, e que a antecipação ou o atraso da maturação prejudicam o produto. De forma complementar, Fassio *et al.* (2017) destacam que a composição química dos grãos e, conseqüentemente, os atributos sensoriais da bebida estão relacionados ao estágio de maturação dos frutos.

Ricci *et al.* (2006) verificaram que o cultivo sombreado retardou a maturação dos frutos em comparação ao cultivo a pleno sol, resultando em colheitas mais tardias. Vaast *et al.* (2006) também observaram que a sombra atrasou o amadurecimento dos frutos em até um mês e isso melhorou características dos grãos e da bebida. Da mesma forma, Bote e Struik (2011) verificaram que o sombreamento protegeu os cafeeiros contra estresses ambientais, favorecendo a formação de frutos maiores e grãos de melhor qualidade. Em conjunto, esses estudos indicam que o sombreamento

tende a prolongar o ciclo de maturação e favorecer a qualidade do café.

A influência da radiação sobre o enchimento também foi observada por Vaast *et al.* (2006), que verificaram, em cafeeiros cultivados sob 45% de sombra, atraso na maturação dos frutos em até um mês, associado à produção de grãos maiores e à melhoria da qualidade da bebida. Os autores atribuíram esse efeito ao ambiente mais ameno sob sombra, que reduziu a temperatura ao redor dos frutos e ampliou o tempo de enchimento. No mesmo sentido, Bote e Struik (2011) observaram que cafeeiros cultivados sob sombra apresentaram frutos maiores e mais pesados, além de melhor qualidade dos grãos, em comparação com plantas cultivadas a pleno sol. Esses resultados indicam que a radiação, quando excessiva, pode acelerar o metabolismo e reduzir o tempo efetivo de enchimento, enquanto condições moderadas favorecem um desenvolvimento mais equilibrado.

Cassamo *et al.* (2022) observaram que o aumento da altitude, associado a temperaturas mais amenas e maior disponibilidade hídrica, prolongou o período de maturação dos frutos em cerca de quatro semanas, e alterou atributos físicos e químicos relacionados à qualidade dos grãos. Nessa mesma direção, Muschler (2001) destaca que o sombreamento, em regiões quentes e de baixa altitude, pode retardar a maturação e favorecer enchimento mais lento e equilibrado dos frutos. Portanto, os estudos convergem ao indicar que temperaturas mais amenas e menor carga de radiação tendem a prolongar o ciclo de maturação.

Entretanto, os efeitos do ambiente sobre a uniformidade da maturação não são sempre homogêneos. Ricci, Cochetto Junior e Almeida (2013) observaram que a arborização com *Erythrina poeppigiana* e *Gliricidia sepium* reduziu a amplitude térmica do ar e as temperaturas das folhas e do solo, mas também gerou variação na radiação transmitida ao longo do sistema, produzindo diferentes condições microclimáticas dentro da lavoura. No mesmo sentido, Cheng *et al.* (2020) e Vaast *et al.* (2006) destacam que a distribuição da luz e da temperatura em sistemas sombreados é desigual no espaço, o que gera diferenças na taxa de desenvolvimento e maturação dos frutos ao longo do dossel. Dessa forma, embora o sombreamento possa retardar a maturação (Ricci *et al.*, 2006), ele também pode aumentar a heterogeneidade quando a distribuição de radiação no sistema é muito variável.

Essa heterogeneidade também foi discutida por Rakocevic *et al.* (2021), que observaram flutuações na qualidade dos grãos ao longo do perfil vertical do dossel do cafeeiro. De forma semelhante, Cheng *et al.* (2020), verificaram que frutos localizados

em regiões mais sombreadas do dossel apresentaram desenvolvimento mais lento e composição distinta em relação aos frutos mais expostos à radiação. Esses resultados mostram que a uniformidade da maturação depende não apenas da presença de sombra, mas também da forma como a radiação e a temperatura se distribuem dentro da planta e do sistema de cultivo.

Apesar disso, a literatura ainda não apresenta consenso regional sobre os efeitos do sombreamento na uniformidade e no tempo de maturação. Enquanto Ricci *et al.* (2006), Vaast *et al.* (2006) e Cassamo *et al.* (2022) apontam prolongamento do ciclo e benefícios associados ao enchimento dos grãos, Ricci, Cochetto Junior e Almeida (2013), Koutouleas *et al.* (2022) e Rakocevic e Androcioli Filho (2010) mostram que a variabilidade microclimática em sistemas arborizados pode aumentar a heterogeneidade da maturação. Dessa forma, permanecem lacunas quanto à magnitude desses efeitos em diferentes condições edafoclimáticas, espécies arbóreas e arranjos de sombreamento, especialmente em escala regional e ao longo de múltiplas safras.

2.7 COMPORTAMENTO DE *HYPOTHENEMUS HAMPEI* EM DIFERENTES SISTEMAS DE CULTIVO DO CAFEIEIRO

2.7.1 Influência da Temperatura Sobre o Ciclo Biológico de *Hypothenemus hampei*

A temperatura é um dos principais fatores abióticos que regulam o desenvolvimento, reprodução e dinâmica populacional da broca do café (*Hypothenemus hampei*). Estudos clássicos de campo demonstram essa relação direta entre temperatura e duração do ciclo. Baker, Barrera e Rivas (1992) observaram no México, que o tempo de desenvolvimento foi de 49 dias a 20,9 °C e de 42 dias a 23 °C. Resultados convergentes foram obtidos por Ruiz-Cárdenas e Baker (2010), que, na Colômbia, estimaram um tempo de desenvolvimento de 49 dias sob médias de 20,7 °C a 21,6 °C, reforçando a evidência de que o ciclo é reduzido com o aumento da temperatura.

Em dieta artificial, Wei, Wang e Lin, (2023) verificaram que o tempo necessário para o inseto completar as fases de ovo a adulto, foi reduzido de 59,85 dias a 18 °C para 27,64 dias a 27 °C, demonstrando que o aumento térmico acelera seu desenvolvimento. Dentro da faixa térmica favorável, a taxa de desenvolvimento da

broca aumenta com a elevação da temperatura, reduzindo a duração dos estádios imaturos.

Além da velocidade de desenvolvimento, a temperatura define os limites fisiológicos da espécie. Jaramillo *et al.* (2009), em estudo experimental com frutos de café, estimaram os limiares inferior e superior de desenvolvimento de *H. hampei* em aproximadamente 14,9 °C e 32 °C, respectivamente, com desenvolvimento bem-sucedido entre 20 e 30 °C. Por sua vez, Wei; Wang e Lin, (2023), em dieta artificial, estimaram limiar inferior de 8,91 °C para os estádios imaturos. A diferença entre esses valores provavelmente reflete variações metodológicas, incluindo substrato alimentar, população estudada, condições experimentais e critério utilizado para estimar o desenvolvimento.

2.7.2 Número de Gerações Anuais de *Hypothenemus hampei*

O número de gerações anuais de *H. hampei* apresenta dependência das condições térmicas ambientais, uma vez que a temperatura influencia diretamente o desenvolvimento, a sobrevivência, a fecundidade e o crescimento populacional da espécie. Dessa forma, variações térmicas podem alterar a duração do ciclo biológico da broca do café e, conseqüentemente, sua dinâmica populacional ao longo do ano (Jaramillo *et al.*, 2009; Wei; Wang; Lin, 2023).

Em condições de temperaturas mais amenas, o desenvolvimento populacional de *H. hampei* tende a ser mais lento. Estudos conduzidos na Colômbia por Ruiz-Cárdena e Baker (2010) registraram aproximadamente duas a três gerações anuais da broca sob temperaturas médias variando entre 20,7 °C e 21,6 °C. Os autores observaram que temperaturas mais baixas aumentam a duração do ciclo biológico e reduzem a velocidade de multiplicação populacional da espécie. Além disso, verificaram que não mais que duas gerações poderiam ocorrer antes da colheita e aproximadamente 3,5 gerações até o final do ano em condições colombianas.

À medida que a temperatura aumenta, observa-se aceleração do desenvolvimento da broca do café e maior potencial reprodutivo. Jaramillo *et al.* (2009) observaram que o aumento da temperatura reduz a duração das fases imaturas do inseto, favorecendo maior crescimento populacional. Os autores observaram ainda que o desenvolvimento completo de ovo a adulto ocorreu entre 20 °C e 30 °C, enquanto temperaturas extremas reduziram a sobrevivência e o sucesso reprodutivo

da espécie. Além disso, estimaram limite térmico inferior de desenvolvimento em aproximadamente 14,9 °C e superior próximo de 32 °C.

Para as condições brasileiras, Giraldo-Jaramillo, Garcia e Parra (2018) estimaram ocorrência entre 5,09 e 10,53 gerações anuais em regiões cafeeiras do estado de São Paulo, associadas a temperaturas médias anuais variando entre aproximadamente 19,3 °C e 24,5 °C. Os autores observaram que regiões mais quentes e de menor altitude apresentaram maior potencial de desenvolvimento da praga e maior número de gerações anuais.

A altitude também exerce influência indireta sobre a dinâmica populacional da broca do café, uma vez que regiões mais elevadas geralmente apresentam temperaturas mais amenas, reduzindo o potencial de desenvolvimento da espécie. Hamilton *et al.* (2019), avaliando populações de *H. hampei* ao longo de um gradiente altitudinal no Havaí (279 a 792 m), observaram que o tempo de desenvolvimento aumentou com a elevação e com a redução da temperatura média do ambiente. Os autores verificaram que o ciclo completo da praga foi aproximadamente duas semanas mais longo em áreas de maior altitude, com temperaturas médias próximas de 20 °C, em comparação às áreas de menor altitude, onde as temperaturas médias se aproximaram de 23 °C.

Hamilton *et al.* (2019) estimaram que propriedades localizadas em menores altitudes apresentaram maior número de gerações da broca ao longo da safra, variando entre 4,13 e 4,96 gerações por estação, enquanto áreas mais elevadas apresentaram entre 2,11 e 3,27 gerações. Esses resultados reforçam a relação entre temperatura, altitude e dinâmica populacional de *H. hampei*.

Jaramillo *et al.* (2009) destacam que mudanças climáticas associadas ao aumento da temperatura podem favorecer a expansão da broca do café para áreas anteriormente menos favoráveis ao seu desenvolvimento, aumentando o potencial de infestação da praga em regiões cafeeiras.

2.7.3 Sistemas Agroflorestais e a Dinâmica de *Hypothenemus hampei*

Em SAFs, alterações microclimáticas decorrentes do sombreamento podem influenciar a dinâmica populacional da broca do café uma vez que a temperatura exerce influência sobre o desenvolvimento, a sobrevivência e a taxa de crescimento populacional da espécie. Nesse contexto, a arborização modifica o microclima do

cafeeiro, promovendo redução da radiação incidente, da temperatura e da amplitude térmica no interior do cultivo.

Vaast *et al.* (2006) observaram que a arborização promove amortecimento microclimático no interior do cultivo, reduzindo a temperatura foliar em aproximadamente 2 a 4 °C em comparação ao cultivo conduzido a pleno sol, com maiores reduções registradas nas folhas internas do dossel. Além disso, os autores verificaram redução da temperatura dos frutos em cafeeiros sombreados, cujos valores permaneceram próximos de 30 °C a 33 °C, enquanto frutos expostos diretamente ao sol atingiram temperaturas próximas de 40 °C. Os autores também observaram atraso de aproximadamente um mês na maturação dos frutos em ambientes sombreados, evidenciando que a arborização interfere diretamente no microclima e nos processos fisiológicos do cafeeiro.

Resultados semelhantes foram observados por Ricci, Cochetto Junior e Almeida (2013), que verificaram que o consórcio do cafeeiro com espécies arbóreas como *G. sepium* e *E. poeppigiana* promove redução da amplitude térmica e das temperaturas máximas no interior do cultivo. De forma complementar, Muschler (2001) relatou que o sombreamento pode reduzir a temperatura dos frutos em até 4 °C em regiões de menor altitude, contribuindo para retardar o metabolismo e o desenvolvimento da broca do café.

Essas alterações microclimáticas podem refletir diretamente sobre a infestação da praga. Teodoro, Klein e Tschantke (2008) observaram menores densidades populacionais da broca do café em sistemas sombreados em comparação aos cultivos conduzidos sem arborização. Segundo os autores, além da regulação térmica promovida pelo sombreamento, sistemas arborizados favorecem maior equilíbrio ecológico e podem aumentar a presença de inimigos naturais associados ao controle biológico da praga.

Nesse sentido, Perfecto e Vandermeer (2015) destacam que a manutenção de vegetação diversificada em SAFs fornece habitat e recursos alimentares para predadores naturais, contribuindo para maior estabilidade ecológica do sistema. Entre os principais inimigos naturais associados à broca do café destacam-se formigas predadoras dos gêneros *Pheidole* e *Azteca*, frequentemente favorecidas pela maior complexidade estrutural dos sistemas arborizados. Piato *et al.* (2021) verificaram que a infestação por broca foi aproximadamente 7% menor em sistemas orgânicos intensificados com presença de árvores em comparação aos sistemas convencionais

intensificados na Amazônia. Os autores atribuíram esse resultado à maior complexidade vegetal e à maior abundância de inimigos naturais presentes nos sistemas arborizados.

Rezende *et al.* (2014) observaram que espécies arbóreas com nectários extraflorais favorecem a presença de formigas predadoras, capazes de penetrar em frutos brocados, alimentar-se de larvas e adultos da broca e até impedir a entrada de novos insetos nos frutos. Outro fator relevante é a maior eficiência potencial de agentes microbiológicos em ambientes sombreados. Ruiz-Cárdenas e Baker (2010) destacam que a incidência direta de radiação solar reduz a sobrevivência de *Beauveria bassiana*, enquanto ambientes sombreados favorecem a persistência do fungo entomopatogênico no campo, aumentando o potencial de ocorrência de epizootias naturais.

Entretanto, a resposta da broca do café ao sombreamento não ocorre de forma linear. Staver *et al.* (2001) destacam que a dinâmica de pragas em sistemas cafeeiros arborizados pode variar conforme a intensidade do sombreamento, a estrutura do sistema e as interações ecológicas presentes no ambiente. Piato *et al.* (2021) complementam essa interpretação ao demonstrarem que a distribuição heterogênea da sombra em SAFs resulta na formação de pequenas zonas de incidência direta de radiação solar no interior da lavoura. Nessas áreas, o aumento localizado da temperatura pode favorecer a atividade e o desenvolvimento da broca do café, uma vez que condições microclimáticas mais quentes aceleram o ciclo biológico do inseto.

Dessa forma, os estudos indicam que os SAFs exercem influência complexa sobre a dinâmica populacional de *H. hampei*, envolvendo simultaneamente alterações microclimáticas, modulação térmica, disponibilidade de habitat para inimigos naturais e maior estabilidade ecológica do sistema. Entretanto, os efeitos observados podem variar em função da intensidade da sombra, das espécies arbóreas utilizadas, da distribuição espacial da arborização e das condições ambientais locais.

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, M. R. P.; SILVA, P. L.; ROCHA, A. P. S. Cafeicultura: evolução do café no Brasil, Minas Gerais e no município de João Pinheiro, MG. **Revista Contemporânea**, Caruaru, v. 3, n. 11, p. 21683-21706, 2023. DOI: <https://doi.org/10.56083/RCV3N11-091>.
- AUGUSTO, D. C. C. *et al.* Utilização de esgotos domésticos tratados através de um sistema biológico na produção de mudas de *Croton floribundus* Spreng. (capixingui) e *Copaifera langsdorffii* Desf. (copaíba). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 335-342, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000300009>.
- AVELINO, J. *et al.* Shade tree *Chloroleucon eurycyclum* promotes coffee leaf rust by reducing uredospore wash-off by rain. **Crop Protection**, Tehran, v. 129, p. 1-8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.105038>.
- BAKER, P. S.; BARRERA, J. F.; RIVAS, A. Life-history studies of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*, Scolytidae) on coffee trees in southern Mexico. **Journal of applied ecology**, London, v. 29, n. 3, p. 656-662, 1992. DOI: <https://doi.org/10.2307/2404473>.
- BARROS, V. M. S. *et al.* Levantamento fitossociológico de plantas daninhas em sistema de produção orgânico e convencional de café arábica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEIEIRAS, 10., 2019, Poços de Caldas. **Anais [...]**. Poços de Caldas: UFV, 2019. p. 1-4. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/12578>. Acesso em: 8 abr. 2026
- BEER, J. *et al.* Shade management in coffee and cacao plantations. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 38, p. 139-164, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1005956528316>.
- BOTE, A. D.; STRUIK, P. C. Effects of shade on growth, production and quality of coffee (*Coffea arabica*) in Ethiopia. **Journal of Horticulture and Forestry**, New York, v. 3, n. 11, p. 336-341, 2011. Disponível em: <https://edepot.wur.nl/192807>. Acesso em: 8 abr. 2026.
- BOTE, A. D.; VOS, J. Tree management and environmental conditions affect coffee (*Coffea arabica* L.) bean quality. **NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences**, Abingdon, v. 83, n. 1, p. 39-46, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.njas.2017.09.002>.
- CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Definição e esquematização das fases fenológicas do cafeeiro arábica nas condições tropicais do Brasil. **Bragantia**, Campinas, v. 60, n. 1, p. 65-68, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052001000100008>.
- CAMARGO, M. B. P. The impact of climatic variability and climate change on arabic coffee crop in Brazil. **Bragantia**, Campinas, v. 69, n. 1, p. 239-247, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000100030>.
- CAMPANHA, M. M. *et al.* Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 63, p. 75-82, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000049435.22512.2d>.

CANNELL, M. G. R. Physiology of the coffee crop. *In*: CLIFFORD, M. N.; WILLSON, K. C. (ed.). **Coffee: botany, biochemistry and production of beans and beverage**. London: Croom Helm, 1985. p. 108-134. DOI: https://doi.org/10.1007/978-1-4615-6657-1_5.

CANUTO, R. S. O. *et al.* Levantamento fitossociológico de plantas daninhas em área de produção de café catuaí amarelo. **Revista Inova Ciência & Tecnologia**, Uberaba, v. 6, n. 1, p. 18-23, 2020. Disponível em: <https://periodicos.iftm.edu.br/index.php/inova/article/view/1017>. Acesso em: 8 abr. 2026.

CARNEIRO, A. M.; IRGANG, B. E. Origem e distribuição geográfica das espécies ruderais da Vila de Santo Amaro, General Câmara, Rio Grande do Sul. **Iheringia, Série Botânica**, Porto Alegre, v. 60, n. 2, p. 175-188, 2005. Disponível em: <https://isb.emnuvens.com.br/iheringia/article/view/194>. Acesso em: 8 abr. 2026.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa, 2003. v. 1. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/305634>. Acesso em: 8 abr. 2026.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa, 2006. v. 2. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/305634>. Acesso em: 8 abr. 2026.

CASSAMO, C. T. *et al.* Shade and altitude implications on the physical and chemical attributes of green coffee beans from Gorongosa Mountain, Mozambique. **Agronomy**, Basel, v. 12, n. 10, p. 1-20, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12102540>.

CHARBONNIER, F. *et al.* Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. **Plant, Cell & Environment**, Oxford, v. 40, n. 8, p. 1592-1608, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.12964>.

CHENG, B. *et al.* Slower development of lower canopy beans produces better coffee. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 71, n. 14, p. 4201-4214, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eraa151>.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de café: safra 2024/2025 – 1º levantamento**. Brasília, DF: CONAB, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cafe/1o-levantamento-de-cafe-safra-2025/boletim-cafe-janeiro-2025>. Acesso em: 8 abr. 2026.

CONAB - COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de café: safra 2026 – 1º levantamento**. Brasília, DF: CONAB, 2026. Disponível em: <https://www.gov.br/conab/pt-br/atuacao/informacoes-agropecuarias/safras/safra-de-cafe/1o-levantamento-de-cafe-safra-2026/boletim-de-safras-cafe-fevereiro-26.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2026.

COSTE, R. **Coffee: the plant and the product**. London: Macmillan Press, 1992.

DAMATTA, F. M. Ecophysiological constraints on the production of shaded and unshaded coffee: a review. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 86, n. 2-3, p. 99-114, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2003.09.001>.

DAMATTA, F. M. *et al.* Ecophysiology of coffee growth and production. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Rio de Janeiro, v. 19, n. 4, p. 485-510, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202007000400014>.

DAMATTA, F. M.; RAMALHO, J. D. C. Impacts of drought and temperature stress on coffee physiology and production: a review. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, Rio de Janeiro, v. 18, n. 1, p. 55-81, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1677-04202006000100006>.

DELPRETE, P. G.; JARDIM, J. G. Systematics, taxonomy and floristics of Brazilian Rubiaceae: an overview about the current status and future challenges. **Rodriguésia**, Rio de Janeiro, v. 63, n. 1, p. 101-128, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S2175-78602012000100009>.

DURAND-BESSART, C. *et al.* Analysis of interactions amongst shade trees, coffee foliar diseases and coffee yield in multistrata agroforestry systems. **Crop Protection**, Guildford, v. 133, p. 1-8, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105137>.

DURIGAN, G.; FIGLIOLIA, M. B.; KAWABATA, M.; GARRIDO, M. A. O.; BAITELLO, J. B. **Sementes e mudas de árvores tropicais**. São Paulo: Páginas & Letras, 2002. 64 p.

FAO - FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **Statistical Yearbook 2024**. Rome: FAO, 2024. DOI: <https://doi.org/10.4060/cd2971en>.

FARIA, P. H. O.; ANDRADE, P. P. Eficiência de métodos de controle na população de plantas daninhas na cultura do café. **Revista Agroveterinária do Sul de Minas**, Varginha, v. 6, n. 3, p. 154-178, 2024. Disponível em: <https://www.periodicos.unis.edu.br/agrovetsulminas/article/view/958>. Acesso em: 8 abr. 2026.

FASSIO, L. O. *et al.* Sensory profile and chemical composition of specialty coffees from Matas de Minas Gerais, Brazil. **Journal of Agricultural Science**, Richmond Hill, v. 9, n. 9, p. 78-87, 2017. DOI: <https://doi.org/10.5539/jas.v9n9p78>.

FELIPPE, G. M.; POLO, M. Germinação de ervas invasoras: efeito de luz e escarificação. **Revista Brasileira de Botânica**, São Paulo, v. 6, n. 1, p. 55-60, 1983. https://www.researchgate.net/profile/Marcelo-Polo/publication/284105885_Germinacao_de_ervas_invasoras_Efeito_de_luz_e_escarificacao/links/565b247808ae1ef92980e461/Germinacao-de-ervas-invasoras-Efeito-de-luz-e-eskarificacao.pdf

FIALHO, C. M. T. *et al.* Interferência de plantas daninhas sobre o crescimento inicial de *Coffea arabica*. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 29, n. 1, p. 137-147, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582011000100016>

FONTES, D. R. *et al.* Integrated weed management in coffee for sustainable

agriculture – A practical Brazilian approach. *In*: MENDES, K. F. **New insights in herbicide science**. London: IntechOpen, 2022. p. 1-16. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.108881>.

GICHURU, E. *et al.* Coffee leaf rust (*Hemileia vastatrix*) in Kenya—A review. **Agronomy**, Basel, v. 11, n. 12, p. 1-9, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy11122590>.

GIRALDO-JARAMILLO, M. GARCIA, A. G; PARRA, J. R. Biology, thermal requirements, and estimation of the number of generations of *Hypothenemus hampei* (Ferrari, 1867) (Coleoptera: Curculionidae) in the State of São Paulo, Brazil. **Journal of Economic Entomology**, College Park, v. 111, n. 5, p. 2192-2200, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/toy162>.

GOMES, L. C. *et al.* Agroforestry systems can mitigate the impacts of climate change on coffee production: a spatially explicit assessment in Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 294, p. 1-11, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106858>

HAGGAR, J. *et al.* Coffee agroecosystem performance under full sun, shade, conventional and organic management regimes in Central America. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 82, n. 3, p. 285-301, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9392-5>.

HAGGAR, J. *et al.* Shade and agronomic intensification in coffee agroforestry systems: trade-off or synergy?. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, Lausanne, v. 5, p. 1-14, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2021.645958>.

HALLÉ, F.; OLDEMAN, R. A. A.; TOMLINSON, P. B. **Tropical trees and forests**: an architectural analysis. Dordrecht: Springer, 2012. 441 p.

HAMILTON, L. J. *et al.* Coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) (Coleoptera: Curculionidae) development across an elevational gradient on Hawai'i Island: applying laboratory degree-day predictions to natural field populations. **PLOS ONE**, San Francisco, v. 14, n. 7, p. 1-16, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218321>.

JARAMILLO, J. *et al.* Thermal tolerance of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei*: predictions of climate change impact on a tropical insect pest. **PLOS ONE**, San Francisco, v. 4, n. 8, p. 1-11, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006487>.

JIMÉNEZ AVILA, E. Estudios ecológicos del agroecosistema cafetalero: I. Estructura de los cafetales de una finca cafetalera en Coatepec, Ver., México. **Biótica**, Xalapa, v. 4, n. 1, p. 1-12, 1979. Disponível em: <https://hdl.handle.net/20.500.14330/PER01000119176>. Acesso em: 8 abr. 2026.

KAMANGA, B. M. *et al.* Allelopathic effects of *Moringa oleifera* Lam. on cultivated and non cultivated plants: implications for crop productivity and sustainable agriculture. **Agronomy**, Basel, v. 15, n. 8, p. 1-18, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15081766>.

KOUTOULEAS, A. *et al.* Shaded-coffee: A nature-based strategy for coffee production under climate change? A review. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, Lausanne, v. 6, p. 1-21, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.877476>.

LIN, B. B. Agroforestry management as an adaptive strategy against potential microclimate extremes in coffee agriculture. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 144, n. 1-2, p. 85-94, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.12.009>.

LÓPEZ-SAMPSON, A. *et al.* A public database on coffee agroforestry systems: construction and bibliometric analysis. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 99, n. 8, p. 1-15, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-025-01357-8>.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa: Plantarum, 2002. 382 p.

MEIRELES, E. J. L. *et al.* **Fenologia do cafeeiro**: condições agrometeorológicas e balanço hídrico do ano agrícola 2004-2005. Viçosa: SBI Café, 2009. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/3381>. Acesso em: 8 abr. 2026.

MELLONI, R. *et al.* Sistemas agroflorestais cafeeiro-araucária e seu efeito na microbiota do solo e seus processos. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 28, n. 2, p. 784-795, 2018. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509832392>.

MONTEITH, J. L.; ONG, C. K.; CORLETT, J. E. Microclimatic interactions in agroforestry systems. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 45, n. 1-4, p. 31-44, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90204-9](https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90204-9).

MORAIS, H. *et al.* Microclimatic characterization and productivity of coffee plants grown under shade of pigeon pea in Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 5, p. 763-770, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000500007>.

MUÑOZ-VILLERS, L. E. *et al.* Coffee and shade trees show complementary use of soil water in a traditional agroforestry ecosystem. **Hydrology and Earth System Sciences**, Katlenburg-Lindau, v. 24, n. 4, p. 1649-1668, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-24-1649-2020>.

MUSCHLER, R. G. Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee-zone of Costa Rica. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 51, n. 2, p. 131-139, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010603320653>.

NASIRO, K. The benefits of agroforestry coffee production systems: a review. **World Journal of Food Science and Technology**, New York, v. 8, n. 4, p. 86-105, 2024. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20240804.13>.

NESTEL, D.; Altieri, M. A. The weed community of Mexican coffee agroecosystems: effect of management upon plant biomass and species composition. **Acta Oecologica**, Paris, v. 13, n. 6, p. 715-727, 1992. Disponível em: <https://agris.fao.org/search/en/providers/122439/records/6471f50b77fd37171a71cc03>. Acesso em: 8 maio 2026.

OLIVEIRA, L. G. R.; GARCIA, F. C. P. *Senna* (Leguminosae Caesalpinioideae) in Minas Gerais state, Brazil. **Rodriguésia**, Rio de Janeiro, v. 72, p. 1-57, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/2175-7860202172104>.

OLSON, M. E.; FAHEY, J. W. *Moringa oleifera*: a multipurpose tree for the dry tropics. **Revista Mexicana de Biodiversidad**, Ciudad de México, v. 82, n. 4, p. 1071-1082, 2011. Disponível em: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S1870-34532011000400001&script=sci_abstract&tlng=en. Acesso em: 8 abr. 2026.

PENDERGRAST, M. **Uncommon grounds**: the history of coffee and how it transformed our world. New York: Basic Books, 2010. Disponível em: https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=TUo981rkwkoC&oi=fnd&pg=PR5&dq=PENDERGRAST,+Mark.+Uncommon+grounds:+The+history+of+coffee+and+how+it+transformed+our+world.+Basic+Books,+2010.&ots=Bh9ysfV_KQ&sig=scWJdNYiSj4ladml6QS9bMmiR0&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false. Acesso em: 8 abr. 2026.

PERFECTO, I.; VANDERMEER, J. **Coffee agroecology**: a new approach to understanding agricultural biodiversity, ecosystem services and sustainable development. New York: Routledge, 2015.

PIATO, K. *et al.* Organic farming practices and shade trees reduce pest infestation and promote quality in coffee agroecosystems. **Life**, Basel, v. 11, n. 5, p. 1-14, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/life11050413>.

POMPELLI, M. F. *et al.* Leaf anatomy, ultrastructure and plasticity of *Coffea arabica* L. in response to light and nitrogen availability. **Biotemas**, Florianópolis, v. 25, n. 4, p. 13-28, 2012.

POZITANO, M.; ROCHA, S. C. S. Caracterização física e germinação de sementes de *Senna macranthera*. **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 33, n. 4, p. 777-784, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-31222011000400020>.

RAKOCEVIC, M. *et al.* Leaf gas exchange and bean quality fluctuations over the whole canopy vertical profile of Arabic coffee cultivated under elevated CO₂. **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 48, n. 5, p. 469-482, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1071/FP20298>.

RAKOCEVIC, M.; ANDROCIOLO FILHO, A. Morphophysiological characteristics of (*Coffea arabica* L.) in different arrangements: lessons from a 3d virtual plant approach. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 2, p. 154-166, maio/ago. 2010. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/3914>. Acesso em: 29 mar. 2026.

REBÊLO, A. G. D. M. *et al.* Estoque de nutrientes e decomposição da serapilheira em sistemas agroflorestais no município de Belterra-Pará. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, p. 1876-1893, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509846854>.

RENA, A. B.; DAMATTA, F. M. O sistema radicular do cafeeiro: estrutura e ecofisiologia. In: ZAMBOLIM, L. (ed.). **O estado da arte de tecnologias na produção de café**. Viçosa: UFV, 2002. p.11-92.

REZENDE, M. Q. *et al.* Extrafloral nectaries of associated trees can enhance natural pest control. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 188, p. 198-203, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.02.024>.

RIBEIRO, C. A. *et al.* Anatomical plasticity of secondary xylem in *Coffea arabica* L. (Rubiaceae) under different management practices for improved water use efficiency. **Trees**, Atlanta, v. 40, n. 7, p. 1-15, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-025-02695-x>.

RICCI, M. S. F. *et al.* Cultivo orgânico de cultivares de café a pleno sol e sombreado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 4, p. 569-575, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000400004>.

RICCI, M. S. F.; COCHETO JUNIOR, D. G.; ALMEIDA, F. F. D. Condições microclimáticas, fenologia e morfologia externa de cafeeiros em sistemas arborizados e a pleno sol. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 3, p. 279-388, 2013. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/7992>. Acesso em: 8 abr. 2026.

RODRIGUES, R. J. A *et al.* Phytosociology of weeds on cerrado mineiro coffee growing farms. **Advances in Weed Science**, Londrina, v. 40, p. 1-12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2022;40:00013>.

ROLO, V. Agroforestry for sustainable food production. **Sustainability**, Basel, v. 14, n. 16, p. 1-3, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/su141610193>.

RONCHI, C. P.; TERRA, A. A.; SILVA, A. A. Growth and nutrient concentration in coffee root system under weed species competition. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 25, n. 4, p. 679-687, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582007000400004>.

RUIZ-CÁRDENAS, R.; BAKER, P. Life table of *Hypothenemus hampei* (Ferrari) in relation to coffee berry phenology under Colombian field conditions. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 67, n. 6, p. 658-668, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-90162010000600007>.

SANTARÉM, E. R.; ÁQUILA, M. E. A. Influência de métodos de superação de dormência e do armazenamento na germinação de sementes de *Senna macranthera* (Colladon) Irwin & Barneby (Leguminosae). **Revista Brasileira de Sementes**, Londrina, v. 17, n. 2, p. 205-211, 1995. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/e562/442b9c41cca8d4e9ee4a94eaa901b9dab8d1.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2026.

SCHULZ, B.; BECKER, B.; GÖTSCH, E. Indigenous knowledge in a 'modern' sustainable agroforestry system: a case study from eastern Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 25, n. 1, p. 59-69, 1994. DOI: <https://doi.org/10.1007/BF00705706>.

STAVES, C. *et al.* Designing pest-suppressive multistrata perennial crop systems: shade-grown coffee in Central America. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 53, p. 151-170, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1013372403359>.

TATAGIBA, S. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; REIS, E. F. Crescimento vegetativo de mudas de café arábica (*Coffea arabica* L.) submetidas a diferentes níveis de

sombreamento. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 3, p. 251-261, 2010. Disponível em: <https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/131>. Acesso em: 9 abr. 2026.

TEODORO, A. V.; KLEIN, A. M.; TSCHARNTKE, T. Environmentally mediated coffee pest densities in relation to agroforestry management, using hierarchical partitioning analyses. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 125, n. 1-4, p. 120-126, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.12.004>.

VAAST, P. *et al.* Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Hoboken, v. 86, n. 2, p. 197-204, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.2338>.

VERDCOURT, B. A synopsis of the Moringaceae. **Kew Bulletin**, Richmond, v. 40, p. 1, 1985. DOI: <https://doi.org/10.2307/4108470>.

WAGNER, S. *et al.* Impact of climate change on the production of *Coffea arabica* at Mt. Kilimanjaro, Tanzania. **Agriculture**, Basel, v. 11, n. 1, p. 1-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture11010053>.

WALLER, J. M.; BIGGER, M.; HILLOCKS, R. J. (ed.). **Coffee pests, diseases and their management**. Wallingford: CABI, 2007.

WEI, S. H.; WANG, L. J.; LIN, M. Y. Temperature-dependent biology and population performances of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei* (Ferrari) (Coleoptera: Curculionidae: Scolytinae) on artificial diet. **Insects**, Basel, v. 14, n. 6, p. 1-19, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects14060499>.

3 ARTIGO A ESTRUTURA DENDROMÉTRICA DE ESPÉCIES ARBÓREAS E MICROCLIMA ASSOCIADOS AO CRESCIMENTO DE CAFEEIROS EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS

3.1 RESUMO

A adoção de sistemas agroflorestais (SAFs) na cafeicultura tem sido proposta como alternativa para diversificar os sistemas de produção e aumentar a estabilidade do ambiente de cultivo em regiões tropicais. Este estudo objetivou avaliar o desempenho fitotécnico de cafeeiros (*Coffea arabica* L.) e o crescimento de espécies arbóreas consorciadas em SAFs, em comparação ao monocultivo, em Londrina, PR. O delineamento experimental foi em bloco casualizado com quatro tratamentos e quatro repetições sendo: monocultivo e SAFs com *Moringa oleifera*, *Croton floribundus* e *Senna macranthera*. Foram avaliadas variáveis de crescimento e arquitetura dos cafeeiros, bem como variáveis dendrométricas das espécies arbóreas em diferentes períodos de avaliação, além das condições microclimáticas dos sistemas. As espécies arbóreas apresentaram padrões distintos de crescimento: *M. oleifera* destacou-se pelo rápido crescimento inicial, *C. floribundus* pelo crescimento acelerado no longo prazo e *S. macranthera* por um desenvolvimento moderado e contínuo. Nos cafeeiros, variáveis como diâmetro do caule e diâmetro da copa foram influenciadas principalmente pelo fator temporal, associado à idade das plantas, sem efeito expressivo dos sistemas de cultivo. O número de ramos produtivos não diferiu entre o monocultivo e os SAFs, indicando plasticidade fenotípica das plantas sob sombreamento. Conclui-se que os SAFs avaliados permitiram o desenvolvimento estrutural dos cafeeiros de forma comparável ao monocultivo, ao mesmo tempo em que promoveram diferenciação no crescimento do componente arbóreo, indicando potencial de uso como alternativa de manejo para sistemas cafeeiros mais diversificados.

Palavras-chave: arquitetura vegetal; Sombreamento; *coffea arabica*; sistemas agroflorestais; espécies arbóreas; crescimento vegetativo.

3.2 ABSTRACT

The adoption of agroforestry systems (AFS) in coffee cultivation has been proposed

as an alternative to diversify production systems and increase the stability of the growing environment in tropical regions. This study aimed to evaluate the phytotechnical performance of coffee plants (*Coffea arabica* L.) and the growth of tree species intercropped in AFS, compared to monoculture, in Londrina, PR. The experimental design was a randomized block design with four treatments and four replications: monoculture and AFS with *Moringa oleifera*, *Croton floribundus*, and *Senna macranthera*. Evaluations of coffee plant growth and architecture were assessed, as well as dendrometric variables of the tree species in different years of evaluation, in addition to the microclimatic conditions of the systems. The tree species presented distinct growth patterns: *M. oleifera* stood out for its rapid initial growth, *C. floribundus* for its accelerated long-term growth, and *S. macranthera* for its moderate and continuous development. In coffee plants, variables such as stem diameter and crown diameter were mainly influenced by the temporal factor, associated with the age of the plants, without a significant effect from the cultivation systems. The number of productive branches did not differ between monoculture and agroforestry systems, indicating phenotypic plasticity of coffee plants under shading. It is concluded that the evaluated agroforestry systems allowed for the structural development of coffee plants in a manner comparable to monoculture, while simultaneously promoting differentiation in the growth of the tree component, providing potential for use as a management alternative for more diversified coffee systems.

Key-words: plant architecture; shading; *coffea arabica*; agroforestry systems; tree species; vegetative growth.

3.3 INTRODUÇÃO

O café é uma das bebidas mais apreciadas no mundo, destacando-se também entre as principais commodities comercializadas globalmente (Davis *et al.*, 2012). Apesar de sua importância econômica e social, a cafeicultura tem sido impactada por desafios associados às mudanças climáticas, principalmente em relação ao aumento da temperatura do ar e à modificação na quantidade e padrões de distribuição sazonal das chuvas (Ovalle-Rivera *et al.*, 2015). Em estudo conduzido nas regiões produtoras de café arábica da Tanzânia, Craparo *et al.* (2015) observaram que o aumento das temperaturas mínimas esteve associado à redução da produtividade do cafeeiro,

especialmente quando combinado à ocorrência de períodos de seca mais intensos e à exposição a temperaturas acima das condições consideradas adequadas para a cultura.

Projeções climáticas indicam reduções na produtividade global e na extensão das áreas aptas ao cultivo de café até 2050, em função do aumento das temperaturas, da maior frequência de eventos climáticos extremos e da irregularidade no regime de chuvas (Grüter *et al.*, 2022). Esse cenário impõe a necessidade de intervenções agrônômicas capazes de mitigar riscos produtivos e assegurar a sustentabilidade da cafeicultura no longo prazo (Poltronieri; Rossi, 2016).

Do ponto de vista ecológico e fisiológico, *Coffea arabica* L. é uma espécie que tem origem associada ao sub-bosque de florestas montanas da Etiópia, portanto apresenta tolerância ao sombreamento e possui capacidade de crescimento sob condições de menor irradiância, característica relacionada à sua plasticidade morfofisiológica (Araujo *et al.*, 2008; Tatagiba; Pezzopane; Reis, 2010; Pompelli *et al.*, 2012; Andrade *et al.*, 2025). Essa plasticidade pode ser expressa por ajustes anatômicos, morfológicos e fotossintéticos em resposta às variações ambientais, especialmente à disponibilidade de luz (Pompelli *et al.*, 2012; Andrade *et al.*, 2025).

Estudos realizados em Minas Gerais confirmam que o cafeeiro apresenta ajustes morfológicos distintos quando cultivado em sistema agroflorestal em comparação ao monocultivo, evidenciando sua capacidade adaptativa frente a diferentes condições ambientais (Campanha *et al.*, 2004).

Pesquisas recentes reforçam esse padrão, mostrando que o cafeeiro ajusta sua fotossíntese e eficiência no uso da água sob diferentes níveis de sombreamento (Andrade *et al.*, 2025) e que práticas de manejo podem modificar a anatomia do xilema, aumentando sua plasticidade funcional e hídrica (Ribeiro *et al.*, 2026).

Além dos efeitos microclimáticos, as espécies arbóreas contribuem para a ciclagem de nutrientes e para a manutenção da biodiversidade, fortalecendo a resiliência dos sistemas produtivos (Campanha *et al.*, 2004; Moraes *et al.*, 2006; Muschler, 2001). Entretanto, a literatura também destaca que a associação entre culturas agrícolas e espécies arbóreas pode levar a algum grau de competição por recursos acima do solo (luz) e abaixo do solo (água e nutrientes) (Monteith; Ong; Corlett, 1991).

Dessa forma, o manejo do componente arbóreo é um importante fator para o desempenho dos SAFs, envolvendo práticas como o controle do sombreamento, a

regulação da densidade de árvores e a adoção de estratégias de manejo que minimizem a competição por recursos (Beer *et al.*, 1998; Muñoz-Villers *et al.*, 2020).

Apesar do avanço das pesquisas sobre café sombreado, ainda são limitados os estudos que integram, em uma mesma abordagem, o desempenho fitotécnico do cafeeiro, o crescimento dendrométrico das espécies arbóreas e as condições microclimáticas do sistema ao longo do tempo.

Assim, este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho fitotécnico de cafeeiros, o crescimento dendrométrico de espécies arbóreas e as condições microclimáticas em sistemas agroflorestais, em comparação ao monocultivo.

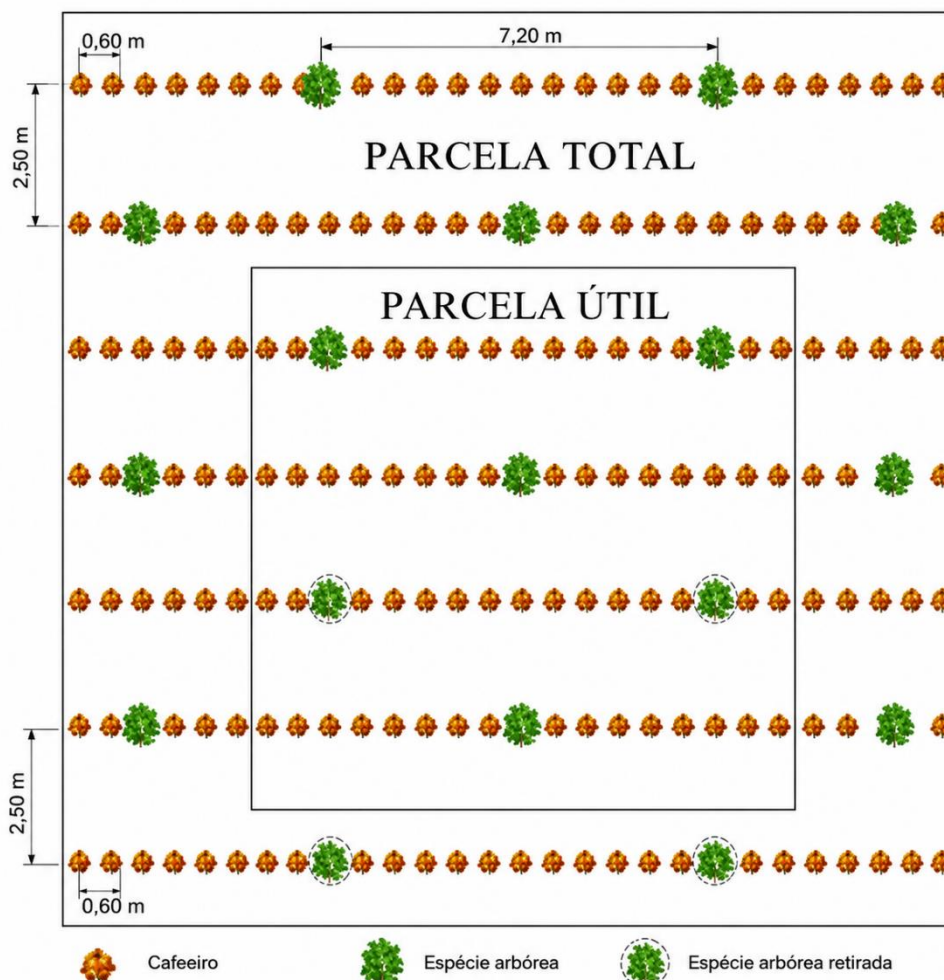
3.4 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido em Londrina, Paraná, Brasil (23°21'27.8"S e 51°09'33.5"W, 574 m), região com clima típico Cfa, subtropical úmido, com verão quente, segundo a classificação de Köppen. A temperatura média anual é 21,1°C, a média do mês mais quente é de 23,9°C (janeiro) e a do mês mais frio é 16,9°C (julho). A média histórica (1976 a 2019) do acumulado de chuva anual é de 1.632,0 mm, sendo janeiro o mês mais chuvoso, e agosto o menos chuvoso. (IDR-Paraná). O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico (Santos *et al.*, 2018).

A cultivar de *Coffea arabica* foi a IPR 98. Em monocultivo, o espaçamento dos cafeeiros foi de 0,60 x 2,50 m, com 6.666 plantas ha⁻¹. Nos SAFs, manteve-se o espaçamento dos cafeeiros, e as arbóreas foram dispostas em quincôncio ao longo das linhas de cafeeiro, com uma árvore a cada intervalo de 11 plantas de cafeeiro, substituindo uma delas. Esse arranjo resultou, inicialmente, em densidade de 555 árvores ha⁻¹ e 6.111 cafeeiros por ha⁻¹. Três anos e cinco meses após o plantio foram realizado um desbaste, removendo-se 40% das árvores, reduzindo a densidade arbórea para 333 árvores por ha⁻¹.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram: cafeeiro em monocultivo, cafeeiros consorciados com as espécies arbóreas *Moringa oleifera*, *Croton floribundus* e *Senna macranthera*. Cada repetição foi constituída por uma parcela total de 19,80 x 22,50 m, sendo a parcela útil central de 10,00 x 10,20 m (Figura 4).

Figura 4 – Esquema de distribuição espacial dos cafeeiros e espécies arbóreas na parcela experimental total e na parcela útil em sistemas agroflorestais.



Nota: Os símbolos alaranjados indicam cafeeiros, os símbolos verdes indicam espécies arbóreas e os símbolos verdes destacados com um círculo indicam árvores retiradas da parcela 41 meses após a implantação.

Fonte: A autora (2026).

3.4.1 Avaliações

3.4.1.1 Avaliações das espécies arbóreas

As avaliações dendrométricas das espécies arbóreas foram realizadas em plantas jovens com dois, quatro, seis, dez, 15, 24 meses e depois com 8º e 9º anos após o plantio. Foram selecionadas aleatoriamente oito arbóreas por parcela para a realização das avaliações.

Foram mensuradas as seguintes variáveis:

- Altura total (m): distância entre o nível do solo e o ápice da copa, determinada com régua telescópica;

- b) Diâmetro do coleto da planta (cm): mensurado com fita milimetrada;
- c) Diâmetro à altura do peito (DAP) (cm): mensurado a 1,30 m do solo, com trena;
- d) Diâmetro da copa (m): obtido pela média de duas medições perpendiculares da projeção horizontal da copa;
- e) Altura do fuste (m): distância entre o nível do solo e a inserção da primeira ramificação, mensurada com trena.

3.4.1.2 Avaliações das plantas de cafeeiro

As avaliações fitotécnicas do cafeeiro foram realizadas aos dois, quatro, seis, oito e nove anos após o plantio. Em cada parcela útil, foram selecionadas aleatoriamente dez plantas para a realização das avaliações:

- a) Altura da planta (m): distância entre o nível do solo e o ápice da planta, determinada com trena;
- b) Diâmetro do caule (cm): medido a 5 cm do solo, com um paquímetro;
- c) Diâmetro da copa (m): obtido pela média de duas medições perpendiculares da projeção horizontal da copa;
- d) Número de ramos plagiotrópicos: contagem direta dos ramos presentes em cada planta.

3.4.1.3 Temperatura e umidade relativa do ar

Os dados de temperaturas e umidade do ar foram coletados em quatro épocas contrastantes: setembro de 2020 (primavera), dezembro de 2020 (verão), abril de 2021 (outono) e julho de 2021 (inverno), por meio de estações meteorológicas automáticas instaladas no centro de uma parcela útil de cada tratamento. Os sensores foram posicionados junto aos cafeeiros localizados próximos às estações.

As estações foram programadas para registrar dados a cada dez segundos e armazenar médias a cada quinze minutos e cálculo dos valores diários médios, máximos e mínimos. A descrição de cada sensor e posição de instalação são descritos a seguir:

- Temperatura do ar a 1,5 m da superfície do solo: utilizou-se termopares do tipo cobre-constantã, instalados na linha dos cafeeiros, entre duas plantas, com o

auxílio de um suporte de madeira. Para proteção contra radiação solar direta, os termopares foram cobertos com tubos de policloreto de vinila (PVC), cortados longitudinalmente ao meio, com 10 cm de comprimento e 5 cm de diâmetro;

- Amplitude térmica: calculada pela diferença entre a temperatura máxima e a temperatura mínima diária ($T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}$);
- Umidade relativa do ar: monitorada acima da copa do cafeeiro, a aproximadamente 2,0 m de altura, utilizando sensor modelo HMP45C (ref. com. Campbell Scientific).

3.4.1.4 Análises estatísticas

Para a avaliação do desenvolvimento inicial das espécies arbóreas, foram consideradas as variáveis altura total, diâmetro do coleto, além de diâmetro à altura do peito (DAP) e diâmetro de copa. Essas variáveis foram analisadas por modelos lineares mistos (linear mixed models, LMM), considerando como efeitos fixos a espécie, o tempo de avaliação e a interação entre espécie e tempo. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para a fase mais avançada do componente arbóreo, foram utilizados os dados do 8º e 9º ano, correspondentes às variáveis altura total, altura do fuste, diâmetro de copa e DAP. Essas variáveis também foram analisadas por modelos lineares mistos, com espécie, ano e a interação espécie × ano como efeitos fixos.

A partir das variáveis dendrométricas do 8º e 9º ano, foram calculados os seguintes índices morfométricos: comprimento de copa ($CC = \text{altura total} - \text{altura do fuste}$), proporção de copa ($PC = \text{comprimento de copa} / \text{altura total}$), proporção de fuste ($PF = \text{altura do fuste} / \text{altura total}$), relação copa/altura ($RCA = \text{diâmetro de copa} / \text{altura total}$) e área basal individual ($AB = \pi \cdot DAP^2 / 40000$).

Foram analisados os dados do componente cafeeiro obtidos aos 2º, 4º e 8º anos após a implantação do cultivo. As variáveis avaliadas foram altura das plantas, diâmetro do caule e diâmetro de copa no terço médio.

A significância foi avaliada a 5% de probabilidade e, quando detectadas diferenças significativas, as médias ajustadas foram comparadas pelo teste de Tukey. A adequação dos modelos foi verificada pelos pressupostos de normalidade e homogeneidade de variâncias. As relações entre variáveis dendrométricas e

morfométricas foram avaliadas por correlação de Pearson. Os coeficientes de correlação foram interpretados quanto à magnitude, direção e significância das associações entre os atributos estruturais das árvores.

As variáveis dendrométricas foram exploradas por análise de componentes principais (Principal Component Analysis, PCA). Antes da ordenação, as variáveis foram padronizadas para média zero e variância unitária, de modo a eliminar o efeito das diferentes escalas de mensuração. A interpretação da PCA foi baseada na proporção da variância explicada pelos componentes principais e nas cargas das variáveis sobre os eixos de ordenação.

As análises foram conduzidas no ambiente R, utilizando-se modelos mistos, comparações múltiplas, correlação e ordenação multivariada.

3.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1 Crescimento Inicial e Estabelecimento das Espécies Arbóreas

3.5.1.1 Altura total das espécies arbóreas

Verificou-se efeito significativo de espécie, tempo de avaliação e da interação entre espécie e tempo sobre a altura total das espécies arbóreas, indicando que o crescimento em altura variou entre as espécies e ao longo do período avaliado. Em termos médios, *M. oleifera* apresentou maiores alturas aos 2 e 4 meses, com 0,53 e 0,45 m, respectivamente, enquanto *C. floribundus* apresentou 0,26 e 0,30 m, e *S. macranthera*, 0,20 e 0,26 m (Tabela 2).

Tabela 2 – Altura total média das espécies arbóreas em sistemas agroflorestais com cafeeiro, em diferentes meses após o plantio. Londrina, PR.

Espécie arbórea	Altura total (m)											
	2		4		6		10		15		24	
	meses		meses		meses		meses		meses		meses	
<i>Moringa oleifera</i>	0,53*	aD	0,45	aD	0,56	aD	3,10	aC	4,26	aB	4,83	aA
<i>Croton floribundus</i>	0,26	abD	0,30	aD	0,57	aD	2,13	bC	3,10	bB	4,20	aA
<i>Senna macranthera</i>	0,20	bC	0,26	aC	0,76	aC	2,35	bB	3,31	abA	4,48	aA

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna comparam espécies dentro de cada tempo de avaliação; médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha comparam tempos de avaliação dentro de cada espécie. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: A autora (2026).

No 6º mês após o plantio, não houve diferença entre as espécies para altura total. A partir do 10º mês, observou-se incremento significativo da altura total em relação às avaliações iniciais, indicando intensificação do crescimento após a fase de estabelecimento. No 10º mês, *M. oleifera* apresentou maior altura total em relação a *C. floribundus* e *S. macranthera*, atingindo 3,10 m. No 15º mês, *M. oleifera* manteve os maiores valores médios de altura total, atingindo 4,26 m, sem diferir de *S. macranthera* (3,31 m). No 24º mês, as espécies não diferiram entre si, indicando convergência parcial do crescimento em altura ao final da fase juvenil (Tabela 2).

O maior crescimento inicial, em altura total, observado para *M. oleifera* pode estar associado ao vigor juvenil e ao rápido desenvolvimento vegetativo, características descritas para a espécie em ambientes tropicais. A espécie apresenta alta capacidade de expansão caulinar e rápido acúmulo de biomassa, características que favorecem seu estabelecimento precoce em SAFs (Bania *et al.*, 2023).

Além do rápido crescimento inicial, *M. oleifera* tem sido destacada em sistemas agroflorestais pelo potencial de produção de biomassa e aporte de resíduos orgânicos. Rebêlo *et al.* (2022) verificaram que a presença de *M. oleifera* promoveu incremento nos teores de nitrogênio, fósforo e potássio, associado à elevada taxa de decomposição de sua serapilheira, evidenciando seu potencial para intensificação da ciclagem de nutrientes em SAFs com cafeeiros.

A menor altura de *C. floribundus* e *S. macranthera*, em comparação a *M. oleifera*, sugere um padrão de estabelecimento mais gradual nas primeiras avaliações. No caso de *C. floribundus*, esse comportamento não deve ser interpretado necessariamente como baixo potencial de crescimento, uma vez que a espécie é descrita como pioneira heliófita e de crescimento rápido, podendo atingir 20 m de altura na fase adulta (Carvalho, 2003). Estudos de produção de mudas demonstram que *C. floribundus* pode demandar aproximadamente nove meses para atingir porte adequado de plantio, corroborando sua estratégia de desenvolvimento inicial mais moderado (Augusto *et al.*, 2003; Carvalho, 2003).

Senna macranthera apresentou crescimento contínuo, com altura média próxima à *M. oleifera* ao 24º mês. Esse comportamento indica um estabelecimento inicial mais gradual, seguido de incremento consistente em altura, compatível com uma espécie pioneira, heliófita e perenifólia, características compatíveis com espécies do gênero *Senna* (Carvalho, 2006; Carvalho, 2014). Em SAFs, o uso de espécies com crescimento moderado e fuste definido pode contribuir para a estabilidade

microclimática e reduzir o risco de competição excessiva por luz (Patil *et al.*, 2025; Meylan *et al.*, 2013). Isso ocorre porque tais espécies permitem uma construção mais gradual do sombreamento, evitando mudanças bruscas no regime de radiação que chegam ao sub-bosque (Carvalho, 2014).

As diferenças no ritmo de crescimento e na arquitetura das espécies arbóreas apresentam implicações diretas para a funcionalidade dos SAFs. O rápido crescimento inicial de *M. oleifera* sugere maior potencial de formação precoce de sombra, embora seus efeitos microclimáticos dependam da expansão e densidade da copa, e não apenas do crescimento em altura. Por outro lado, espécies nativas como *C. floribundus* e *S. macranthera* podem contribuir para a formação mais gradual e persistente do componente arbóreo, favorecendo a consolidação estrutural do dossel ao longo do tempo. Nesse contexto, Beer *et al.* (1998) e Somarriba *et al.* (2024) ressaltam que a funcionalidade dos SAFs não depende exclusivamente da taxa de crescimento das espécies arbóreas, mas da interação entre arquitetura de copa, densidade foliar, padrão de ramificação e manejo do dossel, fatores que determinam a interceptação luminosa e a capacidade de regulação térmica do agroecossistema.

Os resultados indicam que a escolha da espécie arbórea para SAFs cafeeiros deve considerar não apenas o potencial de crescimento em altura, mas também a arquitetura da copa e o manejo do dossel, fatores que condicionam a disponibilidade de radiação e a compatibilidade do sombreamento com as exigências do cafeeiro ao longo do ciclo produtivo.

3.5.1.2 Diâmetro do coleto e diâmetro à altura do peito das espécies arbóreas

Para o diâmetro do coleto, verificou-se efeito significativo da espécie arbórea, do tempo de avaliação e da interação entre espécie e tempo, evidenciando comportamento diferencial entre as espécies ao longo do período inicial de estabelecimento (Tabela 3). Aos 2 meses após o plantio, *M. oleifera* apresentou maior diâmetro médio do coleto (0,85 cm), superando *C. floribundus* (0,40 cm) e *S. macranthera* (0,35 cm). No 4º mês, *M. oleifera* não apresentou incremento significativo em relação à avaliação anterior e não diferiu de *C. floribundus* (0,72 cm), enquanto *S. macranthera* apresentou menor diâmetro médio do coleto (0,51 cm). Aos 6º meses, não houve diferença entre as espécies para o diâmetro do coleto. Em termos temporais, observou-se incremento significativo do diâmetro do coleto nas três

espécies ao longo do período avaliado, com maiores valores registrados aos 6 meses após o plantio.

Tabela 3 – Diâmetro médio do coleto das espécies arbóreas em sistemas agroflorestais com café, em diferentes meses após o plantio. Londrina, PR.

Espécie arbórea	Diâmetro do coleto (cm)					
	2 meses		4 meses		6 meses	
<i>Moringa oleifera</i>	0,85*	aB	0,85	aB	1,13	aA
<i>Croton floribundus</i>	0,40	bC	0,72	aB	1,53	aA
<i>Senna macranthera</i>	0,35	bC	0,51	bB	1,13	aA

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna comparam espécies dentro de cada tempo de avaliação; médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha comparam tempos de avaliação dentro de cada espécie. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: A autora (2026).

Para o diâmetro à altura do peito (DAP), verificou-se efeito significativo de espécie e de tempo de avaliação, sem interação significativa entre esses fatores, indicando que as diferenças entre espécies foram relativamente consistentes ao longo do período avaliado (Tabela 4). No 10º mês, *M. oleifera* apresentou maior DAP (4,03 cm), superando *C. floribundus* e *S. macranthera*. No 15º mês, *M. oleifera* manteve o maior valor absoluto (7,24 cm), e não diferiu de *C. floribundus* (5,87 cm), enquanto *S. macranthera* apresentou a menor média. No 24º mês, entretanto, as espécies passaram a não diferir entre si. Esses resultados evidenciam crescimento radial contínuo das espécies entre o 10º e o 24º mês após o plantio, com redução das diferenças estruturais, entre elas, ao final da fase juvenil.

Tabela 4 – Diâmetro médio do caule das espécies arbóreas em sistemas agroflorestais com café, em diferentes meses após o plantio. Londrina, PR.

Espécie arbórea	Diâmetro do caule (cm)					
	10 meses		15 meses		24 meses	
<i>Moringa oleifera</i>	4,03*	aC	7,24	aB	9,65	aA
<i>Croton floribundus</i>	2,63	bC	5,87	aB	8,56	aA
<i>Senna macranthera</i>	2,57	bC	4,61	bB	8,04	aA

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna comparam espécies dentro de cada tempo de avaliação; médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha comparam tempos de avaliação dentro de cada espécie. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Fonte: A autora (2026).

De acordo com Palada (2019) e Bania *et al.* (2023), *M. oleifera* apresenta rápido crescimento vegetativo e boa capacidade de adaptação em ambientes tropicais. Esse padrão é compatível com o maior diâmetro do coleto observado no presente estudo durante as primeiras avaliações, indicando maior crescimento radial inicial em relação às demais espécies.

Senna macranthera apresentou crescimento do diâmetro do caule mais gradual ao longo do período avaliado, aproximando-se das demais espécies apenas nas avaliações finais. Segundo Carvalho (2014), a espécie apresenta crescimento inicial moderado e desenvolvimento progressivo em campo, padrão compatível com o comportamento observado neste estudo. Esse crescimento mais gradual sugere estratégia estrutural durante o estabelecimento inicial em comparação às demais espécies avaliadas.

As diferenças observadas entre as espécies em relação ao diâmetro do coleto e do caule indicam padrões distintos no estabelecimento estrutural inicial, com possíveis implicações sobre a formação futura da copa e o manejo do sombreamento. Contudo, a funcionalidade do componente arbóreo não pode ser inferida apenas pelo diâmetro do coleto ou do caule, pois depende também da altura, arquitetura da copa, densidade do dossel, arranjo espacial e manejo. Segundo Beer *et al.* (1998) e Somarriba *et al.* (2024), o desenvolvimento estrutural inicial das espécies arbóreas influencia diretamente a formação da copa, a estabilidade do dossel e o potencial de sombreamento em SAFs, afetando a dinâmica microclimática do sistema ao longo do tempo.

3.5.1.3 Diâmetro de copa das espécies arbóreas

Para o diâmetro de copa, observou-se incremento progressivo ao longo do período avaliado para todas as espécies, evidenciando expansão lateral das copas durante o desenvolvimento juvenil dos 10 aos 24 meses, com média de 1,38 e 3,58 m, respectivamente. As espécies não diferiram entre si aos 10, 15 e 24 meses após o plantio (Tabela 5).

Tabela 5 – Diâmetro médio da copa das espécies arbóreas em sistemas agroflorestais com cafeeiro, em diferentes meses após o plantio. Londrina, PR.

Espécie arbórea	Diâmetro da copa (m)					
	10 meses		15 meses		24 meses	
<i>Moringa oleífera</i>	1,58*	aB	2,62	aB	3,26	aA
<i>Croton floribundus</i>	1,17	aC	2,59	aB	3,90	aA
<i>Senna macranthera</i>	1,39	aB	1,92	aB	3,60	aA

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna comparam espécies dentro de cada tempo de avaliação; médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha comparam tempos de avaliação dentro de cada espécie. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.
Fonte: A autora (2026).

Segundo Beer *et al.* (1998), o desenvolvimento da copa constitui um atributo relevante para a funcionalidade de espécies arbóreas em SAFs, por estar relacionado à interceptação luminosa, às alterações microclimáticas e à competição interespecífica por luz. Contudo, nesse estudo, não foram observadas diferenças nos padrões de ocupação lateral do espaço pelas espécies avaliadas quanto ao diâmetro da copa.

Embora as espécies avaliadas apresentem características de arquitetura distintas descritas na literatura, como rápido crescimento em *M. oleífera* (Olson; Fahey, 2011; Bania *et al.*, 2023), copa ampla em *C. floribundus* (Carvalho, 2003; Lorenzi, 2014) e desenvolvimento progressivo em *S. macranthera* (Carvalho, 2014), essas diferenças não se refletiram em diferenças estatísticas no diâmetro da copa no período avaliado. Assim, os resultados indicam expansão lateral semelhante entre as espécies na fase juvenil, devendo-se evitar inferências sobre maior potencial de sombreamento sem avaliações complementares de densidade de copa, área foliar, fenologia e interceptação de radiação.

3.5.1.4 Estrutura dendrométrica do componente arbóreo

3.5.1.4.1 Altura total das espécies arbóreas

Para a altura total, verificou-se efeito significativo de espécie, sem efeito significativo de ano ou da interação entre espécie × ano (Tabela 6). Nos dois anos avaliados, *C. floribundus* apresentou as maiores médias de altura total, com 9,64 m, no 8º ano e 10,07 m, no 9º ano, diferindo de *M. oleífera* e *S. macranthera*, que não

diferiram entre si. *S. macranthera* apresentou alturas médias de 7,33 e 7,30 m, enquanto *M. oleifera* registrou 6,84 e 6,59 m, no 8º e 9º ano, respectivamente. Esses resultados indicam maior porte de *C. floribundus* em comparação às demais espécies, sugerindo maior capacidade de ocupação vertical do estrato superior do sistema ao longo do desenvolvimento do SAF.

Tabela 6 – Estrutura dendrométrica das espécies arbóreas no 8º e 9º ano após o plantio em sistema agroflorestal com cafeeiros. Londrina, PR.

Espécie arbórea	Altura total (m)		Altura de fuste (m)		Diâmetro de copa (m)		DAP (cm)		
	8º ano	9º ano	8º ano	9º ano	8º ano	9º ano	8º ano	9º ano	
<i>Moringa oleifera</i>	6,84*	bA 6,59	bA 2,80	bA 2,65	bA 4,76	bA 4,61	bA 19,12	bA 18,50	bA
<i>Croton floribundus</i>	9,64	aA 10,07	aA 4,18	aA 4,38	aA 6,66	aA 7,15	aA 25,92	aA 26,76	aA
<i>Senna macranthera</i>	7,33	bA 7,30	bA 3,95	aA 3,06	bB 4,69	bA 5,29	bA 18,52	bA 19,61	bA

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna comparam espécies dentro de cada tempo de avaliação; médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha comparam tempos de avaliação dentro de cada espécie. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Nota: DAP = diâmetro à altura do peito.

Fonte: A autora (2026).

3.5.1.4.2 Altura do fuste das espécies arbóreas

Para a altura do fuste, houve efeito significativo de espécie e da interação entre espécie $\times$ ano, evidenciando que a resposta temporal variou conforme a espécie (Tabela 6). No 8º ano após o plantio, *C. floribundus* e *S. macranthera* apresentaram as maiores alturas de fuste, com 4,18 e 3,95 m, respectivamente, enquanto *M. oleifera* apresentou a menor média (2,80 m). No 9º ano, *C. floribundus* manteve a maior altura de fuste, atingindo 4,38 m, enquanto *M. oleifera* e *S. macranthera* compuseram o grupo de menores médias, com 2,65 e 3,06 m, respectivamente. Entre os anos avaliados, *S. macranthera* apresentou redução da altura do fuste, o que pode estar associada à perda ou quebra de ramos, hipótese que deve ser interpretada com cautela, uma vez que esse fator não foi avaliado diretamente no estudo.

3.5.1.4.3 Diâmetro de copa das espécies arbóreas

O diâmetro de copa diferiu entre espécies, sem efeito de ano ou da interação entre espécie e tempo (Tabela 6). Em ambos os períodos avaliados, *C. floribundus* apresentou as maiores médias, com 6,66 m no 8º ano e 7,15 m no 9º ano, e foi superior a *M. oleifera* e *S. macranthera*, que não diferiram entre si. Essas espécies apresentaram valores de 4,76 e 4,69 m no 8º ano, e 4,61 e 5,29 m no 9º ano, respectivamente. Esses resultados indicam que *C. floribundus* apresentou maior porte e maior diâmetro de copa, sugerindo maior potencial de ocupação e maior capacidade potencial de interceptação luminosa no SAF.

3.5.1.4.4 Diâmetro à altura do peito das espécies arbóreas

Para o DAP, houve efeito significativo de espécie, sem efeito de ano ou da interação entre espécie $\times$ ano (Tabela 6). *C. floribundus* apresentou os maiores valores em ambos os anos avaliados, com 25,92 cm no 8º ano e 26,76 cm no 9º ano, diferindo das demais espécies. *M. oleifera* apresentou 19,12 e 18,50 cm, enquanto *S. macranthera* registrou 18,52 e 19,61 cm no 8º e 9º ano, respectivamente, sem diferença entre si. Esses resultados indicam maior diâmetro do caule em *C. floribundus*, coerente com seu maior porte geral, caracterizados pelas variáveis dendrométricas.

Segundo Somarriba *et al.* (2024), atributos do componente arbóreo, como densidade de indivíduos, área basal, cobertura de copa, altura das árvores, arquitetura e distribuição espacial, são variáveis relevantes para a caracterização do sombreamento em SAFs. Nesse contexto, os maiores valores dendrométricos observados em *C. floribundus* sugerem maior potencial de influência sobre a intensidade e a distribuição do sombreamento no sistema, com possíveis implicações sobre a regulação microclimática e o desempenho das culturas associadas.

3.5.1.5 Índices morfométricos e de arquitetura das espécies arbóreas

3.5.1.5.1 Comprimento da copa das espécies arbóreas

Para o comprimento de copa, observou-se efeito entre espécies, sem efeito entre ano de avaliação ou da interação entre espécie $\times$ ano (Tabela 7). *C. floribundus* apresentou os maiores valores em ambos os anos, com 5,46 m no 8º e 5,69 no 9º ano, diferindo de *M. oleífera* e *S. macranthera*, que apresentaram menores médias. *S. macranthera* apresentou aumento significativo desse índice, passando de 3,38 para 4,23 m, o que evidencia desenvolvimento do 8º para o 9º ano.

Tabela 7 – Índices morfométricos das espécies arbóreas no 8º e 9º ano, em sistema agroflorestal de cafeeiros. Londrina, PR.

Espécie arbórea	Comprimento de		Proporção de		Proporção de		Índice de		Relação copa/		Área basal													
	copa (m)		copa		fuste		esbeltez		altura		individual (m²)													
	8º ano	9º ano	8º ano	9º ano	8º ano	9º ano	8º ano	9º ano	8º ano	9º ano	8º ano	9º ano												
<i>Moringa oleifera</i>	4,05*	bA	3,94	bA	0,58	aA	0,59	aA	0,42	bA	0,41	aA	0,37	aA	0,37	aA	0,70	aA	0,70	aA	0,03	bA	0,03	bA
<i>Croton floribundus</i>	5,46	aA	5,69	aA	0,55	aA	0,54	aA	0,45	bA	0,46	aA	0,38	aA	0,38	aA	0,69	aA	0,74	aA	0,06	aA	0,06	aA
<i>Senna macranthera</i>	3,38	bA	4,23	bA	0,46	bB	0,57	aA	0,54	aA	0,43	aB	0,41	aA	0,39	aA	0,64	aA	0,72	aA	0,03	bA	0,03	bA

*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna comparam espécies dentro de cada tempo de avaliação; médias seguidas pela mesma letra maiúscula na linha comparam tempos de avaliação dentro de cada espécie. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Nota: Comprimento de copa = altura total – altura do fuste; proporção de copa = comprimento de copa / altura total; proporção de fuste = altura do fuste / altura total; índice de esbeltez = altura total / DAP; relação copa/altura = diâmetro de copa / altura total; área basal individual = $\pi \cdot \text{DAP}^2 / 40000$.

Fonte: A autora (2026).

3.5.1.5.2 Proporção da copa das espécies arbóreas

A proporção de copa apresentou efeito significativo de espécie, de ano e da interação entre espécie $\times$ ano (Tabela 7). No 8º ano, *S. macranthera* apresentou a menor proporção de copa (0,46), diferindo de *C. floribundus* (0,55) e *M. oleífera* (0,58). No 9º ano, porém, *S. macranthera* elevou esse valor para 0,57, deixando de diferir das demais espécies. Esse resultado indica aumento da proporção da altura total ocupada pela copa em *S. macranthera*, sugerindo alteração em sua conformação arquitetural no período avaliado.

3.5.1.5.3 Proporção do fuste das espécies arbóreas

A proporção de fuste apresentou padrão complementar ao da proporção de copa, com efeito significativo de espécie, de ano e da interação entre espécie $\times$ ano (Tabela 7). No 8º ano, *S. macranthera* apresentou a maior proporção de fuste (0,54), diferindo de *C. floribundus* (0,45) e *M. oleífera* (0,42). No 9º ano, esse valor foi reduzido para 0,43, aproximando-se das demais espécies e indicando menor participação relativa do fuste na altura total. Esses resultados sugerem alteração na conformação arquitetural de *S. macranthera* entre os anos avaliados, especialmente pela redistribuição relativa entre fuste e copa.

3.5.1.5.4 Índice de esbeltez das espécies arbóreas

Não houve efeito significativo de espécie, de ano ou da interação entre espécie $\times$ ano para o índice de esbeltez das espécies arbóreas avaliadas (Tabela 7). Esses resultados indicam que a relação entre altura e diâmetro se manteve semelhante entre as espécies ao longo do período analisado, sem evidências de alterações expressivas nesse índice.

3.5.1.5.5 Relação copa/altura das espécies arbóreas

A relação copa/altura apresentou efeito de ano, sem efeito de espécie ou de interação entre espécie $\times$ ano (Tabela 7). Apenas no 9º ano, houve aumento da relação copa/altura para a *S. macranthera*, que atingiu 0,72, diferindo de seu valor

anterior. Esse padrão reforça a interpretação de maior expansão lateral relativa da copa dessa espécie no 9º ano.

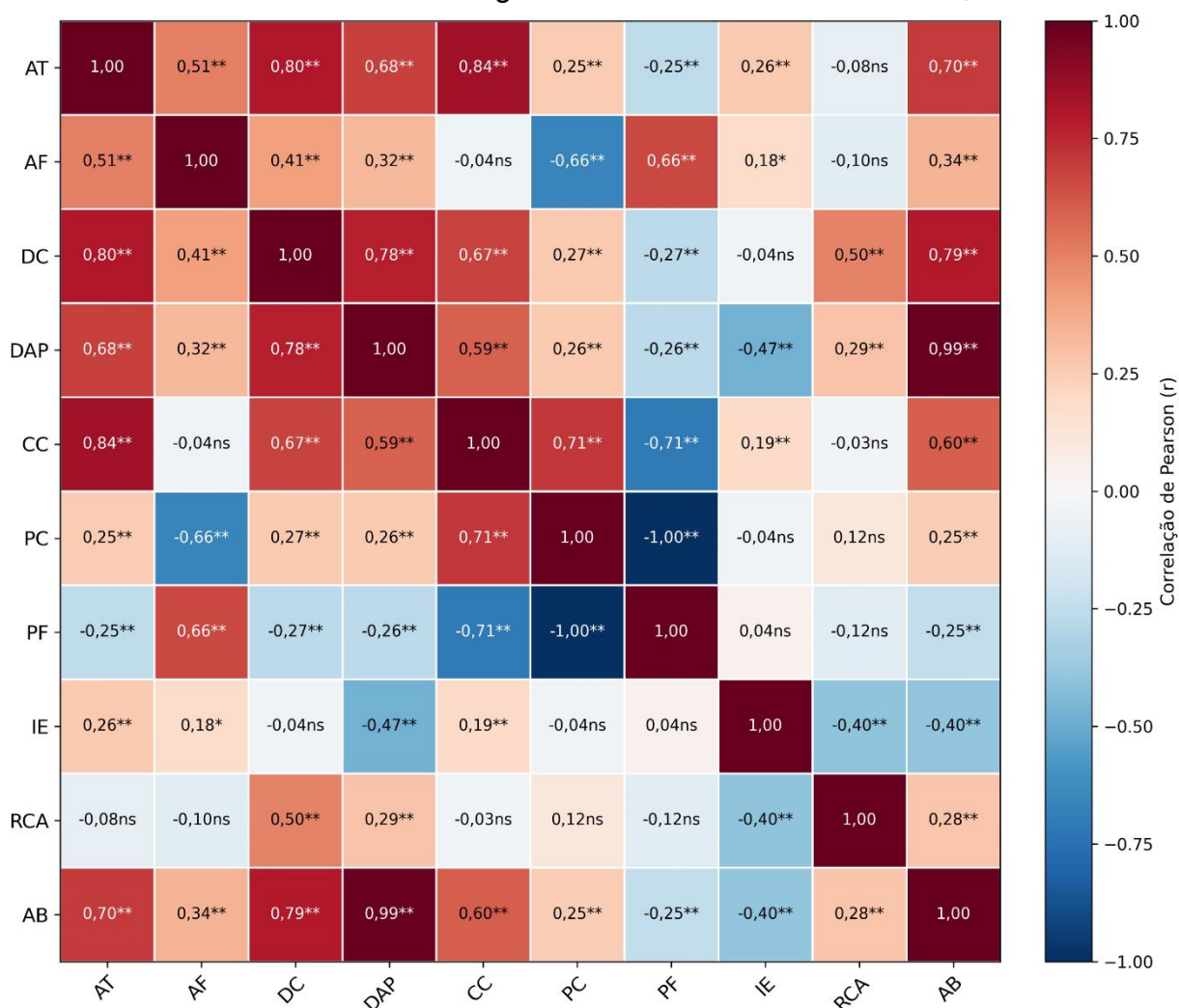
3.5.1.5.6 Área basal das espécies arbóreas

A área basal individual apresentou efeito significativo de espécie, sem efeito de ano ou da interação entre espécie $\times$ ano (Tabela 7). *C. floribundus* apresentou os maiores valores em ambos os anos, com 0,06 m² no 8º e 9º ano, diferindo das demais espécies. *M. oleífera* e *S. macranthera* apresentaram 0,03 e 0,03 m² em ambos os anos, sem diferença entre si. Esses resultados indicam maior área seccional do caule em *C. floribundus*, coerente com os maiores valores de DAP observados anteriormente.

3.5.1.6 Integração entre variáveis estruturais das espécies arbóreas

A análise de correlação entre as variáveis dendrométricas indicou associações positivas entre diferentes atributos morfológicos das espécies avaliadas, especialmente entre altura total, diâmetro de copa, DAP e área basal (Figura 5). A altura total apresentou correlação positiva com o diâmetro de copa ($r = 0,80$), comprimento de copa ($r = 0,84$), DAP ($r = 0,68$) e área basal individual ($r = 0,70$), indicando que indivíduos mais altos tenderam a apresentar maiores dimensões de copa e maior diâmetro do caule. Esse padrão sugere associação entre crescimento em altura, desenvolvimento da copa e incremento diamétrico, sem indicar necessariamente relação causal entre essas variáveis.

Figura 5 – Correlação de Pearson entre variáveis dendrométricas de espécies arbóreas em sistema agroflorestal de cafeeiros. Londrina, PR.



Nota: A escala cromática representa a direção e a magnitude das correlações, com valores positivos em tons avermelhados e negativos em tons azulados. AT = altura total; AF = altura do fuste; DC = diâmetro da copa; DAP = diâmetro à altura do peito; CC = comprimento da copa; PC = proporção de copa; PF = proporção de fuste; IE = índice de esbeltez; RCA = relação copa/altura; AB = área basal.

* significativo a 5% de probabilidade ($p \leq 0,05$);

** significativo a 1% de probabilidade ($p \leq 0,01$);

ns = não significativo.

Fonte: A autora (2026).

De forma semelhante, o diâmetro de copa apresentou associação positiva com o DAP ($r = 0,78$), com o comprimento de copa ($r = 0,67$) e com a área basal individual ($r = 0,79$), indicando que maiores valores de copa estiveram associados a maiores valores de DAP e área basal. A altura do fuste apresentou correlação moderada com a altura total ($r = 0,51$) e com o diâmetro de copa ($r = 0,41$), sugerindo que indivíduos de maior porte tenderam a apresentar maior altura do fuste. Em contrapartida, observou-se correlação negativa entre altura do fuste e proporção de copa ($r = -0,66$),

indicando que árvores com maior altura de fuste tenderam a apresentar menor participação relativa da copa na altura total.

O comprimento de copa apresentou forte correlação positiva com a proporção de copa ($r = 0,71$) e correlação negativa com a proporção de fuste ($r = -0,71$), refletindo a relação funcional entre o desenvolvimento da copa e a distribuição vertical da arquitetura arbórea. Da mesma forma, a correlação negativa perfeita entre proporção de copa e proporção de fuste ($r = -1,00$) decorre da dependência matemática entre essas variáveis, uma vez que ambas representam frações complementares da altura total da planta.

O índice de esbeltez apresentou correlação negativa moderada com o DAP ($r = -0,47$) e com a área basal individual ($r = -0,40$), indicando que indivíduos com maior incremento diamétrico tenderam a apresentar menor esbeltez relativa e, consequentemente, maior robustez estrutural. Esse resultado reforça que o incremento radial do caule contribuiu para a redução da relação altura/diâmetro e para maior estabilidade mecânica das árvores ao longo do desenvolvimento.

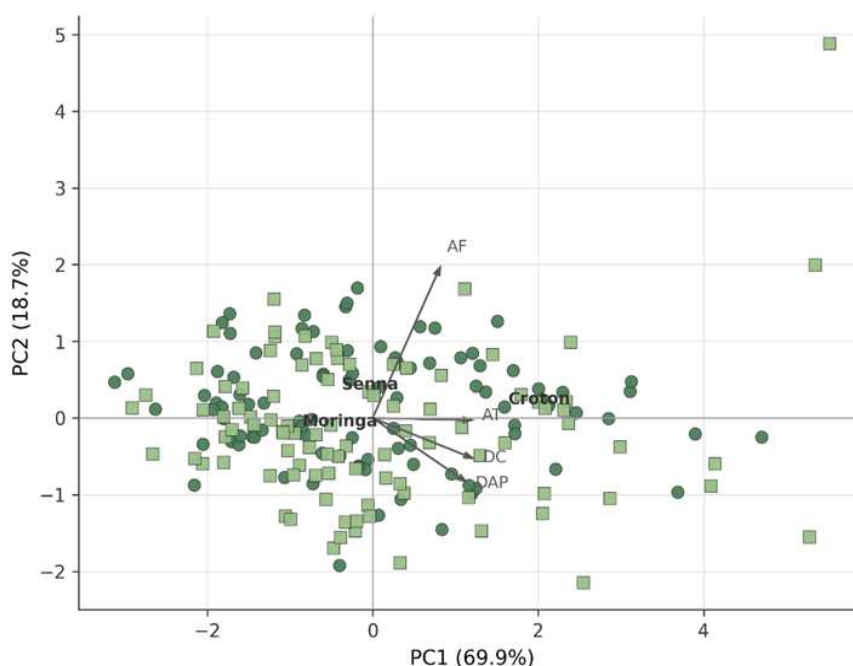
A relação copa/altura apresentou correlação positiva moderada com o diâmetro de copa ($r = 0,50$), sugerindo que indivíduos com copas mais largas tenderam a apresentar maior ocupação relativa da copa na arquitetura total da planta. Esse resultado indica associação entre expansão lateral do dossel e maior representatividade estrutural da copa na conformação da arquitetura arbórea.

Por fim, a área basal individual apresentou correlação extremamente alta com o DAP ($r = 0,99$), resultado esperado em razão da dependência matemática entre ambas as variáveis, confirmando a consistência interna das medições dendrométricas e reforçando a coerência estrutural do conjunto de dados obtido.

3.5.1.7 Implicações ecológicas e funcionais para os sistemas agroflorestais com cafeeiros

A análise de componentes principais (PCA) foi empregada como síntese multivariada da estrutura arbórea das espécies avaliadas. Os dois primeiros componentes principais explicaram conjuntamente 88,6% da variação total dos dados, sendo 69,9% representados pelo primeiro componente (PC1) e 18,7% pelo segundo componente (PC2), indicando elevada capacidade de síntese do modelo para representar a variação estrutural observada entre os indivíduos arbóreos (Figura 6).

Figura 6 – Ordenação multivariada da análise de componentes principais (PCA) de variáveis dendrométricas das espécies arbóreas em sistema agroflorestal de cafeeiros. Londrina, PR.



Nota: O biplot apresenta as observações nos dois primeiros componentes principais e os vetores das variáveis dendrométricas. PC1 e PC2 explicam 69,9% e 18,7% da variância total, respectivamente. AT = altura total; AF = altura do fuste; DC = diâmetro da copa; DAP = diâmetro à altura do peito.

Fonte: A autora (2026).

O primeiro componente principal representou predominantemente um gradiente de porte arbóreo e desenvolvimento estrutural geral, estando positivamente associado à altura total, ao diâmetro de copa e ao DAP. Esse eixo evidencia que grande parte da variação estrutural entre os indivíduos esteve relacionada ao crescimento integrado entre altura, expansão lateral da copa e incremento diamétrico, refletindo diferenças no vigor vegetativo e no porte geral das espécies.

O segundo componente principal esteve principalmente associado à altura do fuste, indicando que parte da variação residual da estrutura arbórea decorreu de diferenças na compartimentalização vertical da arquitetura das plantas, especialmente relacionadas ao alongamento do tronco livre antes da inserção da copa.

A distribuição dos indivíduos no espaço multivariado demonstrou tendência de segregação estrutural entre as espécies avaliadas. Os indivíduos de *C. floribundus* concentraram-se preferencialmente na porção positiva do PC1, indicando associação com maiores valores de altura total, DAP e diâmetro de copa, corroborando os resultados univariados que evidenciaram maior porte estrutural da espécie em fases

mais avançadas de desenvolvimento.

Por outro lado, os indivíduos de *M. oleifera* tenderam a agrupar-se em regiões intermediárias a negativas do PC1, refletindo porte estrutural intermediário no conjunto das variáveis analisadas. Já *S. macranthera* apresentou maior dispersão ao longo do PC2, sugerindo maior contribuição relativa da altura do fuste na caracterização arquitetural da espécie e maior variabilidade na compartimentalização vertical de sua estrutura aérea.

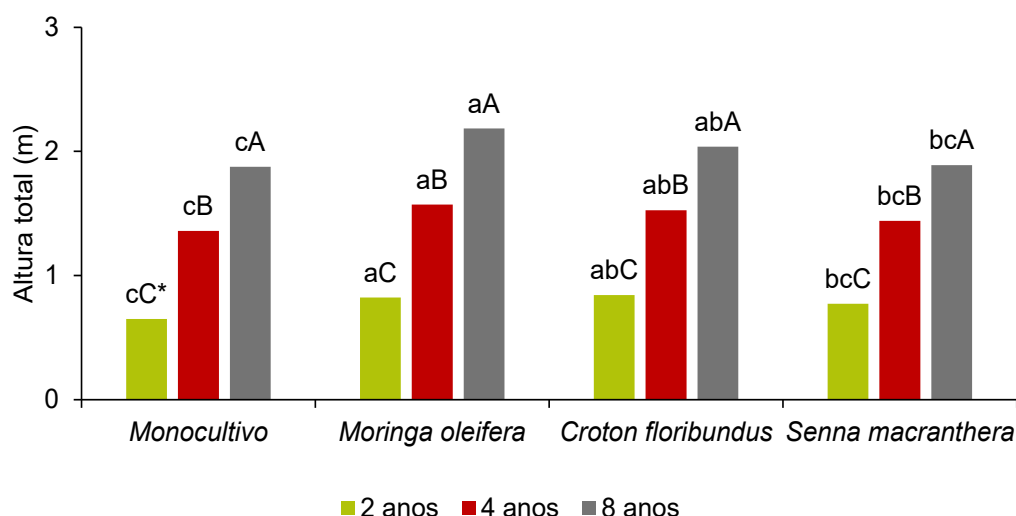
De forma geral, a PCA confirmou os padrões observados nas análises univariadas e nos índices morfométricos, evidenciando que as diferenças estruturais entre as espécies decorreram principalmente de variações no porte geral e na arquitetura vertical das plantas. Esses resultados reforçam que as espécies avaliadas apresentam estratégias arquitetônicas distintas de desenvolvimento, com implicações diretas sobre a formação do dossel e o potencial de alteração das condições microclimáticas em SAFs cafeeiros.

3.5.2 Desenvolvimento das Plantas de Cafeeiro

3.5.2.1 Altura total das plantas de cafeeiro

A altura total das plantas de cafeeiro variou em função do sistema de cultivo no 2º, 4º e 8º ano após o plantio (Figura 7). Em todos os períodos avaliados, observaram-se diferenças entre os tratamentos, com os SAFs apresentando, de modo geral, maiores alturas de plantas em comparação ao monocultivo. No 2º ano, o SAF com *M. oleifera* apresentou a maior média de altura, diferindo do monocultivo, enquanto os SAFs com *C. floribundus* e *S. macranthera* apresentaram valores intermediários. No 4º ano, os cafeeiros conduzidos com *M. oleifera* e *C. floribundus* apresentaram as maiores médias, enquanto no 8º ano o SAF com *M. oleifera* manteve a maior altura média, com os demais SAFs em posição intermediária e o monocultivo apresentando os menores valores em todas as avaliações.

Figura 7 – Altura total dos cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais no 2º, 4º e 8º ano após o plantio. Londrina, PR.



*Letras minúsculas indicam comparação entre os sistemas dentro de cada ano de avaliação; letras maiúsculas indicam comparação entre anos de avaliação dentro de um mesmo sistema. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV = 9,38%.

Fonte: A autora (2026).

O maior crescimento em altura observado nos cafeeiros em SAFs, especialmente com *M. oleifera*, pode ser parcialmente explicado pelas alterações microclimáticas promovidas pelo componente arbóreo sobre o ambiente de cultivo. De modo geral, os sistemas arborizados apresentaram modificações nas variáveis térmicas e a umidade relativa do ar em relação ao monocultivo, evidenciando a capacidade das árvores em alterar o microclima do cafeeiro (Figuras 8–11).

Campanha *et al.* (2004), ao avaliarem cafeeiros em SAF, observaram que o sombreamento promovido por espécies arbóreas reduziu a incidência direta de radiação solar e modificou o regime térmico do ambiente, promovendo alterações no crescimento vegetativo do cafeeiro. Segundo os autores, essas mudanças microclimáticas podem favorecer o desenvolvimento vegetativo em situações nas quais o sombreamento ocorre em intensidade moderada.

No presente estudo, o SAF com *M. oleifera*, que promoveu os maiores valores de altura dos cafeeiros, apresentou também temperaturas máximas mais elevadas em diversos períodos avaliados, alcançando 41,0 °C em setembro e dezembro do 8º ano e 34,9 °C em julho do 9º ano, além das maiores amplitudes térmicas entre os tratamentos em praticamente todas as épocas avaliadas. Esses resultados indicam que, SAF com *M. oleifera* proporcionou sombreamento menos intenso e menor

tamponamento térmico em comparação aos demais SAFs, provavelmente em função de sua arquitetura de copa mais aberta e menor densidade foliar.

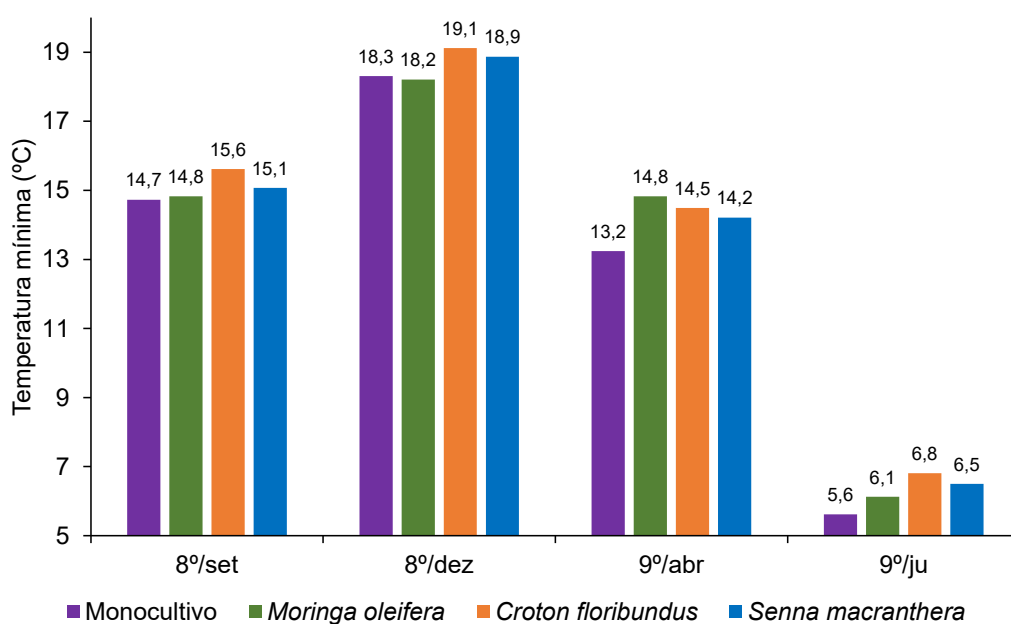
Segundo Bote e Vos (2017), o cafeeiro apresenta elevada plasticidade morfofisiológica em resposta às condições de luminosidade, podendo intensificar o crescimento vegetativo e o alongamento dos entrenós em ambientes de sombreamento parcial, como mecanismo adaptativo para otimização da captura de luz. Assim, o melhor desempenho em altura observado no SAF com *M. oleifera* sugere que o nível de sombreamento promovido por essa espécie pode ter estabelecido condição intermediária entre proteção microclimática e manutenção de irradiância suficiente para estimular o crescimento vegetativo do cafeeiro.

Em contraste, os SAFs com *C. floribundus* e *S. macranthera*, embora também tenham promovido maior crescimento em altura em relação ao monocultivo, apresentaram temperaturas máximas e amplitudes térmicas geralmente inferiores às observadas no SAF com *M. oleifera*, indicando maior capacidade de atenuação térmica do ambiente. Esse comportamento sugere que essas espécies proporcionaram sombreamento mais intenso, o que pode ter reduzido parcialmente o estímulo ao alongamento vegetativo em comparação ao SAF com *M. oleifera*.

Adicionalmente, os SAFs apresentaram, de modo geral, maior umidade relativa do ar em comparação ao monocultivo, especialmente no SAF com *M. oleifera*, o qual registrou os maiores valores em praticamente todas as avaliações. Segundo Campanha *et al.* (2004), o aumento da umidade relativa em sistemas arborizados contribui para redução da demanda evaporativa atmosférica, favorecendo o balanço hídrico da cultura e potencializando o crescimento vegetativo em condições de restrição hídrica ou elevada demanda atmosférica.

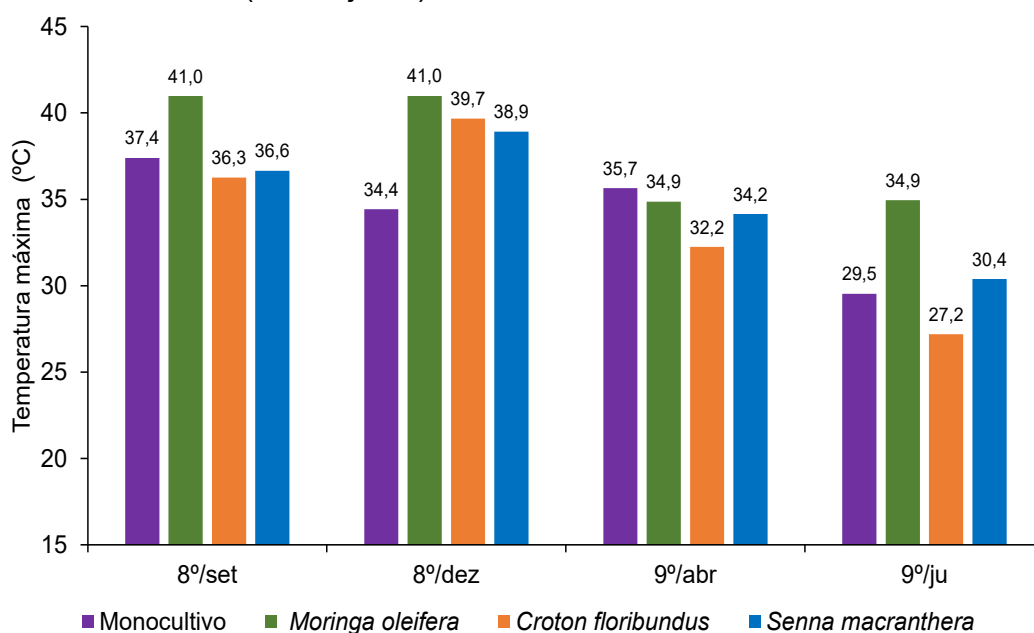
Dessa forma, os resultados indicam que o maior crescimento em altura dos cafeeiros nos SAFs decorreu da interação entre sombreamento, atenuação térmica e alterações na umidade do ar, sendo que o SAF com *M. oleifera* parece ter proporcionado o balanço microclimático mais favorável ao crescimento vegetativo vertical do cafeeiro dentre os sistemas avaliados.

Figura 8 – Temperatura mínima do ar a 1,5 m de altura em cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais, no 8º ano após o plantio (setembro e dezembro) e no 9º ano (abril e julho). Londrina, PR.



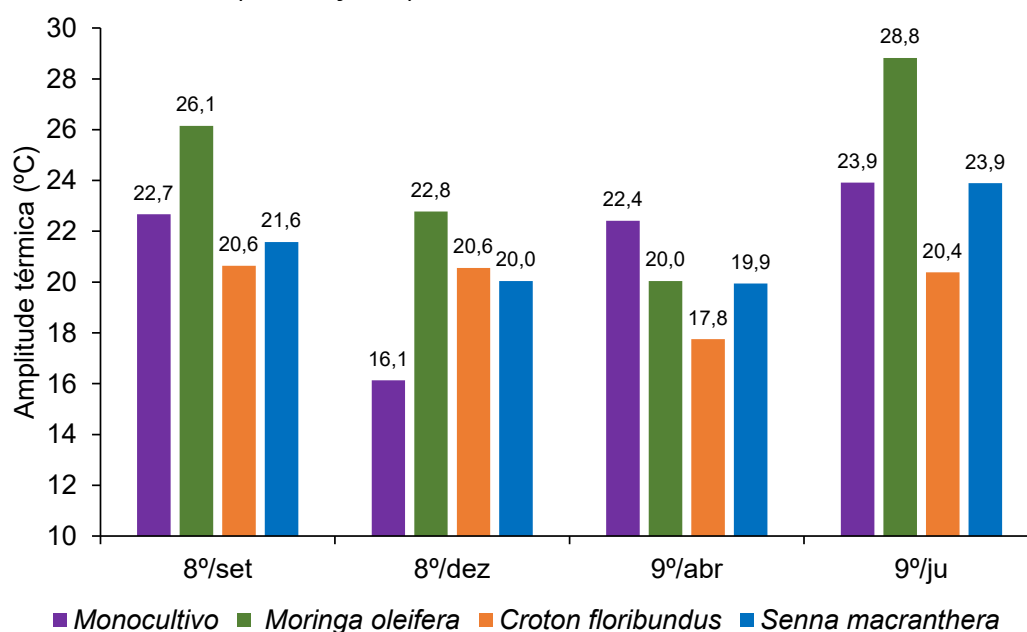
Fonte: A autora (2026).

Figura 9 – Temperatura máxima do ar a 1,5 m de altura em cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais no 8º ano após o plantio (setembro e dezembro) e no 9º ano (abril e julho). Londrina, PR.



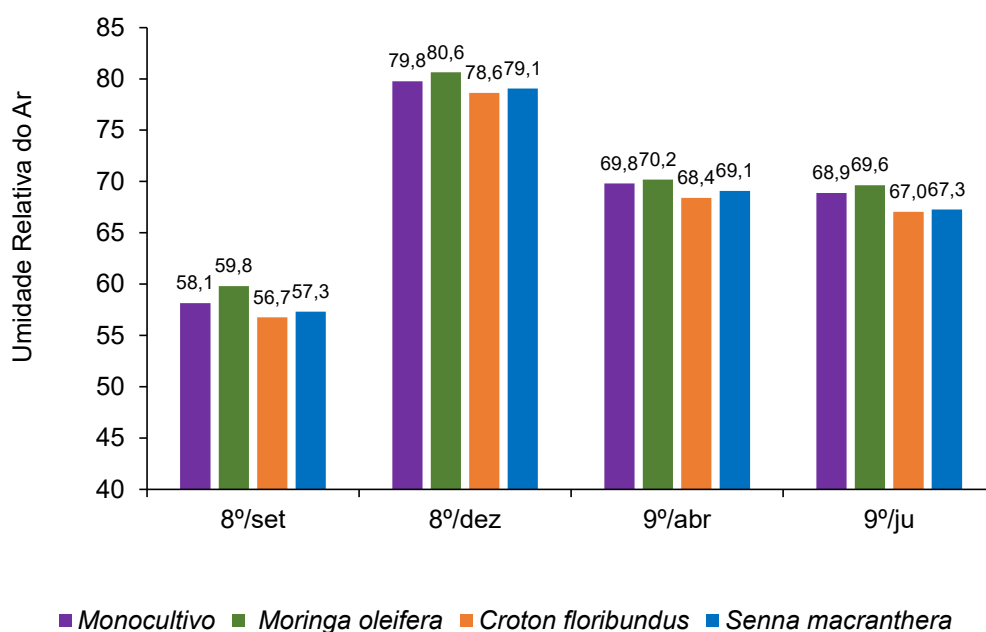
Fonte: A autora (2026).

Figura 10 – Amplitude térmica do ar a 1,5 m de altura em cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais no 8º ano após o plantio (setembro e dezembro) e no 9º ano (abril e julho). Londrina, PR.



Fonte: A autora (2026).

Figura 11 – Umidade relativa do ar a 2 m de altura em cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais no 8º ano após o plantio (setembro e dezembro) e no 9º ano (abril e julho). Londrina, PR.



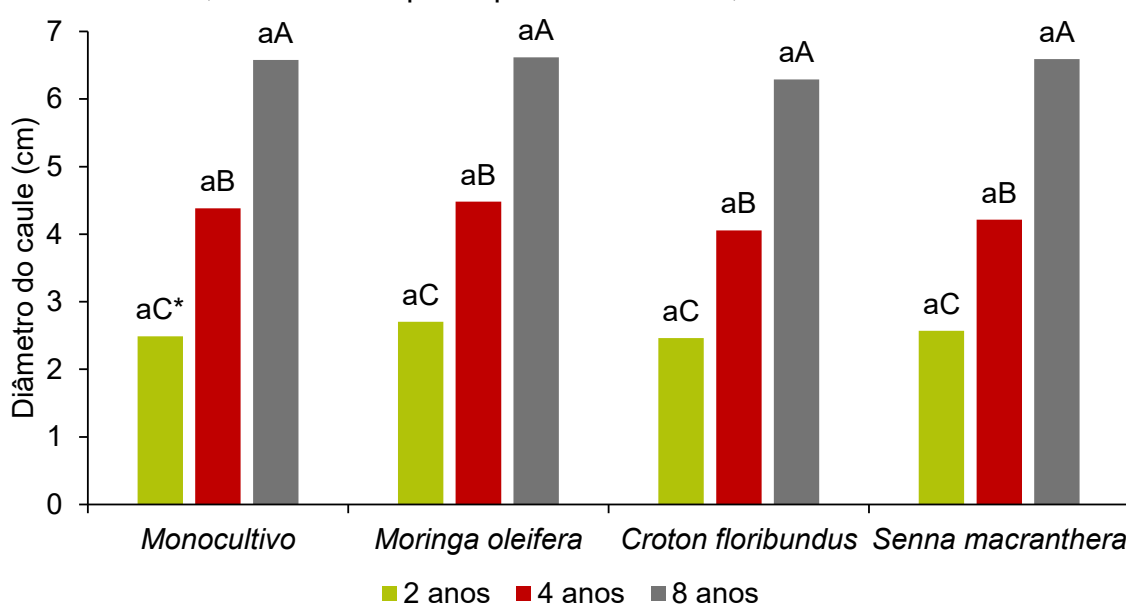
Fonte: A autora (2026).

3.5.2.2 Diâmetro do caule das plantas de cafeeiro

Não houve diferença do diâmetro do caule do cafeeiro entre os sistemas de

cultivo no 2º, 4º e 8º ano após o plantio, porém houve diferenças entre os anos, (Figura 12). No 2º ano, os menores valores foram registrados em todos os sistemas, compatíveis com a fase inicial de desenvolvimento vegetativo. No 4º ano, verificou-se aumento expressivo em relação ao 2º ano, novamente sem diferenças entre sistemas, indicando crescimento uniforme. No 8º ano, os maiores valores foram obtidos, diferindo dos anos anteriores e evidenciando o efeito do tempo de cultivo e da maturidade das plantas sobre o espessamento do caule.

Figura 12 – Diâmetro do caule dos cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais no 2º, 4º e 8º ano após o plantio. Londrina, PR.



*Letras minúsculas indicam comparação entre os sistemas dentro de cada ano de avaliação; letras maiúsculas indicam comparação entre anos de avaliação dentro de um mesmo sistema. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV = 7,77%.

Fonte: A autora (2026).

O fato de não terem sido observadas diferenças no diâmetro do caule entre os sistemas de cultivo ao longo dos anos avaliados indica que, embora o componente arbóreo tenha influenciado o crescimento em altura do cafeeiro, esse efeito não se refletiu no incremento radial do caule. Esse resultado sugere que o espessamento caulinar apresentou menor sensibilidade às alterações microclimáticas promovidas pelos SAFs quando comparado ao crescimento longitudinal da planta.

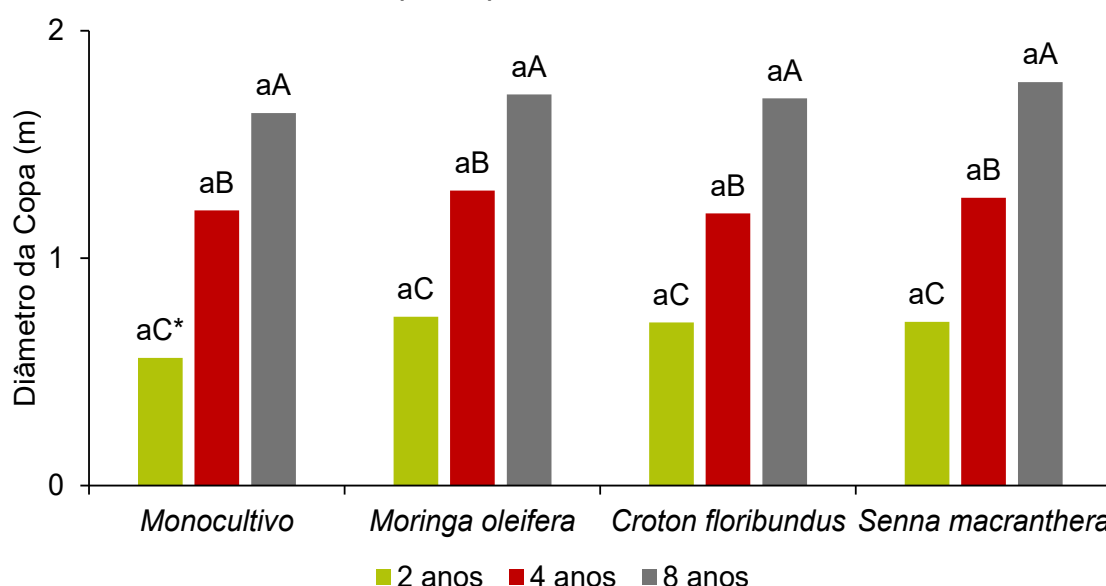
As diferenças observadas no desenvolvimento das plantas entre os anos avaliados refletem o crescimento natural da cultura e o avanço de seu estágio fenológico. Segundo Zaidan *et al.* (2022), o aumento de desempenho observado ao

longo do tempo é "coerente com a idade dos cafeeiros", evidenciando que plantas jovens seguem padrões de investimento intenso em crescimento vegetativo.

3.5.2.3 Diâmetro da copa das plantas de cafeeiro

Não houve diferença no diâmetro de copa do cafeeiro entre os sistemas de cultivo no 2º, 4º e 8º ano após o plantio, porém observaram-se diferenças significativas entre os anos avaliados (Figura 13). Esse resultado indica que, nas condições do presente estudo, a expansão lateral da copa foi regulada predominantemente pelo fator temporal e pelo desenvolvimento ontogenético das plantas, refletindo o crescimento natural da cultura ao longo de seu ciclo vegetativo (Peña *et al.*, 2024).

Figura 13 – Diâmetro da copa dos cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais no 2º, 4º e 8º ano após o plantio. Londrina, PR.



*Letras minúsculas indicam comparação entre os sistemas dentro de cada ano de avaliação; letras maiúsculas indicam comparação entre anos de avaliação dentro de um mesmo sistema. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV = 11,01%.

Fonte: A autora (2026).

Entretanto, a literatura demonstra que essa variável pode responder ao sombreamento em determinadas condições de cultivo. Ricci, Costa e Oliveira, (2011), em estudo de longa duração conduzido sob manejo orgânico com cafeeiros arborizados por bananeira (*Musa sp.*) e *Erythrina verna* Vell., observaram aumento significativo no diâmetro de copa das plantas sombreadas em relação ao cultivo a pleno sol, com médias de 1,56 m e 1,48 m, respectivamente. Segundo os autores,

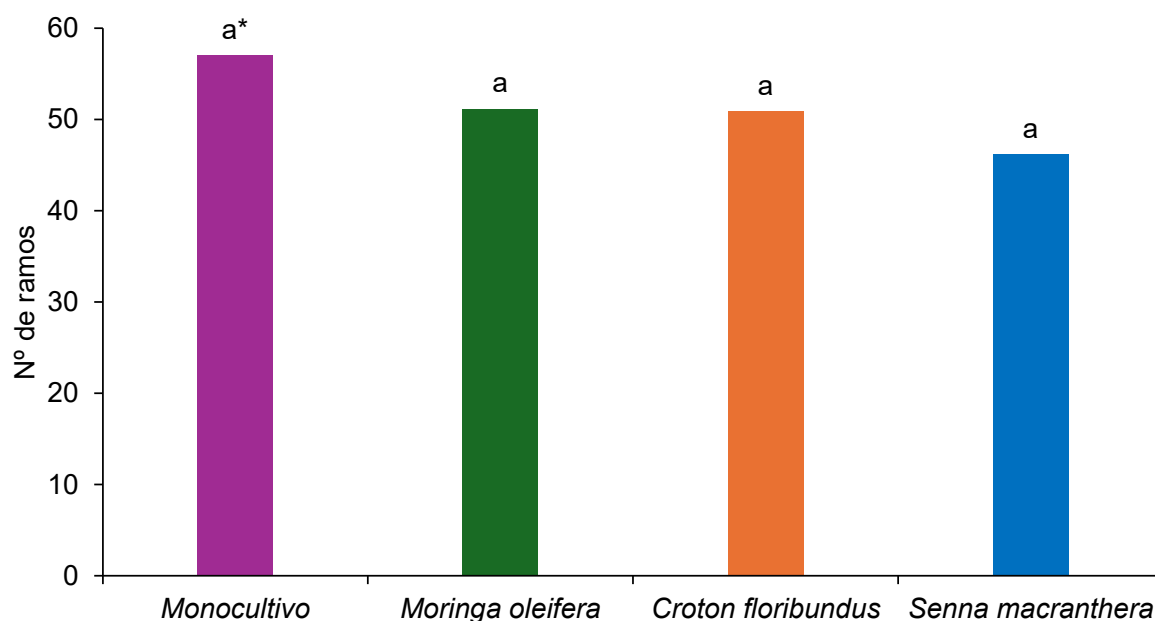
esse incremento lateral da copa está associado à plasticidade fenotípica do cafeeiro frente às alterações no ambiente luminoso, permitindo ajustes morfológicos na arquitetura vegetativa em resposta ao sombreamento.

Assim, a ausência de diferença entre os sistemas no presente estudo sugere que, embora o cafeeiro possua capacidade de ajuste arquitetural da copa sob condições de sombra, os níveis de sombreamento promovidos pelos sistemas agroflorestais avaliados não foram suficientes para alterar significativamente a expansão lateral da copa quando comparados ao monocultivo.

3.5.2.4 Número de ramos plagiotrópicos das plantas de cafeeiro

O número de ramos plagiotrópicos por planta no 8º ano após o plantio não diferiu entre os sistemas de cultivo avaliados (Figura 14), indicando que a arborização adotada nos SAFs não alterou a emissão e manutenção de ramos laterais produtivos do cafeeiro em comparação ao monocultivo. Esse resultado sugere que os níveis de sombreamento promovidos pelos SAFs avaliados não foram suficientes para restringir o desenvolvimento da arquitetura produtiva lateral das plantas.

Figura 14 – Número de ramos dos cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais no 8º ano após o plantio. Londrina, PR.



*Letras minúsculas indicam comparação entre os sistemas. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV = 10,02%.

Fonte: A autora (2026).

Esse comportamento contrasta com os resultados obtidos por Moraes *et al.* (2006), que verificaram, em cafeeiros sombreados com guandu, menor emissão de ramos plagiotrópicos, menor número de nós por ramo e menor número de nós com frutos, com reflexos negativos sobre a produção. Segundo os autores, embora o sombreamento tenha promovido melhorias microclimáticas, como redução da radiação incidente, atenuação das temperaturas máximas e maior umidade do solo, o excesso de sombra comprometeu o crescimento de estruturas produtivas e reduziu o rendimento do cafeeiro.

Por outro lado, Ricci, Cochetto Junior e Almeida (2013) observaram aumento no número de ramos plagiotrópicos em cafeeiros arborizados com *Gliricidia sepium*, além de maior altura, maior distância entre rosetas e maior área foliar em relação ao cultivo a pleno sol. Os autores atribuíram esse comportamento às modificações microclimáticas promovidas pela arborização, especialmente à redução da amplitude térmica e das temperaturas do solo e do filoplano, sem alteração da fenologia do cafeeiro.

Dessa forma, a comparação entre os estudos indica que a resposta do cafeeiro ao sombreamento não é linear, mas depende da intensidade da sombra, da espécie utilizada na arborização e do manejo do componente arbóreo. No presente estudo, a

ausência de diferença no número de ramos plagiotrópicos sugere que os SAFs avaliados proporcionaram condição intermediária, capaz de modificar parcialmente o microclima, mas sem induzir alterações expressivas na ramificação lateral do cafeeiro.

4 CONCLUSÃO

Os SAFs podem favorecer o crescimento em altura do cafeeiro em comparação ao monocultivo, sem alterar o número de ramos plagiotrópicos, o diâmetro do caule e o diâmetro de copa, sugerindo que a arborização pode modificar o padrão de crescimento vegetativo sem comprometer o desenvolvimento estrutural da cultura.

Os SAFs também podem promover maior estabilidade microclimática, com redução da amplitude térmica e maior constância da umidade relativa do ar. Entre as espécies arbóreas avaliadas, *M. oleifera* apresentou potencial para proporcionar sombreamento mais precoce em função de seu rápido crescimento inicial, enquanto *C. floribundus* tende a contribuir em fases mais avançadas de desenvolvimento. *S. macranthera* apresentou comportamento intermediário de crescimento e contribuição para a estabilidade microclimática.

Dessa forma, os SAFs mostram-se alternativa promissora ao monocultivo, com potencial para conciliar benefícios microclimáticos e adequado desempenho fitotécnico do cafeeiro.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, M. F. *et al.* Desempenho fisiológico de *Coffea arabica* cultivado em diferentes sombreamentos no semiárido brasileiro. **Diversitas Journal**, Santana Do Ipanema, v. 10, n. 1, 2025. DOI: <https://doi.org/10.48017/dj.v10i1.3032>.
- ARAUJO, W. L. *et al.* Limitations to photosynthesis in coffee leaves from different canopy positions. **Plant Physiology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 46, n. 10, p. 884-890, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2008.05.005>.
- AUGUSTO, D. C. C. *et al.* Utilização de esgotos domésticos tratados através de um sistema biológico na produção de mudas de *Croton floribundus* Spreng. (capixingui) e *Copaifera langsdorffii* Desf. (copaíba). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 3, p. 335-342, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000300009>.
- BANIA, J. K. *et al.* Integrating *Moringa oleifera* and *Moringa stenopetala* in agroforestry for adaptation and mitigation of climate change in Asia and Africa. In: DAGAR, J.C., GUPTA, S.R., SILESHI, G.W. (ed.). **Agroforestry for sustainable intensification of agriculture in Asia and Africa**. Singapore: Springer, 2023. p. 719-737. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-4602-8_22.
- BEER, J. *et al.* Shade management in coffee and cacao plantations. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 38, p. 139-164, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1005956528316>.
- BOTE, A. D.; VOS, J. Tree management and environmental conditions affect coffee (*Coffea arabica* L.) bean quality. **NJAS-Wageningen Journal of Life Sciences**, Wageningen, v. 83, p. 39-46, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.njas.2017.09.002>.
- CAMPANHA, M. M. *et al.* Growth and yield of coffee plants in agroforestry and monoculture systems in Minas Gerais, Brazil. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 63, p. 75-82, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000049435.22512.2d>.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2003. v. 1. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/305634>. Acesso em: 8 abr. 2026.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. v. 2. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/305634>. Acesso em: 8 abr. 2026.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Colombo: Embrapa Florestas, 2014. v. 5.
- CRAPARO, A. C. W. *et al.* *Coffea arabica* yields decline in Tanzania due to climate change: global implications. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 207, p. 1-10, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2015.03.005>.
- DAVIS, A. P. *et al.* The impact of climate change on indigenous arabica coffee

(*Coffea arabica*): predicting future trends and identifying priorities. **PLOS ONE**, San Francisco, v. 7, n. 11, p. 1-13, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0047981>.

GRÜTER, R. *et al.* Expected global suitability of coffee, cashew and avocado due to climate change. **PLOS ONE**, San Francisco, v. 17, n. 1, p. 1-24, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0261976>.

IDR-PARANÁ. **Atlas climático do Estado do Paraná**: normal climatológica de temperatura e precipitação. Londrina: IDR-Paraná.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras**: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 3. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora Ltda, 2014. 352p.

MEYLAN, L. *et al.* Combining a typology and a conceptual model of cropping system to explore the diversity of relationships between ecosystem services: the case of erosion control in coffee-based agroforestry systems in Costa Rica. **Agricultural Systems**, Amsterdam, v. 118, p. 52-64, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2013.02.002>.

MONTEITH, J. L.; ONG, C. K.; CORLETT, J. E. Microclimatic interactions in agroforestry systems. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 45, n. 1-4, p. 31-44, 1991. DOI: [https://doi.org/10.1016/0378-1127\(91\)90204-9](https://doi.org/10.1016/0378-1127(91)90204-9).

MORAIS, H. *et al.* Microclimatic characterization and productivity of coffee plants grown under shade of pigeon pea in Southern Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 5, p. 763-770, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000500007>.

MUÑOZ-VILLERS, L. E. *et al.* Coffee and shade trees show complementary use of soil water in a traditional agroforestry ecosystem. **Hydrology and Earth System Sciences**, Katlenburg-Lindau, v. 24, n. 4, p. 1649-1668, 2020. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-24-1649-2020>.

MUSCHLER, R. G. Shade improves coffee quality in a sub-optimal coffee-zone of Costa Rica. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 51, n. 2, p. 131-139, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1023/A:1010603320653>.

OLSON, M. E.; FAHEY, J. W. *Moringa oleifera*: a multipurpose tree for the dry tropics. **Revista Mexicana de Biodiversidad**, Ciudad de México, v. 82, n. 4, p. 1071-1082, 2011. Disponível em: <https://www.scielo.org.mx/pdf/rmbiodiv/v82n4/v82n4a1.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2026.

OVALLE-RIVERA, O. *et al.* Projected shifts in *Coffea arabica* suitability among major global producing regions due to climate change. **PLOS ONE**, San Francisco, v. 10, n. 4, p. 1-13, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124155>.

PALADA, M. C. The role of *Moringa oleifera* in agro-ecosystems: a review. *In*: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON MORINGA, 2., 2021. **Anais** [...]. Leuven: International Society for Horticultural Science, 2021. p. 83-98. DOI: <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2021.1306.11>.

- PATIL, S. *et al.* Mitigating climate risks in coffee production through agroforestry: global evidence from a systematic review and meta-analysis. **Frontiers in Climate**, Lausanne, v. 7, p. 1-18, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3389/fclim.2025.1699037>.
- PEÑA, V. H. M. *et al.* Growth and productivity of *Coffea arabica* var. Esperanza L4A5 in different agroforestry systems in the Caribbean region of Costa Rica. **Agriculture**, Basel, v. 14, n. 10, p. 1-27, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriculture14101723>.
- POLTRONIERI, P.; ROSSI, F. Challenges in specialty coffee processing and quality assurance. **Challenges journal of planetary health**, Basel, v. 7, n. 2, p. 1-19, 2016. DOI: <https://doi.org/10.3390/challe7020019>.
- POMPELLI, M. F. *et al.* Leaf anatomy, ultrastructure and plasticity of *Coffea arabica* L. in response to light and nitrogen availability. **Biotemas**, Florianópolis, v. 25, n. 4, p. 13-28, 2012. DOI: <https://doi.org/10.5007/2175-7925.2012v25n4p13>.
- REBÊLO, A. G. D. M. *et al.* Estoque de nutrientes e decomposição da serapilheira em sistemas agroflorestais no município de Belterra-Pará. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, p. 1876-1893, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509846854>.
- RIBEIRO, C. A. *et al.* Anatomical plasticity of secondary xylem in *Coffea arabica* L. (Rubiaceae) under different management practices for improved water use efficiency. **Trees Structure and Function**, Heidelberg, v. 40, n. 1, p. 1-15, 2026. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00468-025-02695-x>.
- RICCI, M. S. F.; COCHETO JUNIOR, D. G.; ALMEIDA, F. F. D. Condições microclimáticas, fenologia e morfologia externa de cafeeiros em sistemas arborizados e a pleno sol. **Coffee Science**, Lavras, v. 11, n. 1, p. 1-12, 2013. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/7992>. Acesso em: 8 abr. 2026.
- RICCI, M. S. F.; COSTA, J. R.; OLIVEIRA, N. G. Utilização de componentes principais para analisar o comportamento do cafeeiro a pleno sol e sombreado. **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 44-54, 2011. Disponível em: <https://sbicafe.ufv.br/server/api/core/bitstreams/a56bc360-5900-4995-a430-b3c6eb3b2b9c/content>. Acesso em: 8 abr. 2026.
- SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2026.
- SOMARRIBA, E. *et al.* Shade canopy density variables in cocoa and coffee agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 98, n. 3, p. 585-601, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-023-00931-2>.
- TATAGIBA, S. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; REIS, E. F. Crescimento vegetativo de mudas de café arábica (*Coffea arabica* L.) submetidas a diferentes níveis de sombreamento. **Coffee Science**, Lavras, v. 5, n. 3, p. 251-261, 2010. Disponível em: <https://coffeescience.ufla.br/index.php/Coffeescience/article/view/131> Acesso em: 9 abr. 2026.

ZAIDAN, Ú. R. *et al.* Productivity and grain size of coffee grown in different weed management systems. **Acta Scientiarum. Agronomy**, Maringá, v. 44, p. 1-12, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.55692>.

5 ARTIGO B - MATURAÇÃO DOS FRUTOS DE CAFÉ E INCIDÊNCIA DA BROCA DO CAFÉ (*Hypothenemus hampei*) EM CAFEEIROS CONDUZIDOS EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS

5.1 RESUMO

Este estudo avaliou a influência do monocultivo e de sistemas agroflorestais (SFAs) com *Moringa oleifera*, *Croton floribundus* e *Senna macranthera* sobre a maturação de frutos de *Coffea arabica* L. e a dinâmica de broca do café (*Hypothenemus hampei*), durante cinco ciclos agrícolas (2017–2021) em Londrina, PR. O experimento foi conduzido em delineamento de blocos casualizados com quatro tratamentos e quatro repetições, avaliando-se a distribuição de frutos nos estádios de maturação (verde, verde-cana, cereja, passa e seco) e a incidência de *H. hampei* em cada estágio. Os dados climáticos (temperatura máxima, mínima e média; precipitação; umidade relativa) foram obtidos junto ao Instituto de Desenvolvimento Rural do Paraná. Os dados foram submetidos à análise de variância, e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). A incidência de *H. hampei* variou entre anos, sistemas de cultivo e estádios de maturação, com maior ocorrência em frutos em estádios avançados, especialmente frutos secos. A variabilidade climática entre os ciclos agrícolas esteve associada às diferenças na infestação, com maior incidência nos anos de temperaturas médias mais elevadas. Entre os sistemas agroflorestais, o consórcio com *S. macranthera* apresentou maior infestação em frutos secos, enquanto os sistemas com *C. floribundus* e *M. oleifera* apresentaram respostas intermediárias. Os resultados indicam que a incidência da broca-do-café em sistemas agroflorestais depende da interação entre condições climáticas, estágio de maturação dos frutos e espécie arbórea consorciada. O manejo da broca nesses sistemas deve considerar a escolha da espécie arbórea e a realização criteriosa da colheita e do repasse, especialmente para reduzir a permanência de frutos secos no campo.

Palavras-chave: *coffea arabica* L., microclima, arborização, fenologia.

5.2 ABSTRACT

This study evaluated the influence of monoculture and agroforestry systems (AFS) with

Moringa oleifera, *Croton floribundus*, and *Senna macranthera* on the fruit ripening of *Coffea arabica* L. and the dynamics of the coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) during five agricultural cycles (2017–2021) in Londrina, PR. The experiment was conducted in a randomized block design with four treatments and four replications, evaluating the distribution of fruits in the ripening stages (green, green-cane, cherry, raisin, and dry) and the incidence of *H. hampei* in each stage. Climatic data (maximum, minimum, and average temperature; precipitation; relative humidity) were obtained from the Paraná Rural Development Institute. The data were subjected to analysis of variance, and the means were compared using Tukey's test ($p < 0.05$). The incidence of *H. hampei* varied between years, cultivation systems, and maturation stages, with a higher occurrence in fruits at advanced stages, especially dry fruits. Climatic variability between agricultural cycles was associated with differences in infestation, with a higher incidence in years with higher average temperatures. Among the agroforestry systems, the intercropping with *S. macranthera* showed the highest infestation in dry fruits, while the systems with *C. floribundus* and *M. oleifera* showed intermediate responses. The results indicate that the incidence of the coffee berry borer in agroforestry systems depends on the interaction between climatic conditions, fruit maturation stage, and intercropped tree species. Management of the borer in these systems should consider the choice of tree species and the careful execution of harvesting and re-harvesting, especially to reduce the amount of dry fruits remaining in the field.

Key words: *coffea arabica* L., microclimate, shading, phenology.

5.3 INTRODUÇÃO

A cafeicultura brasileira, líder mundial em produção e exportação, enfrenta desafios relacionados à obtenção de grãos de alta qualidade, atributo diretamente associado à adequada maturação dos frutos e à baixa incidência de defeitos, entre os quais se destacam aqueles causados pela broca do café (*Hypothenemus hampei*) (Botelho *et al.*, 2021). A uniformidade dos estádios de maturação é considerada determinante para o desenvolvimento de compostos precursores da qualidade da bebida, enquanto a presença de grãos brocados compromete o perfil físico-sensorial e reduz o valor comercial do lote (Aristizábal *et al.*, 2017; Teodoro, 2008). Assim, maturação e infestação configuram fatores centrais na definição do padrão qualitativo

do café.

A maturação dos frutos é um processo fisiológico sensível às condições ambientais, especialmente à temperatura, luminosidade e disponibilidade hídrica, fatores que regulam a velocidade de desenvolvimento e a formação de metabólitos relacionados à qualidade (Cassamo *et al.*, 2022). Evidências indicam que variações nesses fatores podem alterar a uniformidade da maturação, influenciando tanto a composição química quanto a proporção de frutos em diferentes estádios no momento da colheita (Cassamo *et al.*, 2022; Aristizábal *et al.*, 2017).

Nesse contexto, os sistemas agroflorestais (SAFs) têm sido estudados como alternativa de manejo capaz de modificar as condições ambientais no interior da lavoura. A presença de árvores interfere na incidência de radiação solar e na dinâmica térmica do ambiente, podendo influenciar o desenvolvimento fisiológico do cafeeiro (Cassamo *et al.*, 2022; Zaro *et al.*, 2023). Estudos sugerem que tais alterações podem repercutir na distribuição dos frutos entre os diferentes estádios de maturação (Ricci; Costa; Oliveira., 2011; Vaast *et al.*, 2006), embora esses efeitos dependam do arranjo arbóreo, da intensidade de sombreamento e das condições edafoclimáticas locais (Cassamo *et al.*, 2023; Ricci *et al.*, 2006).

A broca do café, por sua vez, apresenta relação direta com os estádios de maturação dos frutos e com as condições térmicas do ambiente. A praga demonstra preferência por frutos em fases mais avançadas de maturação, que oferecem condições favoráveis para oviposição e desenvolvimento larval. Segundo Aristizábal *et al.* (2023), embora a colonização inicial possa ocorrer em fases anteriores do desenvolvimento dos frutos, a reprodução efetiva ocorre quando o endosperma atinge maturidade fisiológica adequada, geralmente entre 120 e 150 dias após o florescimento. Além disso, a temperatura exerce influência sobre o ciclo biológico da broca, afetando a velocidade de desenvolvimento e o número de gerações anuais (Hamilton *et al.*, 2019). Dessa forma, modificações ambientais associadas aos sistemas de cultivo podem alterar tanto a disponibilidade de frutos suscetíveis quanto a dinâmica populacional da praga (Aristizábal *et al.*, 2017; Jaramillo *et al.*, 2009).

Embora estudos tenham demonstrado que alterações microclimáticas podem influenciar a maturação dos frutos (Cassamo *et al.*, 2022; Zaro *et al.*, 2023) e que a temperatura exerce papel determinante no ciclo biológico da broca do café (Aristizábal *et al.*, 2017; Hamilton *et al.*, 2019), essas abordagens têm sido conduzidas de forma isolada. Ainda são limitadas as investigações que integrem simultaneamente a

distribuição dos frutos nos diferentes estádios de maturação e a incidência da broca sob distintos SAFs, especialmente considerando a influência de espécies arbóreas específicas ao longo de múltiplas safras. Permanecem pouco esclarecidas as possíveis variações associadas às espécies utilizadas no consórcio e a interação entre maturação e infestação em ambientes arborizados.

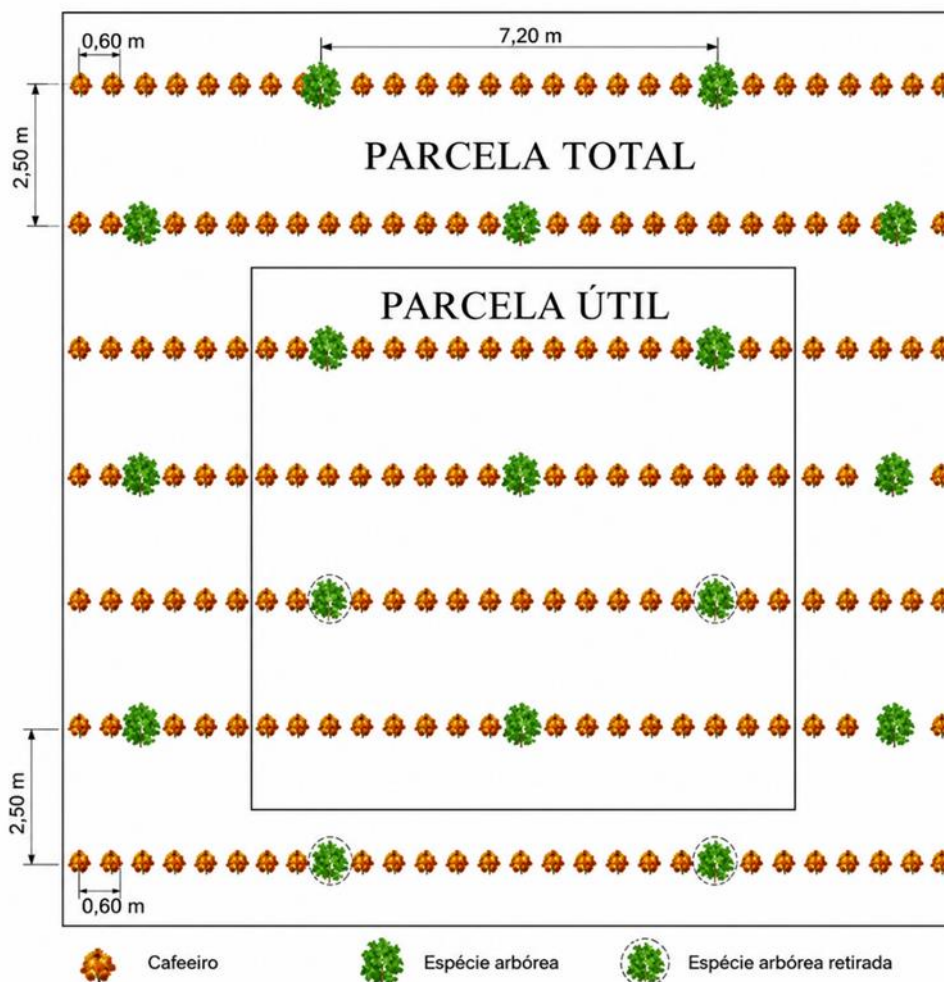
O objetivo deste trabalho foi avaliar como diferentes sistemas de cultivo, monocultivo e SAFs arborizados com *Moringa oleifera*, *Croton floribundus* e *Senna macranthera*, influenciam a maturação dos frutos e a incidência da broca do café ao longo de cinco safras (2017–2021), em Londrina, PR.

5.4 MATERIAL E MÉTODOS

As avaliações foram feitas em um experimento instalado em Londrina, Paraná, Brasil (23°21'27.8"S e 51°09'33.5"W, 574 m), com clima típico Cfa, subtropical úmido, com verão quente, segundo a classificação de Köppen. A temperatura média anual é 21,1°C, a média do mês mais quente é de 23,9°C (janeiro) e a do mês mais frio é 16,9°C (julho). A média histórica (1976 a 2019) do acumulado de chuva anual é de 1.632,0 mm, sendo janeiro o mês mais chuvoso, e agosto o menos chuvoso (IDR-Paraná). O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico (Santos *et al.*, 2018).

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso, com quatro tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram: testemunha (cafeeiro em monocultivo), cafeeiro arborizado com *Moringa oleifera*, com *Croton floribundus* e com *Senna macranthera*. Cada repetição foi composta por uma parcela total de 19,80 m x 22,50 m, sendo a parcela útil de 10,00 m x 10,20 m no centro (Figura 15).

Figura 15 – Esquema de distribuição espacial dos cafeeiros e espécies arbóreas na parcela experimental total e na parcela útil em sistemas agroflorestais.



Nota: Os símbolos alaranjados indicam cafeeiros, os símbolos verdes indicam espécies arbóreas e os símbolos verdes destacados com um círculo indicam árvores retiradas da parcela 41 meses após a implantação.

Fonte: A autora (2026).

A cultivar de café utilizada foi a IPR 98 e no sistema em monocultivo, o espaçamento utilizado foi de 0,60 x 2,50 m, com 6.666 plantas por hectare. Nos SAFs, o espaçamento dos cafeeiros e as arbóreas foram dispostas em quincôncio ao longo das linhas de café, com uma árvore a cada intervalo de 11 plantas de cafeeiro, substituindo uma delas, totalizando 555 árvores e 6.111 cafeeiros por hectare. Três anos e cinco meses após o plantio foram feitos desbastes, removendo-se 40% das árvores, resultando em 333 árvores por hectare.

5.4.1 Avaliação da Maturação dos Frutos de Café e Incidência de *Hypothenemus hampei*

A avaliação da maturação dos frutos e da incidência de insetos nos frutos foi realizada logo após a colheita. Após a derriça total e homogeneização dos frutos provenientes de cada parcela útil, coletou-se uma amostra de 300 g, composta por duas subamostras homogeneizadas. Os frutos foram classificados manualmente nos estádios de maturação: verde, verde-cana, cereja, passa e seco, sendo determinado o percentual relativo ao total da amostra em cada estágio.

Na sequência, procedeu-se à quantificação dos frutos brocados por *H. hampei* em cada estágio de maturação, permitindo avaliar simultaneamente a distribuição dos frutos nos diferentes estádios de maturação e a incidência da praga.

5.4.2 Temperatura, Umidade Relativa do Ar e Precipitação Pluviométrica

Para a caracterização climática, foram analisados dados meteorológicos diários de temperatura máxima, mínima e média do ar, umidade relativa e precipitação, registrados na estação meteorológica do SIMEPAR, localizada na Fazenda Experimental do IDR-Paraná, em Londrina, PR, no período de 2017 a 2021. Esses dados foram comparados à média climatológica do período de 1976–2026 (IDR-Paraná).

5.4.3 Análises Estatísticas

Após a coleta, os dados foram submetidos às análises de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade das variâncias (Levene), ambas ao nível de $p > 0,05$, para atender os pressupostos da análise de variância (ANOVA). Quando esses pressupostos da ANOVA não eram atendidos, realizou-se a transformação de dados utilizando o método de raiz quadrada. Após esses pressupostos atendidos, os dados foram submetidos a ANOVA e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), por meio do software R, interface RStudio (Ferreira, 2014).

5.5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.5.1 Resultados de Maturação dos Frutos de Café e Incidência da Broca do Café

Os resultados do resumo da análise de variância - ANOVA (Tabela 8) demonstraram que para os efeitos isolados de ano agrícola (A), que compreende o período de 2017 a 2021, houve efeito significativo para todas as variáveis analisadas, enquanto para o efeito de espécie arbórea (E), somente as variáveis maturação verde-cana, maturação passa e brocados verdes não apresentaram efeito significativo. Já na interação entre esses fatores, as variáveis de frutos brocados (verde, verde-cana, cereja e passa) obtiveram efeito significativo, indicando que o ano agrícola interferiu na população desses insetos.

Tabela 8 – Resumo da análise de variância para os estádios de maturação de frutos e incidência da broca do café em cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais, de 2017 a 2021. Londrina, PR.

Fonte de Variação	¹ Maturação Verde	¹ Maturação Verde-Cana	Maturação Cereja	Maturação Passa	¹ Maturação Seco	¹ Brocado Verde	¹ Brocado Verde-Cana	¹ Brocado Cereja	¹ Brocado Passa	¹ Brocado Seco
Bloco	2,01 ^{ns}	0,05 ^{ns}	44,88 ^{ns}	29,69 ^{ns}	1,39 ^{ns}	0,88 ^{ns}	0,97 ^{ns}	1,57 ^{ns}	0,59 ^{ns}	0,07 ^{ns}
Espécie Arbórea (E)	2,04*	0,85 ^{ns}	219,45**	9,28 ^{ns}	4,62*	2,53 ^{ns}	3,58*	4,99**	5,66**	12,44**
Ano (A)	18,51**	6,46**	1995,31**	675,95*	20,51**	91,68**	122,97**	116,52**	109,93**	99,39**
E x A	0,71 ^{ns}	0,40 ^{ns}	52,76 ^{ns}	15,74 ^{ns}	1,27 ^{ns}	2,24*	1,92**	2,48**	3,01**	3,21 ^{ns}
Resíduo	0,52	0,41	43,48	48,39	0,89	1,03	0,69	0,8	1,04	1,97
CV%	20,16	17,04	37,83	36,64	16,33	37,41	27,61	26,9	28,28	32,01
Média Original	13,87	14,47	17,43	18,99	35,14	12,69	15,68	17,67	19,54	26,04

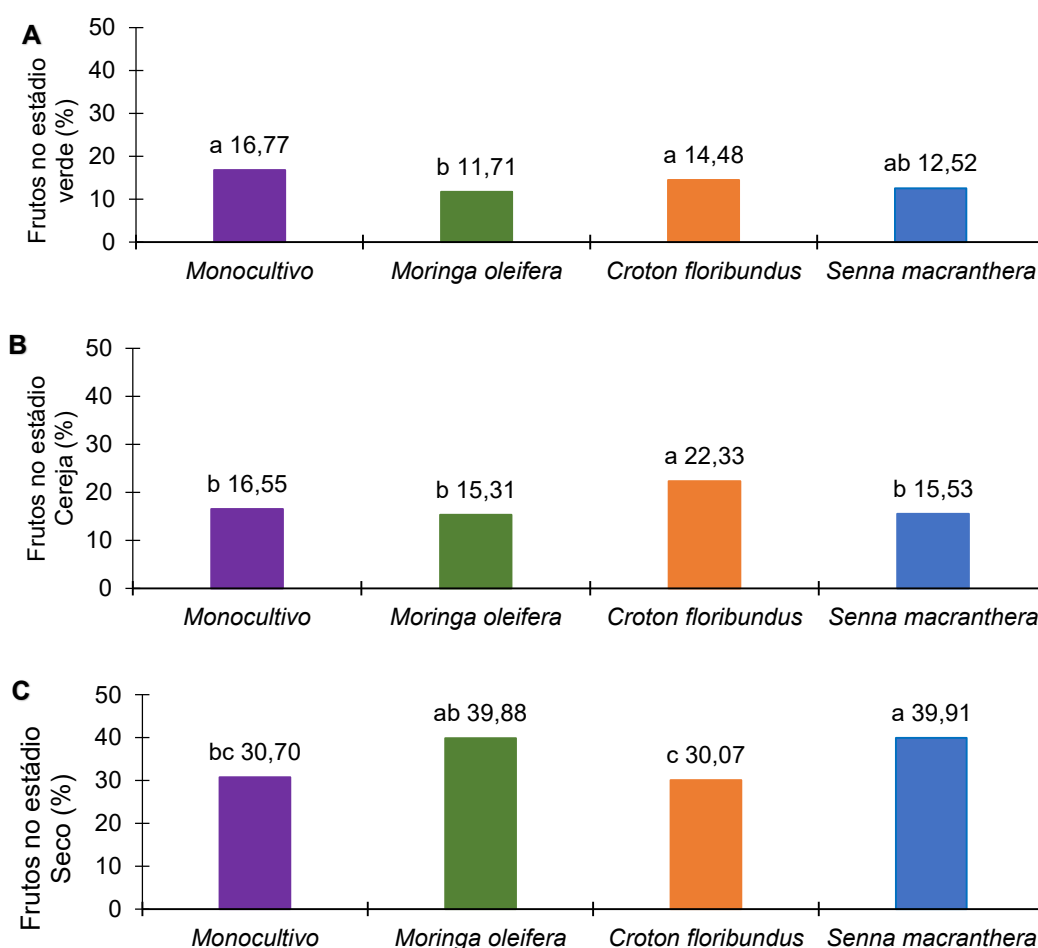
* e **: indicam respectivamente: efeito significativo pelo teste F aos níveis de 5 e 1%, enquanto ns, indica efeito não significativo.

¹: dados transformados por $\sqrt{x}$.

Fonte: A autora (2026).

Considerando os efeitos isolados dos diferentes estádios de maturação dos frutos de café em relação aos sistemas de cultivo (Figura 16), é possível observar que no sistema de monocultivo e o SAF com *C. floribundus* apresentaram maiores porcentagens de frutos verdes (Figura 16A). Para os frutos cereja (Figura 16B), considerado o estágio ideal de colheita do fruto para uma bebida de melhor qualidade, no SAF com *C. floribundus* permitiu maior porcentagem de frutos, bem como apresentou menores valores de frutos secos (Figura 16C), indicando que esse sistema entre os avaliados, pode ser considerado ideal para colher frutos de melhor qualidade.

Figura 16 – Porcentagem de frutos nos estádios de maturação verde (A), cereja (B) e seco (C) em função da espécie arbórea, em cafeeiros conduzidos em monocultivo e sistemas agroflorestais, de 2017 e 2021. Londrina, PR.



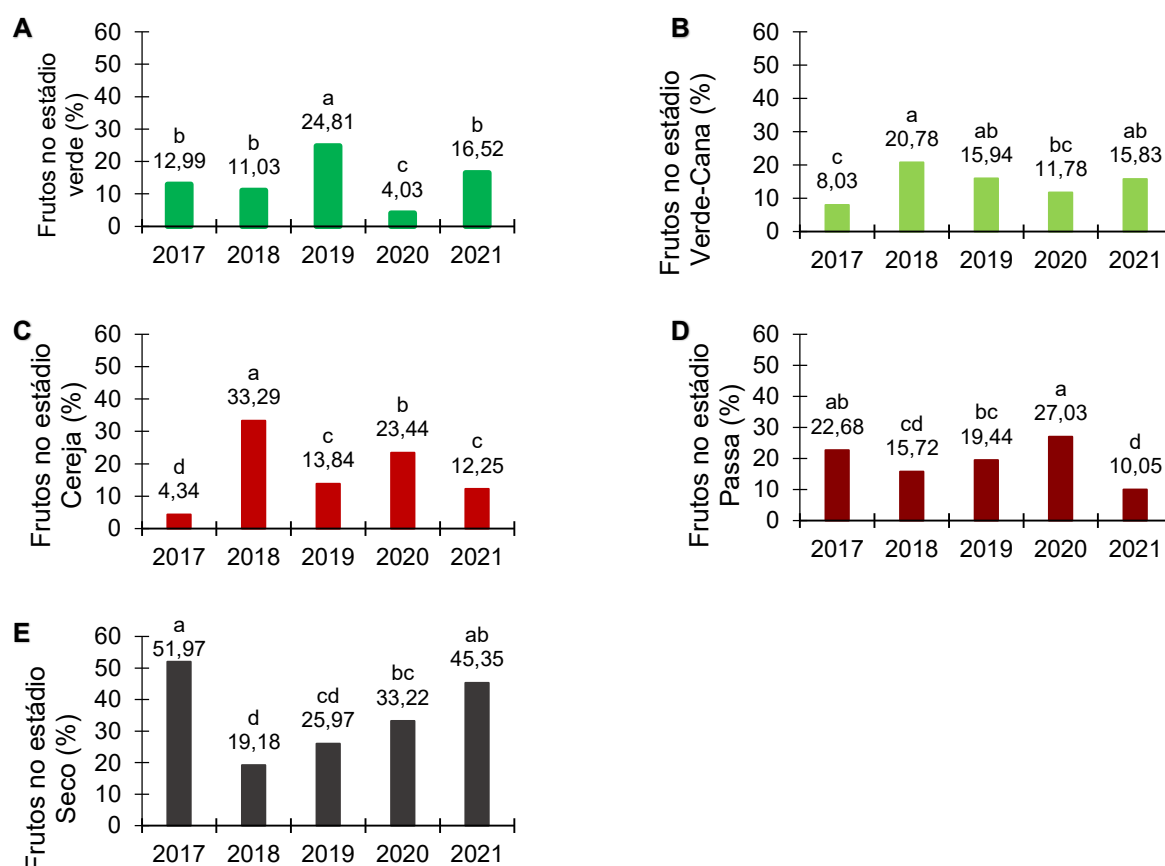
*Letras minúsculas indicam comparação entre os sistemas. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV = para (A) 20,16%; (B) 37,83%; (C) 16,33%.

Fonte: A autora (2026).

Para os efeitos isolados dos diferentes anos agrícolas sob os estádios de

maturação dos frutos de café, considerando a média dos sistemas de cultivo foi possível observar que o maior número de frutos ainda verdes ocorreu em 2019 (Figura 17A), frutos no estágio verde-cana não obtiveram diferença entre 2018, 2019 e 2021 (Figura 17B), enquanto no estágio cereja, houve destaque para ao ano de 2018, com mais de 33% dos frutos (Figura 17C) e neste mesmo ano, houve menores valores de frutos nos estádios passa e seco (Figuras 17D e 17E), sendo um indicativo de um ano favorável aos frutos de melhor qualidade.

Figura 17 – Porcentagem de frutos nos estádios de maturação verde (A), verde-cana (B), cereja (C), passa (D) e seco (E) em função do ano agrícola, em cafeeiros conduzidos em monocultivo e sistemas agroflorestais, de 2017 e 2021. Londrina, PR.



*Letras minúsculas indicam comparação entre anos. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV% = A) 20,16; B) 17,04; C) 37,83; D) 36,64; E) 16,33.

Fonte: A autora (2026).

Quando observados os frutos quanto a estarem ou não brocados, e considerando os efeitos de interação entre os fatores avaliados, observou-se que para os frutos brocados verdes (Figura 18A) em todas as espécies o ano de 2021 foi o que

apresentou os maiores valores de frutos brocados. Na média geral, entre todos os tratamentos nos anos de 2017 até 2021 foi de 3,45% de frutos brocados, enquanto em 2021 o menor valor encontrado foi de 33,43% para a espécie *C. floribundus*.

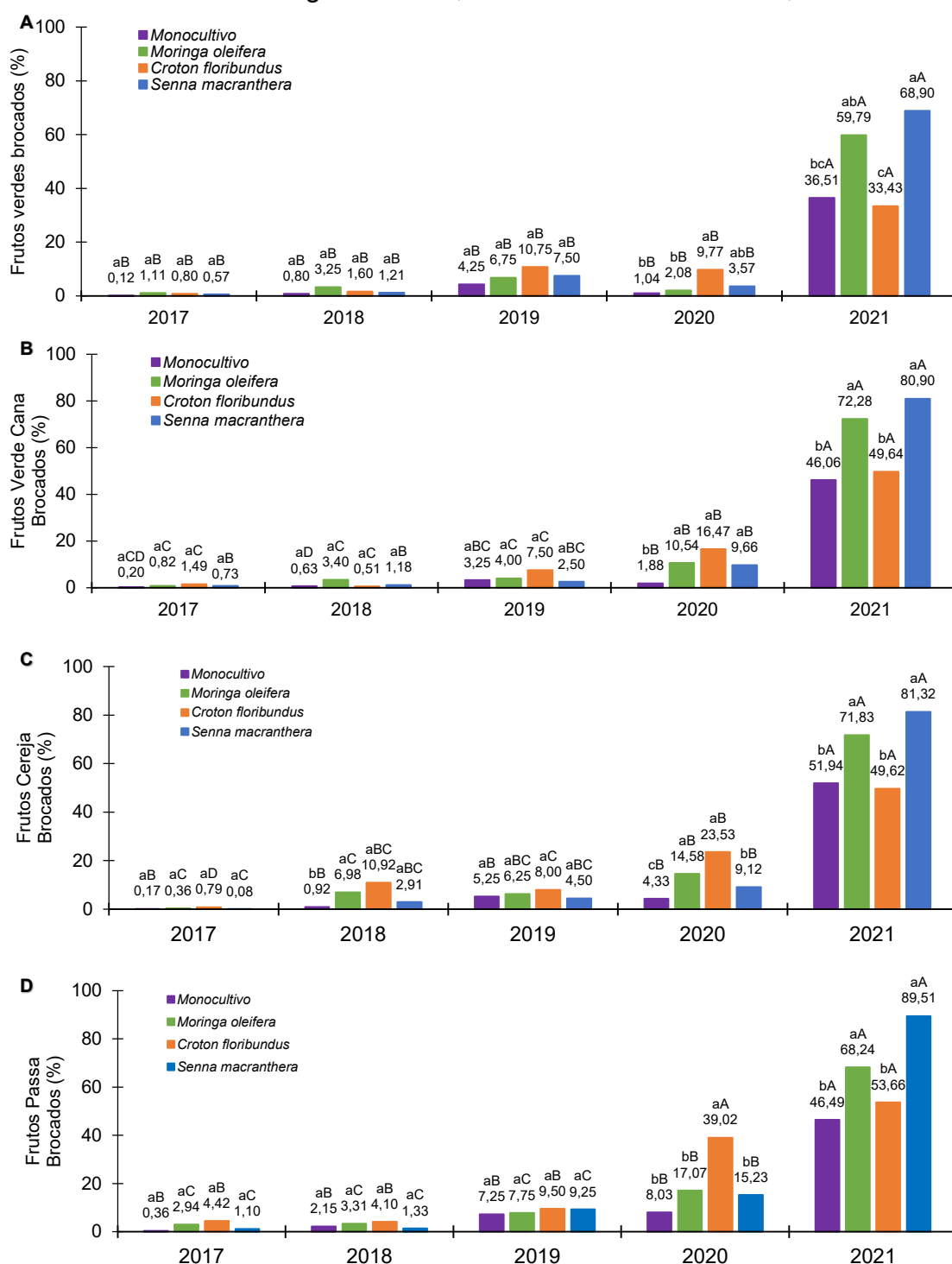
Esses resultados indicam que o ano de 2021 foi extremamente favorável para os insetos se desenvolverem. Ainda nessa imagem, comparando os anos, até 2019 não houve diferença entre as espécies arbóreas, mas em 2020 e 2021 *S. macranthera* permitiu maiores valores de frutos verdes brocados.

Para frutos brocados no estágio verde-cana (Figura 18B), o comportamento é semelhante ao observado para frutos verdes, e destacando os tratamentos *C. floribundus* e monocultivo com menores valores de % em 2021, indicando que embora o ano agrícola estivesse favorável ao desenvolvimento desse inseto, esses sistemas reduziram sua incidência.

De modo contrário, quando observados os frutos brocados no estágio cereja (Figura 18C), embora ainda ocorra maiores porcentagens em 2021, é possível observar um aumento significativo de frutos brocados, em mais de 45% comparados os anos 2020 e 2021 para as espécies, com exceção de *C. floribundus*, que o aumento foi somente de 26,09%, indicando mais uma vez que esse SAF reduz o número de frutos brocados.

Entretanto, ao observar os frutos passa brocados (Figura 18D) a espécie *C. floribundus* em 2020 apresentou as maiores porcentagens, mas em 2021 ela se igualou ao monocultivo, ou seja, mesmo frutos considerados ruins para uma bebida de qualidade por estarem passados, esses não apresentam os resquícios de frutos brocados.

Figura 18 – Porcentagem de frutos brocados nos estádios de maturação verde (A), verde-cana (B), cereja (C), passa (D) em função da interação entre espécie arbórea e ano agrícola, em cafeeiros conduzidos em monocultivo e sistemas agroflorestais, de 2017 e 2021. Londrina, PR.



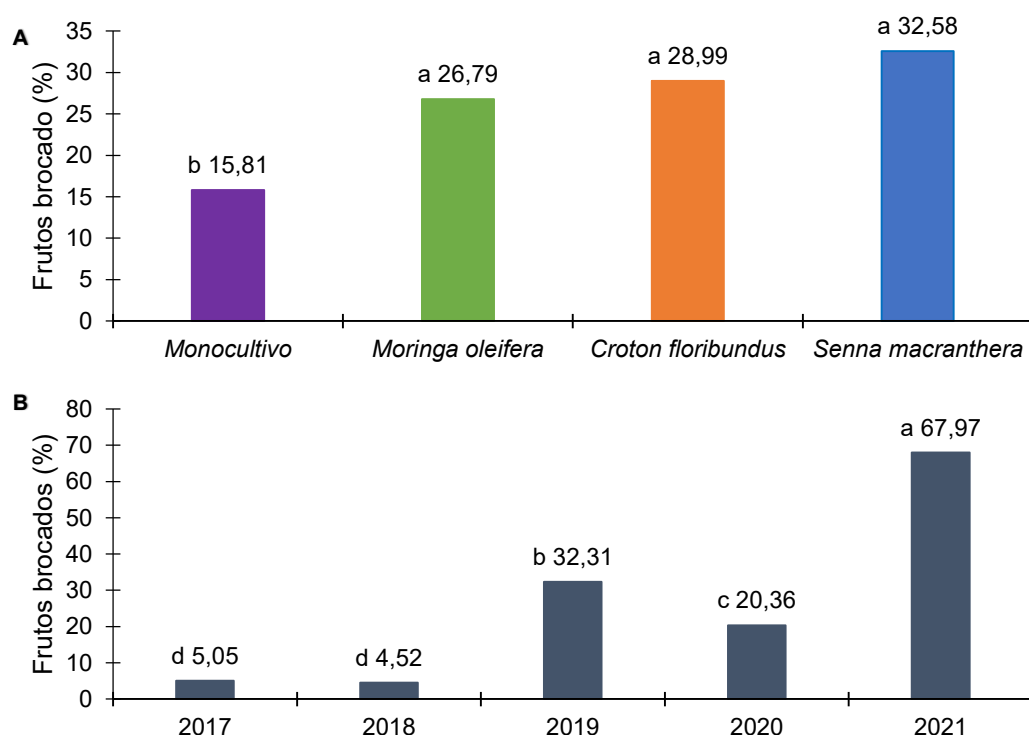
*Letras maiúsculas indicam comparação o mesmo sistema em diferentes anos e minúsculas comparam os sistemas em um mesmo ano. Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV% = A) 37,41; B) 27,61; C) 26,90; D) 28,28.

Fonte: A autora (2026).

Para os frutos brocados secos (Figura 19) que não houve efeito significativo da

interação observou-se que somente o sistema de monocultivo houve menor porcentagem de frutos secos (Figura 19A) enquanto para os anos agrícolas (Figura 19B) 2021 apresentou maior valor, seguido de 2019.

Figura 19 – Porcentagem de frutos brocados no estágio de maturação seco para o efeito isolado de espécie arbórea (A) e de ano agrícola (B), em cafeeiros conduzidos em monocultivo e sistemas agroflorestais, de 2019 e 2021. Londrina, PR.

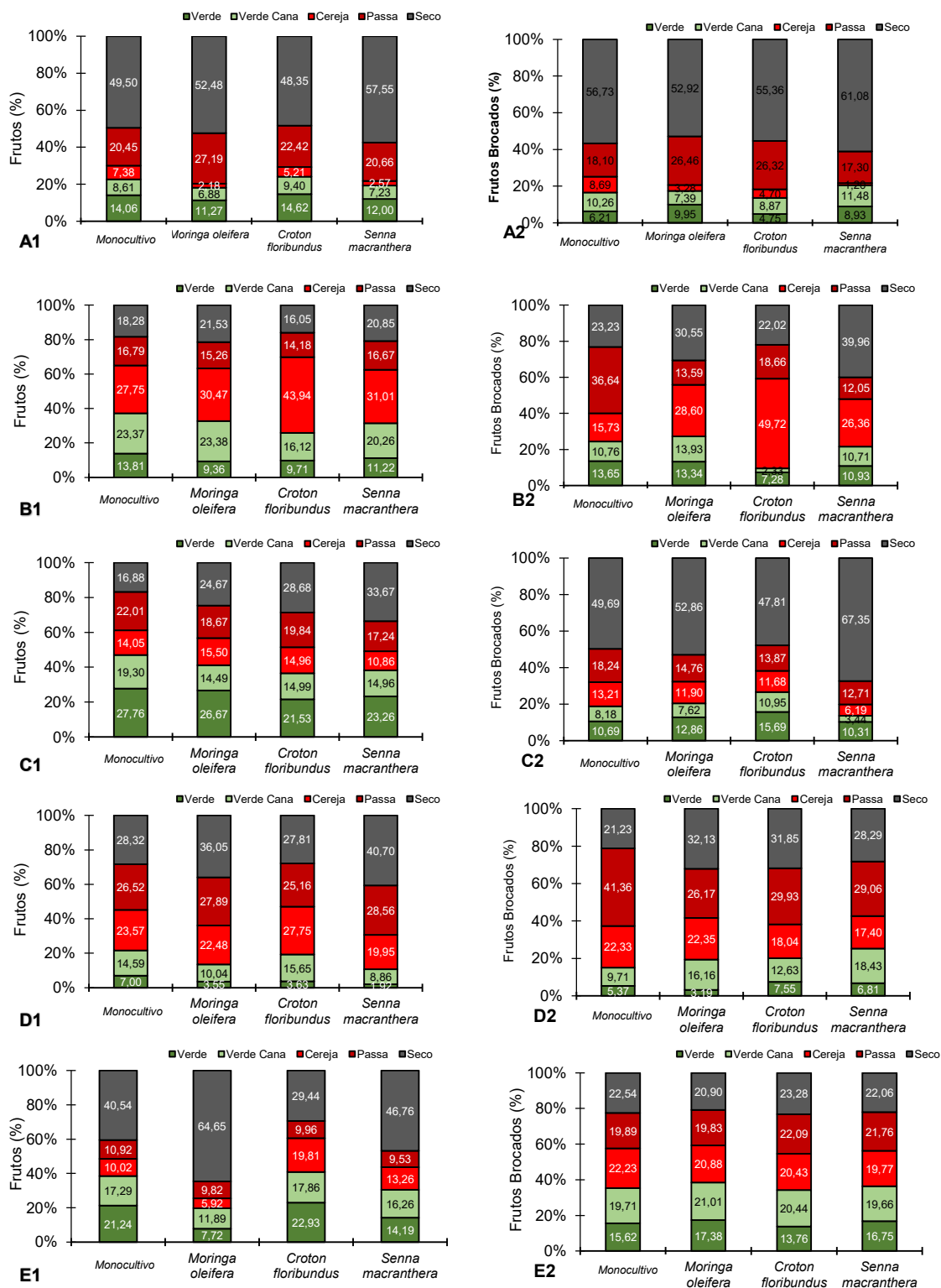


Letras minúsculas indicam comparação entre sistemas (A) e anos (B). Letras iguais não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. CV = 32,01%

Fonte: A autora (2026).

A fim de compreender melhor os resultados obtidos, foram quantificados o número de frutos brocados, e apresentado em forma de porcentagem (Figura 20). Com esses dados, é possível observar que somente em 2018 houve maior número de frutos cereja para todas as espécies, pois nos demais anos, a maior porcentagem de maneira geral é de frutos secos, que se refletiu nos dados de frutos brocados também em 2018. No entanto, 2020 e 2021 foram os anos em que houve menor variação entre os estádios de maturação e os frutos brocados, ou seja, com o aumento da população da espécie, houve ataque em todos os estádios de maturação.

Figura 20 – Distribuição percentual dos frutos do cafeeiro por estágio de maturação (1) e incidência de frutos brocados por *Hypothenemus hampei* em cada estágio de maturação (2), em cafeeiros conduzidos em monocultivo e sistemas agroflorestais, de 2017 e 2021. Londrina, PR.



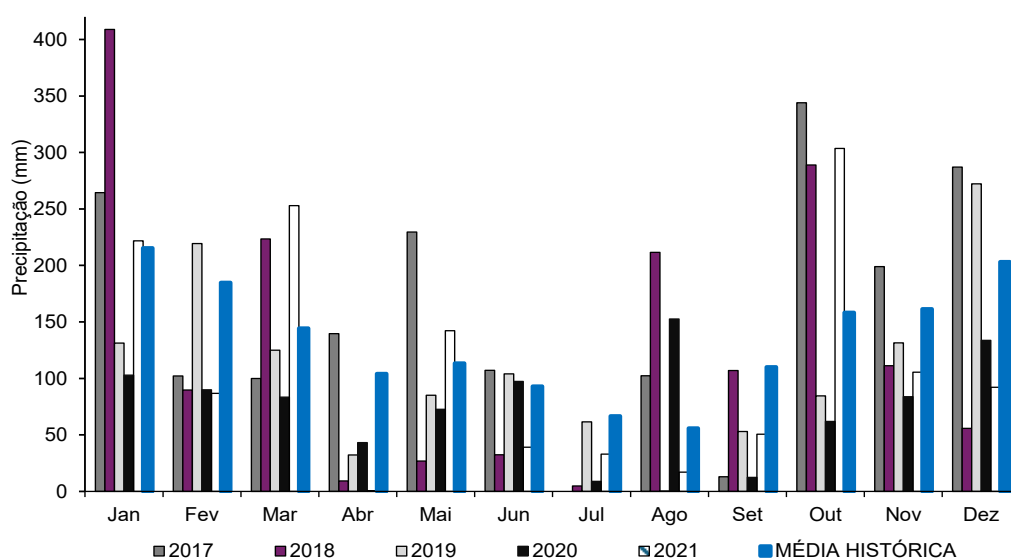
Nota: Anos de 2017 (A1; A2), 2018 (B1; B2), 2019 (C1; C2), 2020 (D1; D2) e 2021 (E1; E2).
Fonte: A autora (2026).

5.5.2 Caracterização Climática do Período Experimental

Em relação a precipitação pluviométrica identificou-se elevada variabilidade ao longo do período avaliado, com desvios positivos e negativos em relação à média histórica de Londrina, PR (1976–2025), cuja precipitação anual média é de 1.610,4 mm, evidenciando a ocorrência de anos contrastantes durante o experimento. Em 2017, a precipitação acumulada anual foi de 1.888,4 mm (Figura 21), superando a média histórica, sendo, portanto, um ano mais chuvoso, com destaque para os meses de janeiro (264,5 mm), maio (229,6 mm), outubro (343,9 mm) e dezembro (287,1 mm).

Entretanto em julho não se observou precipitação indicando irregularidade na distribuição das chuvas ao longo do ano. Já em 2018, a precipitação total foi de 1.569,7 mm, ligeiramente inferior à média histórica. Apesar do elevado volume registrado em janeiro (408,9 mm), houve forte redução das chuvas em abril (9,2 mm), maio (26,8 mm), junho (32,4 mm) e julho (4,8 mm), caracterizando um período prolongado de déficit hídrico no outono–inverno (Figura 21).

Figura 21 — Precipitação mensal entre 2017 a 2021 e média histórica do período de 1976 a 2025. Londrina, PR.



Fonte: Adaptado de IDR-Paraná.

Em 2019, a precipitação somou 1.299,7 mm, evidenciando um ano mais seco, ocorrendo valores mais baixos em meses que coincidem com etapas críticas do desenvolvimento e maturação: em agosto (0,2 mm) e volumes reduzidos em abril

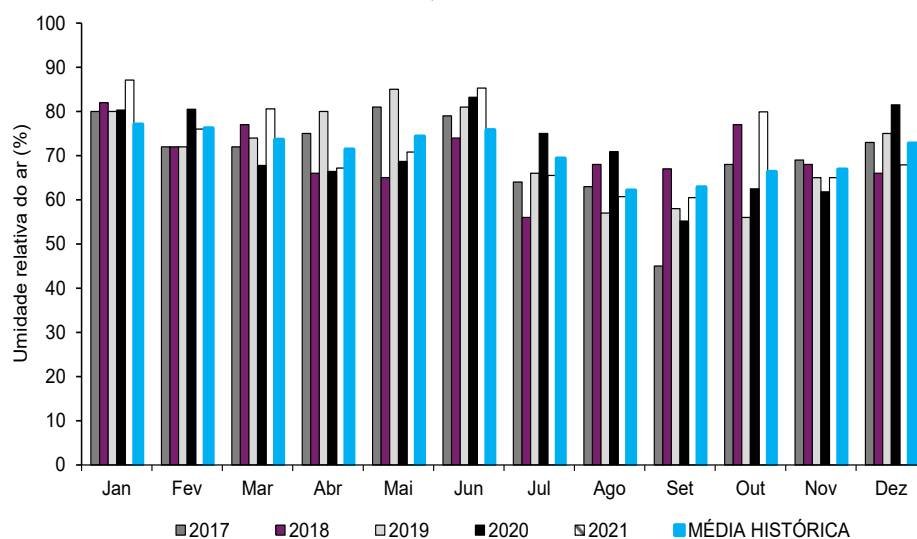
(32,2 mm) e setembro (53,0 mm). O ano de 2020 apresentou o menor índice pluviométrico do período, com apenas 942,3 mm, correspondendo a aproximadamente 58% da média histórica. Houve deficiência hídrica severa e prolongada, especialmente nos meses de abril (43,1 mm), julho (8,9 mm), setembro (12,3 mm) e outubro (61,9 mm), configurando um cenário de déficit hídrico acentuado.

Em 2021, o total anual de precipitação foi de 1.345,0 mm, ainda inferior à média histórica, porém superior aos anos de 2019 e 2020. Observou-se concentração das chuvas em março (253,0 mm) e outubro (303,5 mm), contrastando com volumes extremamente baixos em abril (0,6 mm), agosto (17,0 mm) e setembro (50,6 mm), indicando elevada irregularidade na distribuição temporal das chuvas.

Dessa forma, verificou-se elevada variação na precipitação ao longo dos anos avaliados, tendo maiores períodos de déficit hídrico significativo ao longo dos anos avaliados, tornando-se um fator relevante para a interpretação dos resultados relacionados à maturação dos frutos e à incidência da broca-do-café ao longo dos diferentes anos de avaliação.

Para a umidade relativa (UR) média histórica anual do ar para o município de Londrina, PR, considerando o período de 1976 a 2025, é de 71% (Figura 22). Em 2017, a UR média anual foi de 70%, com maiores valores nas estações de outono e inverno, especialmente em maio (81%) e junho (79%), enquanto setembro apresentou o menor valor do ano (45%). Em 2018, a UR média anual também foi de 70%, mantendo-se próxima ao padrão climatológico histórico. Contudo, verificaram-se oscilações mensais, com valores mais baixos em julho (56%) e mais elevados em janeiro (82%) e outubro (77%), refletindo a variabilidade sazonal típica da região.

Figura 22 – Umidade relativa do ar entre 2017 a 2021 e média histórica do período de 1976 a 2025. Londrina, PR.



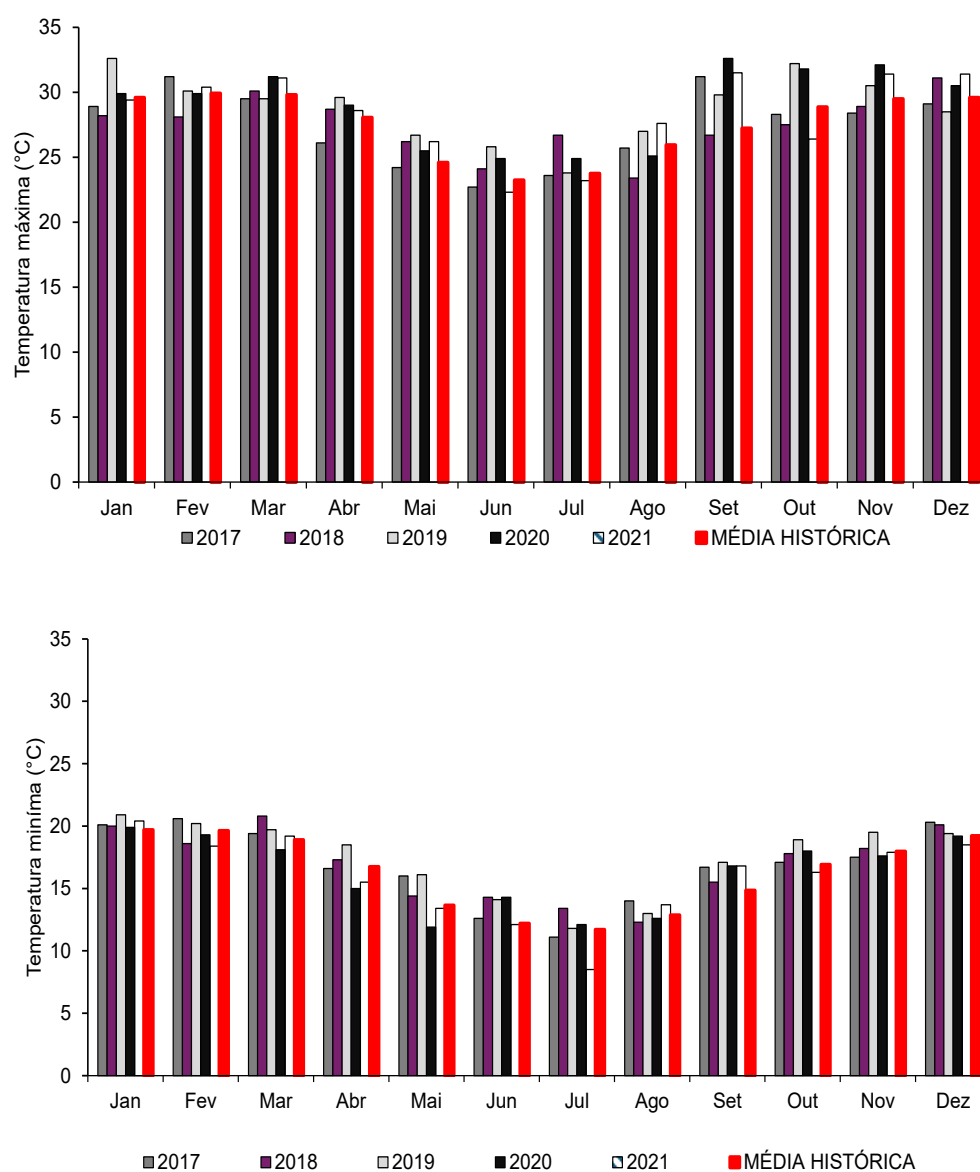
Fonte: Adaptado de IDR-Paraná.

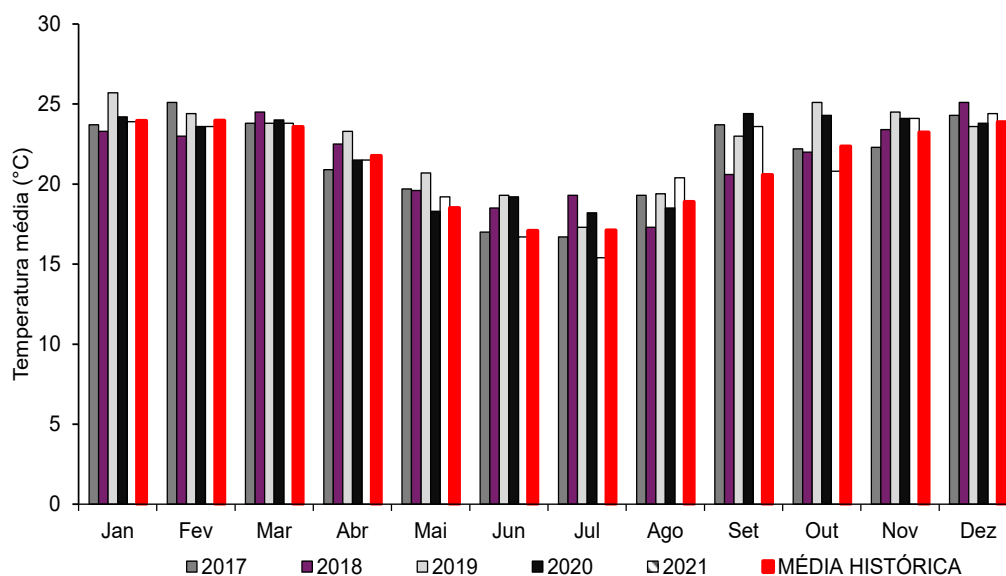
No ano de 2019, a UR média anual foi de 71%, coincidindo com a média histórica. Destacaram-se valores elevados no período de abril a junho, com máximos em maio (85%) e junho (81%), associados a maior disponibilidade hídrica. Por outro lado, agosto (57%) e outubro (56%) apresentaram valores inferiores à média histórica. Em 2020, a UR média anual manteve-se em 71%, semelhante à média histórica. Entretanto, observou-se aumento expressivo da umidade nos meses de inverno, especialmente em junho (83%) e julho (75%), contrastando com valores mais baixos em setembro (55%) e novembro (62%).

Em 2021, a UR média anual atingiu 72%, valor ligeiramente superior à média histórica, caracterizando o ano mais úmido do período avaliado. Destacaram-se valores elevados em janeiro (87%), março (81%) e junho (85%), indicando maior persistência de condições favoráveis à sobrevivência e ao desenvolvimento de insetos-praga.

Para a variável temperatura ao longo do período de avaliação, as temperaturas máximas apresentaram variações interanuais em relação à média histórica de Londrina, PR (1976–2025), cuja média anual é de 27,5 °C (Figura 23).

Figura 23 – Temperatura máxima, mínima e média do ar de 2017 a 2021 e média histórica do período de 1976 a 2025. Londrina, PR.





Fonte: Adaptado de IDR-Paraná.

Em 2017, a temperatura máxima média anual foi de 27,4 °C, indicando um ano termicamente típico. Destacaram-se valores mais elevados nos meses de fevereiro (31,2 °C) e setembro (31,2 °C), enquanto os meses de inverno apresentaram máximas mais amenas, compatíveis com o padrão climatológico regional. Em 2018, a temperatura máxima média anual foi de 27,5 °C. Apesar dessa proximidade no valor médio, observaram-se oscilações mensais, com temperaturas mais elevadas em março (30,1 °C) e dezembro (31,1 °C), e valores relativamente mais baixos em agosto (23,4 °C).

Em 2019, a temperatura máxima média anual atingiu 28,8 °C, valor superior à média histórica, caracterizando um ano mais quente. Destacam-se temperaturas máximas elevadas em janeiro (32,6 °C), outubro (32,2 °C) e novembro (30,5 °C), sugerindo maior frequência de condições térmicas favoráveis ao desenvolvimento de insetos-praga. Em 2021, a temperatura máxima média anual foi de 28,3 °C, permanecendo acima da média histórica, com destaque para março (31,1 °C), setembro (31,5 °C), novembro (31,4 °C) e dezembro (31,4 °C), indicando manutenção de um padrão térmico mais quente nos meses finais do ano.

Para as temperaturas mínimas, a média histórica anual da região é de 16,2 °C. Em 2017, a média anual foi de 16,8 °C, ligeiramente superior à média histórica, com valores mais baixos concentrados nos meses de inverno, especialmente julho (11,1 °C). Em 2018, a temperatura mínima média anual foi de 16,9 °C, também acima da

média histórica, mantendo um padrão térmico noturno relativamente elevado, sobretudo nos meses de verão. No ano de 2019, a temperatura mínima média anual atingiu 17,4 °C, indicando noites mais quentes ao longo do ano, condição que pode favorecer a sobrevivência e a atividade da broca do café.

Em 2020, a temperatura mínima média anual foi de 16,2 °C, coincidindo com a média histórica, embora com registros de temperaturas mínimas mais baixas em maio (11,9 °C) e julho (12,1 °C). Em 2021, observou-se a menor temperatura mínima média anual do período (15,9 °C), valor ligeiramente inferior à média histórica, com destaque para julho (8,5 °C), indicando a ocorrência de noites mais frias durante o inverno.

A temperatura média anual histórica da região é de 21,2 °C. Em 2017 e 2018, a temperatura média anual foi de 21,6 °C, levemente superior à média histórica, caracterizando anos termicamente próximos ao padrão climatológico. No ano de 2019, a temperatura média anual atingiu 22,5 °C, configurando o ano mais quente do período avaliado, resultado do aumento concomitante das temperaturas máximas e mínimas. Em 2020, a temperatura média anual foi de 22,0 °C, ainda acima da média histórica, reforçando a tendência de aquecimento observada nos anos mais recentes. Em 2021, a temperatura média anual foi de 21,5 °C, valor ligeiramente superior à média histórica, embora inferior aos registrados em 2019 e 2020.

De forma geral, os resultados indicam que 2019 e 2020 se destacaram como anos mais quentes, enquanto 2017 e 2018 apresentaram condições térmicas próximas ao padrão histórico, e 2021 mostrou maior amplitude térmica, com máximas elevadas e mínimas mais baixas.

5.5.3 Discussão

A fenologia do cafeeiro é altamente responsiva às flutuações microclimáticas, sendo a temperatura e a disponibilidade hídrica os principais fatores responsáveis pelo desenvolvimento reprodutivo. A água é um fator crítico para o desenvolvimento do café, e a demanda hídrica da planta atinge seus picos durante as fases de floração e maturação (Parada-Molina; Ruiz-Corral; Días-López, 2025). Os dados revelaram que o sistema de cultivo em monocultivo e o SAF com *C. floribundus* apresentaram as maiores proporções de frutos no estágio verde. Contudo, o SAF com *C. floribundus* destacou-se por propiciar, simultaneamente, uma maior porcentagem de frutos no estágio cereja e uma redução significativa de frutos secos.

Fisiologicamente, este padrão indica um prolongamento da fase de enchimento e maturação do fruto, mediado pelo efeito tampão do sombreamento. O sombreamento adequado reduz a evapotranspiração da cultura e a temperatura foliar, aliviando o déficit de pressão de vapor na interface folha-atmosfera. Quando o cafeeiro está exposto a pleno sol, as temperaturas supra-ótimas (frequentemente observadas nos anos de 2019 e 2020, com máximas superiores a 32 °C) aceleram o metabolismo respiratório e encurtam o período de acúmulo de fotoassimilados (Torres; Ferreira; Moraes, 2021).

As diferenças significativas observadas entre os tratamentos demonstram que a espécie arbórea determinou as alterações microclimáticas. Deste modo, de acordo com Assefa e Gobena (2017) essa situação indica que árvores de sombra modificam o microclima e a fisiologia da planta de café, dependendo de sua arquitetura de copa, índice de área foliar (IAF) e grau de desfolha. O comportamento divergente entre *S. macranthera* e *C. floribundus* ilustra perfeitamente este princípio.

Merle, Vaast e Franck (2022) demonstraram que a eficácia do efeito de uma árvore de sombra depende de suas características estruturais. Árvores mais altas e com dossel moderadamente denso são capazes de interceptar a radiação fotossinteticamente ativa (PAR) excessiva, reduzindo as temperaturas máximas diárias, enquanto simultaneamente retêm a radiação de onda longa durante a noite, elevando as temperaturas mínimas. O desempenho superior de *C. floribundus* sugere que esta espécie possui uma arquitetura foliar que permite uma transmitância de luz difusa ideal. Em contraste, o monocultivo expõe o cafeeiro à carga radiativa total, induzindo estresse fotooxidativo nas horas de pico de insolação, o que força a planta a fechar estômatos para reduzir os efeitos dessa condição.

Por outro lado, os resultados demonstrados no SAF com *S. macranthera* indicam que pode ser reflexo de um sombreamento excessivo denso ou inadequado para as condições locais. Um dossel muito fechado reduz drasticamente a circulação de ar e a penetração de luz, criando um ambiente de alta umidade relativa contínua no sub-bosque. Essa alteração microclimática, embora possa proteger o cafeeiro do estresse térmico agudo, cria um nicho ecológico altamente favorável para pragas e patógenos adaptados a ambientes úmidos.

A incidência de *H. hampei* demonstrou forte dependência da interação entre o ano agrícola e o estágio de maturação do fruto. O ano de 2021 registrou os maiores percentuais de frutos brocados, um efeito residual provável das elevadas

temperaturas observadas em 2019 e 2020. A dinâmica populacional da broca do café é estritamente regulada pela temperatura ambiental, uma vez que se trata de um inseto cujo desenvolvimento metabólico ocorre em função do acúmulo de graus-dias.

Jaramillo *et al.* (2009) realizaram um estudo seminal sobre a tolerância térmica de *H. hampei*, estabelecendo que o desenvolvimento bem-sucedido de ovo a adulto ocorre na estreita faixa de 20°C a 30°C. Os autores determinaram que o limiar inferior de desenvolvimento é de 14,9°C e a temperatura ótima para o crescimento populacional é de 26,7°C. Ao analisarmos os dados climáticos do estudo, observou-se que as temperaturas máximas em 2018, 2019 e 2020 (variando de 28,8 °C a 29,0 °C) e as médias anuais (21,6 °C a 22,5 °C) enquadram-se perfeitamente na zona de conforto térmico e próxima à temperatura ótima para a praga.

Além disso, ressalta-se ainda que um fator que pode ter sido fundamental no desenvolvimento da praga foi o aumento das temperaturas mínimas, que em 2019 atingiu média de 17,4 °C. Como este valor está acima de 14,9°C, a broca pôde manter seu desenvolvimento metabólico ativo mesmo durante a noite. O encurtamento do ciclo de vida promovido por essas temperaturas elevadas pode ter permitido a ocorrência de várias gerações do inseto em um único ano agrícola. Cure *et al.* (1998) reportaram a ocorrência de no mínimo três gerações completas durante a fase de formação dos frutos, número que provavelmente foi superior, de acordo com os dados obtidos no presente estudo.

Johnson e Manoukis (2024) estudando a dinâmica populacional da broca do café em diferentes regiões de cultivo no Havaí, observaram que as maiores populações ocorreram em terrenos de baixa elevação, uma vez que as variáveis climáticas temperatura, umidade relativa e precipitação diferiram significativamente entre elevações, afetando diretamente a dinâmica populacional.

Góngora, Benavides e Pérez (2024) por meio de ensaios de olfatométrica, comprovaram que fêmeas colonizadoras de *H. hampei* são até 30% mais atraídas por frutos maduros e passados em comparação a frutos verdes. Essa interação positiva é mediada pela emissão de compostos orgânicos voláteis, especificamente álcoois e ésteres, cuja biossíntese é intensificada durante a degradação da parede celular e o pico climatérico do fruto de café.

Além da atração olfativa, barreiras físicas e fisiológicas do hospedeiro garantem o sucesso da colonização. Cure, Rojas e Saenz (1998) elucidaram que, embora as fêmeas possam realizar perfurações exploratórias em frutos verdes, a oviposição

efetiva só tem início quando o fruto atinge cerca de 20% de matéria seca, coincidindo com a transição para os estádios cereja e passa. A alta incidência de broca no estágio seco reflete o uso desses frutos senescentes não apenas como sítio de alimentação, mas como refúgio reprodutivo primário e ponte de sobrevivência no período de entressafra.

Osorio Pérez, Ramírez e Soto (2023) demonstraram que o estágio cereja representa o ponto ótimo de maturação, caracterizado pela máxima expressão de precursores químicos essenciais para a qualidade sensorial, como açúcares redutores (frutose e glicose) e compostos voláteis. O sombreamento proporcionado por *C. floribundus* parece otimizar a distribuição de carbono, permitindo que os frutos permaneçam por mais tempo na planta sem perder turgidez, acumulando metabólitos secundários antes de avançarem para os estádios passa e seco.

A constatação de que o SAF com *S. macranthera* favoreceu maiores níveis de infestação, enquanto o SAF com *C. floribundus* manteve a praga em níveis compatíveis ou inferiores ao monocultivo, gera um entendimento de que não é qualquer sombreamento que aumenta a incidência de broca, ou seja, a relação é não linear e espécie-específica. Um sombreamento reduzido, como o aparentemente proporcionado por *C. floribundus* pode atuar de duas formas: protege a planta do estresse térmico ao passo que melhora a qualidade intrínseca do grão, mas mantém a ventilação e a penetração de radiação UV suficientes para desfavorecer o microclima de alta umidade estagnada exigido pela broca e por fungos entomopatogênicos.

Diante da realidade apresentada do aquecimento climático global, que ameaça expandir a zona de risco térmico da broca para altitudes e latitudes anteriormente imunes, o uso inteligente de SAFs torna-se uma ferramenta de adaptação climática imperativa. A seleção de espécies arbóreas deve priorizar arquiteturas foliares que forneçam transmitância difusa de PAR, associada a um manejo de podas de regulação estritamente sincronizado com os picos de voo de trânsito das fêmeas colonizadoras de *H. hampei*.

Por fim, a preferência e sucesso reprodutivo da broca nos estádios passa e seco reforça que a eficiência da colheita e do repasse fitossanitário continuam sendo um fator primordial do controle populacional. A permanência de frutos senescentes nas plantas arborizadas atua como inóculo primário para a safra subsequente. Em SAFs, onde a maturação pode apresentar desuniformidade intrínseca, o

monitoramento e a remoção desses frutos residuais exigem um rigor técnico ainda maior do que em cultivos a pleno sol.

Os resultados obtidos neste estudo evidenciam uma relação de interações ecológicas e ecofisiológicas que governam o agroecossistema cafeeiro. A análise integrada da fenologia reprodutiva de *C. arabica* L., das variáveis microclimáticas moduladas por diferentes espécies arbóreas de sombreamento e da dinâmica populacional de *H. hampei* revela que a incidência desta praga é o produto final de uma complexa cascata de eventos biofísicos.

Em nível de sistema, a variabilidade climática atua como o principal fator responsável pelas relações entre as espécies, redefinindo as taxas metabólicas tanto da planta hospedeira quanto do inseto, enquanto o sombreamento arbóreo atua como um filtro regulatório, mitigando ou aumentando os efeitos do clima na escala do micro-habitat.

6 CONCLUSÃO

A variabilidade climática é o principal determinante da incidência de *H. hampei* em café sendo o sombreamento arbóreo um modulador secundário espécie-específico, dado que as temperaturas médias elevadas e mínimas acima do limite basal da broca favoreceram múltiplas gerações da praga, com incidência residual em 2021.

A preferência da broca por frutos secos evidencia a importância crítica do repasse fitossanitário, recomendando-se um monitoramento integrado clima-fenologia-praga. Desta forma, para continuidade do trabalho, estudos futuros podem estudar a viabilidade econômica de diferentes combinações de espécies arbóreas em contexto de mudanças climáticas.

REFERÊNCIAS

- ARISTIZÁBAL, L. F. *et al.* Establishing an integrated pest management program for coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) in Hawaii and Puerto Rico coffee agroecosystems: achievements and challenges. **Insects**, Basel, v. 14, n. 7, p. 44-55, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects14070603>.
- ARISTIZÁBAL, L. F. *et al.* Integrated pest management of coffee berry borer in Hawaii and Puerto Rico: current status and prospects. **Insects**, Basel, v. 8, n. 4, p. 1-16, 2017. DOI: <https://doi.org/10.3390/insects8040123>.
- ASSEFA, A.; GOBENA, A. Review on effect of shade tree on microclimate, growth and physiology of *Coffee arabica*: in case of Ethiopia. **International Journal of Forestry and Horticulture**, New York, v. 5, n. 3, p. 31-46, 2017. DOI: <https://doi.org/10.20431/2454-9487.0503004>.
- BOTELHO, J. F. *et al.* Population dynamics of *Hypothenemus hampei* (Coleoptera: Scolytidae) in agroforestry and monoculture systems of conilon coffee in the southern portion of the state of Amazonas, Brazil. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 45, p. e4524, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1806-908820210000024>
- CASSAMO, C. T. *et al.* Shade and altitude implications on the physical and chemical attributes of green coffee beans from Gorongosa Mountain, Mozambique. **Agronomy**, Basel, v. 12, n. 10, p. 1-20, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy12102540>.
- CURE, J. R.; ROJAS, J. C.; SAENZ, E. Fenologia e dinâmica populacional da broca do café *Hypothenemus hampei* (Ferr.) relacionadas às fases de desenvolvimento do fruto. **Anais da Sociedade Entomológica do Brasil**, v. 27, n. 3, p. 325-335, 1998. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0301-80591998000300002>
- FERREIRA, D. F. Sisvar: um guia dos seus procedimentos de comparações múltiplas Bootstrap. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>
- GÓNGORA, C. E.; BENAVIDES, A.; PÉREZ, R. Preference of *Hypothenemus hampei* for coffee fruits according to state of maturation and infestation. **International Journal of Pest Management**, v. 72, n. 2, p. 224-233, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1080/09670874.2024.2349897>
- HAMILTON, L. J. *et al.* Coffee berry borer (*Hypothenemus hampei*) (Coleoptera: Curculionidae) development across an elevational gradient on Hawai'i Island: applying laboratory degree-day predictions to natural field populations. **PLOS ONE**, v. 14, n. 7, p. e0218321, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0218321>
- IDR-PARANÁ. **Atlas climático do Estado do Paraná**: normal climatológica de temperatura e precipitação. Londrina: IDR-Paraná.
- JARAMILLO, J. *et al.* Thermal tolerance of the coffee berry borer *Hypothenemus hampei*: predictions of climate change impact on a tropical insect pest. **PLOS ONE**, San Francisco, v. 4, n. 8, p. 1-11, 2009. DOI:

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0006487>.

JOHNSON, M. A.; MANOUKIS, N. C. Coffee berry borer (Coleoptera: Scolytidae) population dynamics across Hawaii Island's diverse coffee-growing landscape: optimizing location-specific pesticide applications. **Journal of Economic Entomology**, v. 117, n. 3, p. 963-972, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1093/jee/toae061>

MERLE, I.; VAAST, P.; FRANCK, N. Microclimate estimation under different coffee-based agroforestry systems using full-sun weather data and shade tree characteristics. **European Journal of Agronomy**, v. 132, p. 126396, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126396>

OSORIO PÉREZ, V.; RAMÍREZ, J.; SOTO, C. Chemical composition and sensory quality of coffee fruits at different stages of maturity. **Agronomy**, v. 13, n. 2, p. 341, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13020341>

PARADA-MOLINA, P. C.; RUIZ-CORRAL, J.; DÍAZ-LÓPEZ, A. Impact of climate on water status, growth, yield, and phenology of coffee (*Coffea arabica*) plants in the central region of the state of Veracruz, Mexico. **PLOS ONE**, v. 20, n. 4, p. e0319670, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0319670>

RICCI, M. S. F. *et al.* Cultivo orgânico de cultivares de café a pleno sol e sombreado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, n. 4, p. 569-575, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2006000400004>.

RICCI, M. S. F.; COSTA, J. R.; OLIVEIRA, N. G. Utilização de componentes principais para analisar o comportamento do cafeeiro a pleno sol e sombreado. **Coffee Science**, Lavras, v. 6, n. 1, p. 44-54, 2011.

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018. Disponível em: <https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2026.

TEODORO, A. V.; KLEIN, A. M.; TSCHARNTKE, T. Environmentally mediated coffee pest densities in relation to agroforestry management, using hierarchical partitioning analyses. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, Amsterdam, v. 125, n. 1-4, p. 120-126, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2007.12.004>.

TORRES, G. A. L.; FERREIRA, L. C.; MORAES, M. A. *Coffea arabica* L.: history, phenology and climatic aptitude of the state of São Paulo, Brazil. **Arquivos do Instituto Biológico**, São Paulo, v. 88, p. e0602020, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/1808-1657000602020>

VAAST, P. *et al.* Fruit thinning and shade improve bean characteristics and beverage quality of coffee (*Coffea arabica* L.) under optimal conditions. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, Hoboken, v. 86, n. 2, p. 197-204, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.2338>.

ZARO, G. C. *et al.* Coffee crops adaptation to climate change in agroforestry systems with rubber trees in southern Brazil. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 80, p. e20210142, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/1678-992X-2021-0142>

7 ARTIGO C - COMPOSIÇÃO FLORÍSTICA, COBERTURA E BIOMASSA DE PLANTAS DANINHAS EM CAFEEIROS CONDUZIDOS EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS

7.1 RESUMO

O manejo de plantas daninhas na cultura do café é fundamental, uma vez que essas espécies competem por recursos essenciais ao desenvolvimento das plantas cultivadas. A produção de café em monocultivo e em sistemas agroflorestais (SAFs) pode influenciar a ocorrência dessas espécies. Este estudo teve como objetivo avaliar o percentual de cobertura do solo por plantas daninhas, a massa seca e a composição florística em cafeeiros cultivados em monocultivo e em SAF com diferentes espécies arbóreas. O experimento foi conduzido em Londrina-PR, com a cultivar IPR 98, em delineamento de blocos casualizados com quatro repetições e quatro tratamentos: cafeeiros em monocultivo e cafeeiros em SAFs, com *Moringa oleifera*, *Croton floribundus* e *Senna macranthera*. As avaliações foram realizadas nas entrelinhas do cafeeiro, totalizando sete avaliações entre julho de 2020 e setembro de 2021. A cobertura do solo por plantas daninhas foi determinada por meio de avaliação visual, durante a qual também foram identificadas as principais espécies presentes. Para determinar a matéria seca, amostras da parte aérea das plantas daninhas foram coletadas em uma área de 0,25 m². No monocultivo, a maior exposição à luz solar favoreceu a maior incidência das plantas daninhas, resultando nas maiores médias do período avaliado, tanto para cobertura do solo quanto para massa seca. Ao final do período avaliado, todos os SAFs apresentaram a redução de cobertura do solo e massa seca, e em especial o SAF com *C. floribundus*. As principais espécies foram: *Parthenium hysterophorus*, *Richardia brasiliensis*, *Brachiaria plantaginea*, *Solanum americanum* e a *Amaranthus* spp. O SAF com *C. floribundus* reduziu a cobertura do solo por plantas daninhas e o acúmulo de massa seca, indicando potencial para auxiliar no manejo da vegetação espontânea em sistemas cafeeiros mais sustentáveis.

Palavras-chave: vegetação espontânea; composição florística; *Coffea arabica*; cobertura do solo; consórcios; comunidade infestante.

7.2 ABSTRACT

Weed management in coffee cultivation is fundamental, since these species compete for resources essential to the development of cultivated plants. Coffee production in monoculture and in agroforestry systems (AFS) can influence the occurrence of these species. This study aimed to evaluate the percentage of soil cover by weeds, dry mass, and floristic composition in coffee plants cultivated in monoculture and in AFS with different tree species. The experiment was conducted in Londrina-PR, with the IPR 98 cultivar, in a randomized block design with four replications and four treatments: coffee plants in monoculture and coffee plants in AFS, with *Moringa oleifera*, *Croton floribundus*, and *Senna macranthera*. Evaluations were carried out in the inter-rows of the coffee plants, totaling seven evaluations between July 2020 and September 2021. Soil cover by weeds was determined through visual assessment, during which the main species present were also identified. To determine dry matter, aerial samples of weeds were collected from an area of 0.25 m². In monoculture, greater exposure to sunlight favored a higher incidence of weeds, resulting in the highest averages for both soil cover and dry matter during the evaluation period. At the end of the evaluation period, all agroforestry systems (AFS) showed a reduction in soil cover and dry matter, especially the AFS with *C. floribundus*. The main species were: *Parthenium hysterophorus*, *Richardia brasiliensis*, *Brachiaria plantaginea*, *Solanum americanum*, and *Amaranthus* spp. The AFS with *C. floribundus* reduced soil cover by weeds and the accumulation of dry matter, indicating potential to assist in the management of spontaneous vegetation in more sustainable coffee systems.

Key-words: Spontaneous vegetation; floristic composition; *Coffea arabica*; ground cover; intercropping; weed community.

7.3 INTRODUÇÃO

A interferência de plantas daninhas constitui um dos principais fatores que podem limitar o crescimento e o desempenho produtivo das lavouras cafeeiras. Essas espécies competem diretamente com o cafeeiro por água, luz e nutrientes, podendo comprometer o desenvolvimento inicial, a absorção de nutrientes e o acúmulo de biomassa da cultura (Fialho *et al.*, 2010; Ronchi; Silva, 2006; Fialho *et al.*, 2011). Em

condições de manejo inadequado, essa interferência pode resultar em reduções de rendimento e maior demanda por intervenções de controle, configurando-se como desafio recorrente na cafeicultura (Teferi, 2017; Fontes *et al.*, 2022).

Tradicionalmente, as plantas daninhas são tratadas exclusivamente como agentes prejudiciais à cultura do café. Espécies como *Euphorbia heterophylla*, *Brachiaria plantaginea*, *Digitaria horizontalis*, *Cyperus rotundus* e *Amaranthus* spp. são frequentemente associadas à redução do crescimento e da produtividade de *Coffea arabica* L., em razão da intensa competição por recursos e da possibilidade de atuarem como hospedeiras de pragas e patógenos (Fialho *et al.*, 2011; Martins; Andreani Junior, 2023; Ronchi; Terra; Silva, 2007; Piato *et al.*, 2021). Contudo, evidências indicam que o papel dessas espécies pode variar conforme o sistema de produção, o manejo adotado e o nível de infestação, podendo, em determinadas condições, contribuir para a cobertura do solo e para processos ecológicos associados à ciclagem de nutrientes e à biodiversidade funcional (Fontes *et al.*, 2022; Barman *et al.*, 2024).

No sistema convencional de monocultivo, o controle de plantas daninhas representa uma das operações mais frequentes e onerosas. A capina manual pode demandar intervenções sucessivas ao longo do ciclo produtivo, especialmente em áreas com predominância de espécies perenes (Teferi, 2017). De forma complementar, o uso contínuo e pouco diversificado de herbicidas pode favorecer a seleção de biótipos resistentes, aumentando a dependência de insumos químicos e tornando o manejo progressivamente mais complexo (Fontes *et al.*, 2022). Embora o monocultivo não represente ausência total de sombra, uma vez que o próprio cafeeiro promove interceptação luminosa, a menor estratificação vegetal em comparação aos sistemas arborizados resulta em maior incidência de radiação na superfície do solo, condição que pode favorecer a germinação e o estabelecimento de espécies adaptadas a ambientes mais iluminados (Koutouleas *et al.*, 2022; Nasiro, 2024).

Em contraste, os sistemas agroflorestais (SAFs) promovem alterações estruturais no dossel que modificam o ambiente luminoso das entrelinhas. O aumento do sombreamento pode reduzir a radiação incidente sobre o solo, limitando a emergência de espécies fotoblásticas positivas e alterando a composição da comunidade infestante (Koutouleas *et al.*, 2022). Além disso, a deposição de serapilheira pode atuar como barreira física à emergência de plântulas, reduzindo a incidência luminosa na superfície e influenciando a dinâmica de estabelecimento das

espécies (Forte *et al.*, 2018; Staver *et al.*, 2020; Henrique *et al.*, 2022). Interações químicas entre espécies arbóreas e a vegetação espontânea, incluindo possíveis efeitos alelopáticos, também podem interferir na germinação e no crescimento de determinadas plantas daninhas (Kamanga *et al.*, 2025).

Apesar do potencial supressivo frequentemente atribuído aos SAFs os efeitos desses sistemas sobre a comunidade de plantas daninhas não são necessariamente uniformes ou unidirecionais. A maior complexidade estrutural do dossel pode reduzir a abundância de espécies adaptadas a condições de alta luminosidade, ao mesmo tempo em que favorece o estabelecimento de espécies tolerantes ao sombreamento, promovendo alterações na composição florística e na dinâmica competitiva da comunidade infestante (Staver *et al.*, 2020; Wienhold; Goulao, 2023). Nesse contexto, evidências indicam que, ao longo do tempo, sistemas com maior cobertura arbórea tendem a apresentar redução na ocorrência de espécies herbáceas infestantes e aumento da cobertura por vegetação de baixo porte e serapilheira, em contraste com áreas sob cultivo a pleno sol, nas quais a infestação se mantém mais elevada (Staver *et al.*, 2020). Adicionalmente, mudanças no manejo e na cobertura vegetal estão associadas à modificação dos padrões de dominância e emergência das espécies, refletindo processos dinâmicos de sucessão e adaptação ecológica dentro do sistema (Forte *et al.*, 2018).

Apesar do crescente interesse pelos SAFs na cafeicultura, ainda são limitados os estudos que avaliem, de forma comparativa e integrada, a ocorrência, a composição florística, a cobertura do solo e a produção de massa seca de plantas daninhas em sistemas de monocultivo e em diferentes arranjos agroflorestais sob condições edafoclimáticas semelhantes, especialmente em avaliações temporais contínuas (Staver *et al.*, 2020; Koutouleas *et al.*, 2022; Nasiro, 2024). Nesse contexto, evidências indicam que o conhecimento quantitativo acerca da dinâmica das comunidades infestantes em SAFs ainda é restrito e concentrado em poucos ambientes de estudo, reforçando a necessidade de abordagens mais sistemáticas e integradas que considerem as interações entre fatores ambientais, manejo e composição vegetal (Koutouleas *et al.*, 2022; Nasiro, 2024).

Diante desse cenário, torna-se fundamental compreender como distintos sistemas de cultivo influenciam a dinâmica das comunidades infestantes e quais implicações essas alterações podem ter para o manejo integrado de plantas daninhas. A adoção de estratégias de manejo mais eficientes depende do entendimento das

respostas das espécies às mudanças nas condições ambientais e nos sistemas de produção, especialmente em contextos de maior complexidade estrutural, como os SAFs (Fontes *et al.*, 2022; Teferi, 2017). Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a ocorrência e a dinâmica das plantas daninhas em lavouras cafeeiras conduzidas em monocultivo e em SAFs, analisando a cobertura do solo, a produção de massa seca e a composição das principais espécies ao longo do período avaliado.

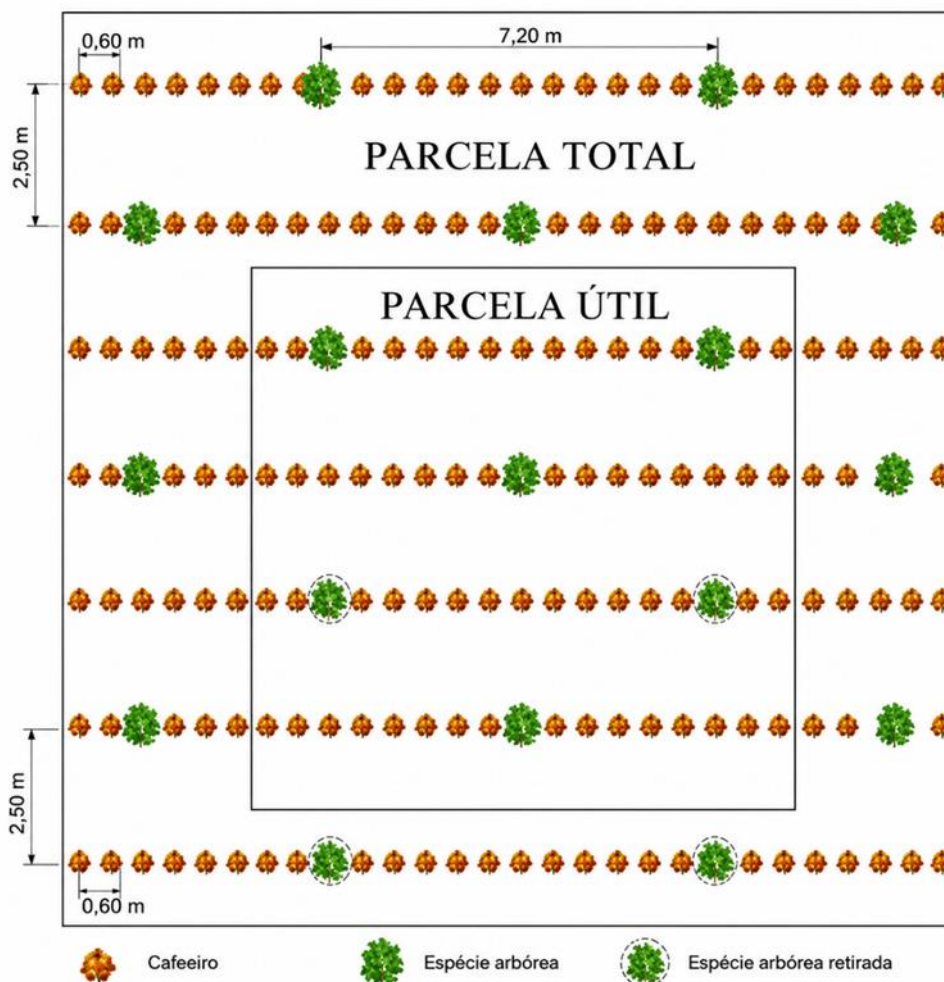
7.4 MATERIAL E MÉTODOS

As avaliações foram feitas em um experimento instalado em Londrina, Paraná, Brasil (23°21'27.8"S e 51°09'33.5"W, 574 m), com clima típico Cfa, subtropical úmido, com verão quente, segundo a classificação de Köppen. A temperatura média anual é 21,1°C, a média do mês mais quente é de 23,9°C (janeiro) e a do mês mais frio é 16,9°C (julho). A média histórica (1976 a 2019) do acumulado de chuva anual é de 1.632,0 mm, sendo janeiro o mês mais chuvoso, e agosto o menos chuvoso. (IDR-Paraná). O solo é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico (Santos *et al.*, 2018).

A cultivar de *Coffea arabica* foi a IPR 98. Em monocultivo, o espaçamento foi de 0,60 x 2,50 m, com 6.666 cafeeiros por hectare. Nos SAFs, o espaçamento dos cafeeiros e as arbóreas foram dispostas em quincôncio ao longo das linhas de café, com uma árvore a cada intervalo de 11 plantas de cafeeiro, substituindo uma delas, totalizando 555 árvores e 6.111 cafeeiros por hectare. Três anos e cinco meses após o plantio foram feitos desbastes, removendo-se 40% das árvores, resultando em 333 árvores por hectare.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados, com quatro tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos foram: cafeeiro em monocultivo, cafeeiro arborizado com *Moringa oleifera*, com *Croton floribundus* e com *Senna macranthera*. Cada repetição foi composta por uma parcela total de 19,80 x 22,50 m, sendo a parcela útil de 10,00 x 10,20 m no centro (Figura 24). A normalidade foi verificada por Shapiro–Wilk ($p > 0,05$). Os dados foram submetidos a análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), por meio do software estatístico SISVAR® (Ferreira, 2014).

Figura 24 – Esquema de distribuição espacial dos cafeeiros e espécies arbóreas na parcela experimental total e na parcela útil em sistemas agroflorestais.



Nota: Os símbolos alaranjados indicam cafeeiros, os símbolos verdes indicam espécies arbóreas e os símbolos verdes destacados com um círculo indicam árvores retiradas da parcela 41 meses após a implantação.

Fonte: A autora (2026).

7.5 Avaliações

7.5.1 Ocorrência de Plantas Daninhas

As avaliações da ocorrência de plantas daninhas foram realizadas nas entrelinhas do cafeeiro, sempre que se identificava a necessidade de controle no tratamento em monocultivo, onde se observou maior ocorrência, e durante o preparo da área para a colheita. No total, foram realizadas sete avaliações entre julho de 2020 e setembro de 2021.

A cobertura do solo por plantas daninhas foi determinada por avaliação visual,

atribuindo-se a escala de notas: 0 = sem cobertura; 1 $\approx$ 20% de cobertura; 2 $\approx$ 40% de cobertura; 3 $\approx$ 60% de cobertura; 4 $\approx$ 80% de cobertura; e 5 $\approx$ 100% de cobertura. As principais espécies de plantas daninhas presentes foram identificadas e quantificadas com base na frequência relativa de sua ocorrência em relação às demais.

Para a determinação da massa seca da parte aérea das plantas daninhas, foi coletada uma amostra em um ponto aleatório da entrelinha da parcela útil, utilizando-se um quadro metálico de 0,25 m² (0,5 $\times$ 0,5 m). As amostras foram secas em estufa com circulação forçada de ar a 65 °C até atingirem massa constante e depois pesada em balança.

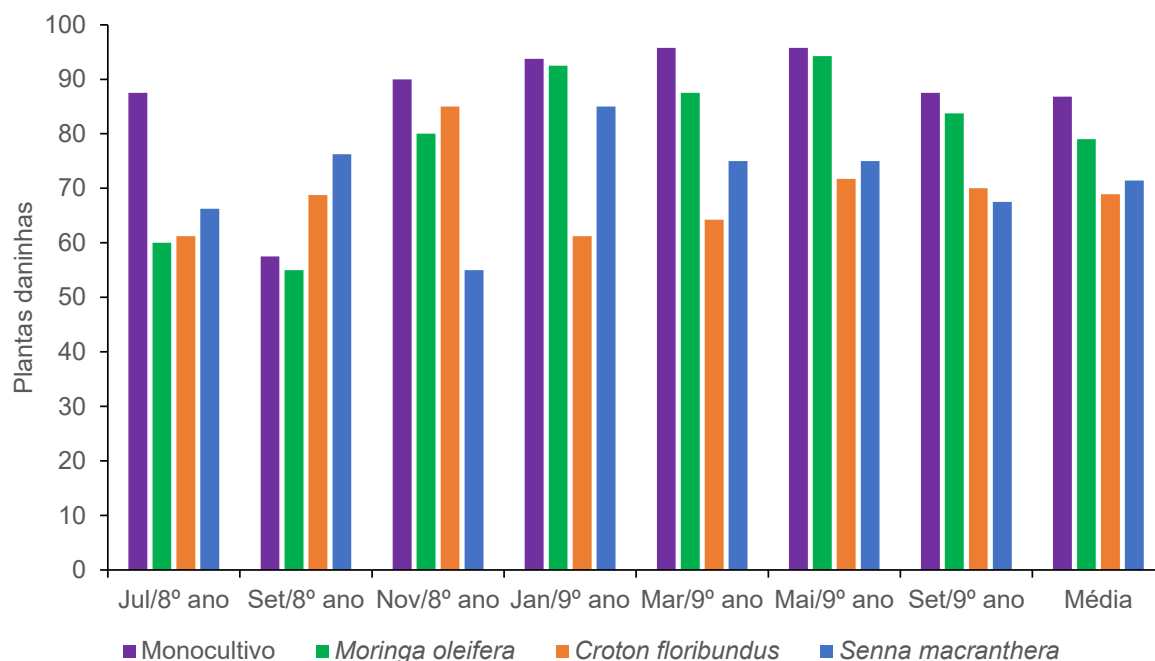
Os resultados obtidos foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), por meio do software estatístico SISVAR® (Ferreira, 2014).

7.6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

7.6.1 Cobertura do Solo por Plantas Daninhas

A cobertura do solo por plantas daninhas variou ao longo do período avaliado, sendo influenciada pelo sistema de cultivo e pelas condições climáticas predominantes em cada período (Figura 25). Na média geral das avaliações, os menores percentuais de cobertura foram observados nos cafeeiros arborizados com *C. floribundus* (68%) e *S. macranthera* (71%), enquanto os maiores valores ocorreram no monocultivo (87%) e no sistema com *M. oleifera* (79%). Esses resultados indicam que os SAFs apresentaram diferentes capacidades de supressão das plantas daninhas, dependendo da espécie arbórea utilizada.

Figura 25 – Cobertura do solo por plantas daninhas nas entrelinhas de cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais, de julho de 2020 a setembro de 2021. Londrina, PR.



Fonte: A autora (2026).

Os menores percentuais de cobertura observados nos sistemas com *C. floribundus* e *S. macranthera* sugerem que essas espécies arbóreas proporcionaram maior efeito supressivo sobre a comunidade infestante. Esse comportamento pode estar associado ao maior fechamento do dossel, à redução da incidência luminosa nas entrelinhas e ao acúmulo de serapilheira sobre o solo. Segundo Fontes *et al.* (2022), a cobertura morta reduz a emergência de espécies fotoblásticas positivas ao dificultar a passagem de luz até a superfície do solo. De forma complementar, Nasiro (2024) destaca que a deposição de resíduos vegetais em SAFs atua como barreira física e térmica, reduzindo a amplitude térmica e dificultando o estabelecimento de plantas daninhas.

Além do efeito físico promovido pela serapilheira, a dinâmica de decomposição do material vegetal também influencia a cobertura do solo. Henrique *et al.* (2022), ao compararem sistemas cafeeiros arborizados e a pleno sol, observaram maior taxa de decomposição em sistemas sombreados, favorecendo a ciclagem de nutrientes e a manutenção contínua da cobertura orgânica sobre o solo. Esse processo pode contribuir para a redução da emergência de plantas infestantes nos SAFs avaliados neste estudo.

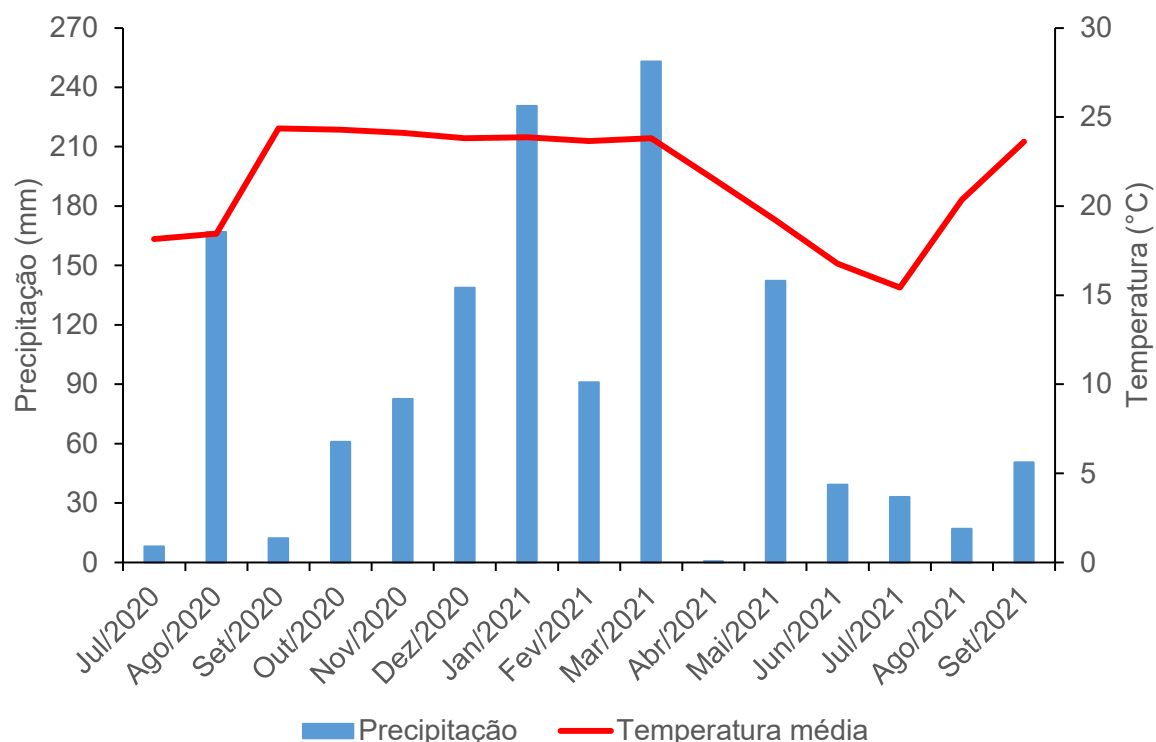
As diferenças observadas entre os sistemas também podem ser explicadas pelas características funcionais das espécies arbóreas utilizadas. *C. floribundus*, espécie pioneira, semicaducifolia e de rápido crescimento, apresenta elevado potencial de fechamento do dossel e maior produção de biomassa foliar (Carvalho, 2003; Augusto *et al.*, 2003), favorecendo o sombreamento das entrelinhas e a deposição de serapilheira. Esse comportamento explica os menores percentuais de cobertura observados nesse sistema, especialmente em janeiro de 2021, quando foram registrados apenas 61% de cobertura do solo por plantas daninhas.

Por outro lado, o sistema com *M. oleífera* apresentou comportamento mais próximo ao monocultivo durante grande parte do período avaliado. Embora a espécie apresente rápido crescimento e elevada adaptabilidade em sistemas agrícolas (Kamanga *et al.*, 2025), sua arquitetura de copa mais aberta provavelmente permitiu maior entrada de luz nas entrelinhas, favorecendo a emergência e o desenvolvimento das plantas daninhas.

No caso de *S. macranthera*, os valores de cobertura permaneceram intermediários ao longo do período avaliado. Apesar de apresentar comportamento perenifólio (Carvalho, 2006), oscilações temporais na cobertura de plantas daninhas podem estar associadas a alterações na densidade foliar e no acúmulo de serapilheira ao longo das estações, modificando temporariamente as condições microclimáticas do sistema.

As condições climáticas também exerceram influência importante sobre a dinâmica da cobertura do solo (Figura 26). Os maiores volumes de precipitação ocorreram entre dezembro de 2020 e março de 2021, período caracterizado também por temperaturas médias mais elevadas. Em contraste, julho de 2020 e abril de 2021 apresentaram os menores índices pluviométricos, representando períodos de maior restrição hídrica.

Figura 26 – Precipitação pluviométrica mensal e temperatura média do ar de julho de 2020 a setembro de 2021. Londrina, PR.



Fonte: A autora (2026).

Nos períodos mais quentes e chuvosos, especialmente entre janeiro e maio de 2021, o monocultivo apresentou os maiores percentuais de cobertura do solo, frequentemente superiores a 90%. Esse comportamento evidencia que a combinação entre elevada disponibilidade hídrica, temperaturas elevadas e maior incidência luminosa favoreceu o crescimento das plantas daninhas. Qaderi (2023) destaca que altas temperaturas associadas à disponibilidade hídrica aceleram o crescimento vegetativo e o acúmulo de biomassa dessas espécies.

Em contraste, os sistemas com *C. floribundus* e *S. macranthera* apresentaram menor incremento da cobertura mesmo durante os períodos climaticamente favoráveis à infestação. Esse comportamento sugere que o sombreamento promovido pelas espécies arbóreas atuou como fator moderador das condições microambientais, reduzindo a intensidade luminosa incidente sobre o solo e limitando o estabelecimento das espécies infestantes. Ricci *et al.* (2013) demonstraram que sistemas cafeeiros arborizados apresentam menor amplitude térmica e temperaturas mais estáveis em comparação ao monocultivo, criando condições microclimáticas distintas nas entrelinhas.

No monocultivo, além da maior cobertura do solo por plantas daninhas, os elevados níveis de infestação podem comprometer diretamente o desenvolvimento do cafeeiro. Carvalho *et al.* (2013) observaram que a matocompetição reduz significativamente o teor de nutrientes foliares e o crescimento inicial das plantas de café. De forma semelhante, Matos *et al.* (2013) verificaram redução da condutância estomática e da taxa fotossintética do cafeeiro sob elevada infestação de plantas daninhas.

De maneira geral, os resultados demonstram que os SAFs apresentaram potencial para reduzir a cobertura do solo por plantas daninhas em comparação ao monocultivo, embora esse efeito tenha variado conforme a espécie arbórea utilizada. Entre os sistemas avaliados, *C. floribundus* apresentou maior eficiência na supressão das plantas daninhas, indicando maior potencial para utilização em sistemas cafeeiros sustentáveis.

7.6.2 Identificação das Principais Espécies de Plantas Daninhas

Foram identificadas cinco principais famílias botânicas de plantas daninhas ao longo do período experimental: Asteraceae, Rubiaceae, Poaceae, Solanaceae e Amaranthaceae. As espécies com maior ocorrência nas entrelinhas dos cafeeiros, tanto em monocultivo quanto nos SAFs, foram *Parthenium hysterophorus*, *Richardia brasiliensis*, *Brachiaria plantaginea*, *Solanum americanum* e *Amaranthus* spp. (Tabela 9). A composição florística variou ao longo do período avaliado, indicando influência conjunta das condições climáticas e das características estruturais de cada sistema de cultivo.

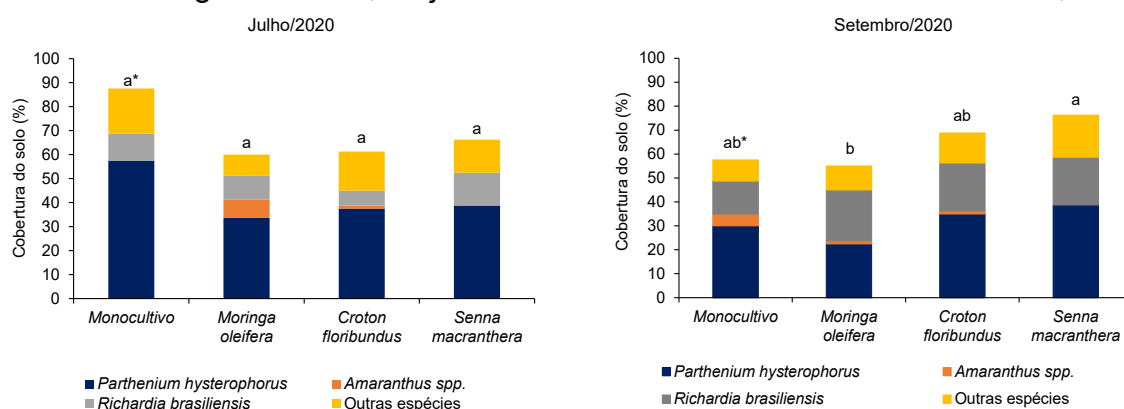
Tabela 9 – Plantas daninhas, distribuídas por família, espécie nas entre linhas de cafeeiros em monocultivo e em sistemas agroflorestais no período de julho de 2020 a setembro de 2021, Londrina, PR.

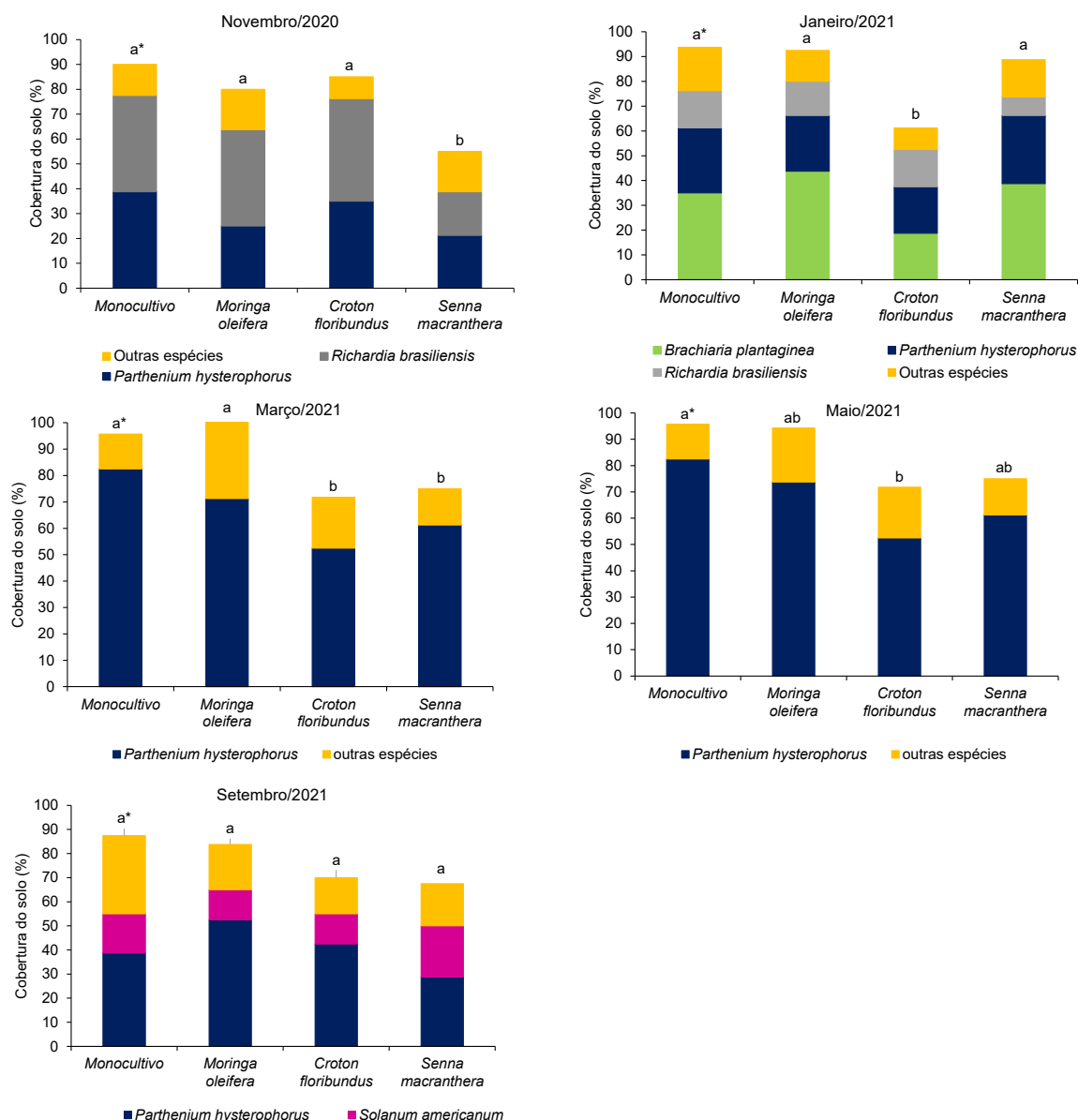
Família	Espécie	Nome comum	Monocotiledônea Dicotiledônea
Asteraceae	<i>Parthenium hysterophorus</i>	Losna branca	Dicotiledônea
Rubiaceae	<i>Richardia brasiliensis</i>	Poaia branca	Dicotiledônea
Poaceae	<i>Brachiaria plantaginea</i>	Papuan	Monocotiledônea
Solanaceae	<i>Solanum americanum</i>	Maria pretinha	Dicotiledônea
Amaranthaceae	<i>Amaranthus</i> spp.	Caruru	Dicotiledônea

Fonte: A autora (2026).

A cobertura do solo por plantas daninhas variou ao longo do período avaliado (Figura 27), em resposta tanto às condições climáticas (Figura 26) quanto às características estruturais de cada sistema de cultivo. Na média geral do período avaliado, os menores percentuais de cobertura foram observados nos cafeeiros arborizados com *C. floribundus* (68%) e *S. macranthera* (71%), enquanto os maiores valores ocorreram no monocultivo (87%) e no sistema com *M. oleifera* (79%). Esse resultado indica que o efeito supressivo dos SAFs não foi uniforme, dependendo da espécie arbórea utilizada e, possivelmente, da intensidade de sombreamento, da arquitetura do dossel e da quantidade de serapilheira acumulada sobre o solo.

Figura 27 – Cobertura do solo por plantas daninhas e composição florística das espécies nas entrelinhas de cafeeiros em monocultivo e sistemas agroflorestais, de julho de 2020 a setembro de 2021. Londrina, PR.





*Letras distintas indicam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Dados transformados por $\sqrt{Y + 1}$. Coeficiente de variação (CV): 12,29% (julho/2020), 6,63% (Setembro/2020), 6,59% (novembro/2020), 3,35% (Janeiro/2021), 7,22% (Março/2021), 6,30% (Maio/2021), 8,46% (setembro/2021).

Fonte: A autora (2026).

A dominância de *P. hysterophorus* observada neste estudo pode ser atribuída às características biológicas e ecológicas da espécie, incluindo rápido crescimento, elevada produção de sementes, ampla capacidade de colonização e forte competitividade interespecífica, características amplamente associadas ao seu reconhecido potencial invasivo (Adkins; Shabbir, 2014; Matzrafi *et al.*, 2021). Além disso, essa espécie tende a apresentar melhor desempenho em ambientes com maior disponibilidade de luz, o que contribui para sua maior ocorrência no monocultivo e no

sistema com *M. oleifera*. De acordo com Canuto (2020), em estudo de levantamento fitossociológico realizado em cafezal Catuaí Amarelo, *P. hysterophorus* apresentou elevado Índice de Valor de Importância (IVI $\approx$ 37,9%), indicando sua alta representatividade na comunidade infestante. Esse resultado reflete a combinação de elevada frequência, densidade e dominância da espécie na área, caracterizando-a como uma das principais plantas daninhas do sistema e prioritária para o manejo.

Em julho de 2020, sob baixa precipitação (8,0 mm) e temperatura média de 18,2 °C, o monocultivo apresentou 87,50% de cobertura, enquanto os sistemas com *M. oleifera*, *C. floribundus* e *S. macranthera* registraram 60,00%, 61,25% e 66,25%, respectivamente. Nesse momento inicial, os três SAFs já apresentavam menor cobertura que o monocultivo, sugerindo efeito supressivo associado à presença das árvores. A redução da luz incidente e a presença de resíduos vegetais podem ter dificultado a emergência inicial de espécies fotoblásticas positivas, mecanismo compatível com o que tem sido descrito para sistemas sombreados (Fontes *et al.*, 2022).

Entretanto, em setembro de 2020, quando a temperatura média se elevou para 24,4 °C e a precipitação permaneceu muito baixa (12,2 mm) (Figura 26), observou-se mudança no padrão de cobertura (Figura 27). O monocultivo apresentou 57,50%, *M. oleifera* 55,00%, *C. floribundus* 68,75% e *S. macranthera* 76,25%. Nesse período, os sistemas com *C. floribundus* e *S. macranthera* passaram a apresentar cobertura superior ao monocultivo, enquanto *M. oleifera* permaneceu com valor semelhante ao do cultivo a pleno sol. Esse comportamento sugere que, sob condições quentes e secas, o sombreamento moderado pode ter reduzido a amplitude térmica e contribuído para a manutenção da umidade nas entrelinhas, favorecendo a emergência de parte da comunidade infestante. Segundo Ricci *et al.* (2013) e Nasiro (2024), o componente arbóreo em sistemas arborizados atua sobre as condições microclimáticas do solo, promovendo maior estabilidade térmica e hídrica em comparação a sistemas conduzidos a pleno sol. Além disso, *P. hysterophorus* apresenta germinação ótima em faixas térmicas moderadas e emergência preferencial a partir de sementes localizadas nas camadas mais superficiais do solo, o que torna a espécie sensível tanto à temperatura quanto às condições físicas da superfície (Matzrafi *et al.*, 2021).

A partir de novembro de 2020, com precipitação de 82,60 mm e temperatura média de 24,1 °C, o monocultivo voltou a apresentar a maior cobertura (90,00%),

seguido por *C. floribundus* (85,00%) e *M. oleifera* (80,00%), enquanto *S. macranthera* apresentou o menor valor (55,00%). Esse resultado mostra que a resposta dos SAFs passou a depender mais nitidamente da espécie arbórea. No caso de *S. macranthera*, a menor cobertura nesse momento sugere maior capacidade de supressão, possivelmente relacionada à estrutura do dossel e ao acúmulo de serapilheira. Já *M. oleifera* apresentou comportamento intermediário, porém mais próximo do monocultivo, indicando menor eficiência supressiva.

Em janeiro de 2021, sob elevada precipitação (230,60 mm) e temperatura média de 23,9 °C, a diferença entre os sistemas tornou-se ainda mais evidente. O monocultivo apresentou 93,75% de cobertura, *M. oleifera* 92,50%, *S. macranthera* 85,00% e *C. floribundus* apenas 61,25%. Esse foi um dos momentos mais claros de superioridade do sistema com *C. floribundus*. Mesmo sob condições altamente favoráveis à emergência e crescimento de plantas daninhas, *C. floribundus* manteve os menores valores de cobertura. Isso sugere que essa espécie arbórea proporcionou maior sombreamento efetivo e/ou maior deposição de serapilheira, reduzindo a incidência de luz no solo e dificultando o estabelecimento das plântulas. A interpretação é coerente com a biologia de *P. hysterophorus*, que prospera em alta intensidade luminosa e sofre redução significativa de biomassa, altura e número de flores sob sombreamento de 60% e 90% (Matzrafi *et al.*, 2021).

Em março de 2021, quando a precipitação atingiu 253,00 mm e a temperatura média permaneceu elevada (23,8 °C), o monocultivo novamente apresentou a maior cobertura (95,75%), seguido por *M. oleifera* (87,50%), *S. macranthera* (75,00%) e *C. floribundus* (64,25%). Em maio de 2021, mesmo com redução da temperatura para 19,2 °C e precipitação ainda elevada (142,20 mm), o padrão se manteve: monocultivo e *M. oleifera* apresentaram 95,75% e 94,25%, respectivamente, enquanto *C. floribundus* e *S. macranthera* registraram 71,75% e 75,00%. Esses dados reforçam que o sistema com *M. oleifera* teve baixa capacidade de supressão ao longo do período chuvoso, comportando-se de forma mais próxima ao monocultivo. Em contraste, *C. floribundus* foi o tratamento mais eficiente, seguido por *S. macranthera*.

Essa diferença entre as espécies arbóreas pode ser explicada por atributos funcionais distintos. *C. floribundus* é uma espécie pioneira, semicaducifólia e de rápido crescimento, com elevado potencial de fechamento do dossel e produção de biomassa foliar, características que podem contribuir para sua maior eficiência na supressão de plantas daninhas (Carvalho, 2003; Augusto *et al.*, 2003). Já *M. oleifera*,

embora seja uma espécie de rápido crescimento e alta adaptabilidade, tende a apresentar arquitetura de copa mais aberta e menor densidade foliar, o que pode resultar em maior penetração de luz nas entrelinhas e, conseqüentemente, menor capacidade de restringir o crescimento de espécies infestantes (Pareek *et al.*, 2023; Kamanga *et al.*, 2025). No presente estudo, esse comportamento foi compatível com os elevados percentuais de cobertura observados no sistema com *M. oleifera* entre janeiro e maio de 2021, sempre acima de 87%.

No caso de *S. macranthera*, o desempenho foi intermediário. Em novembro de 2020 apresentou a menor cobertura entre os tratamentos (55,00%), mas em janeiro e março de 2021 os valores subiram para 85,00% e 75,00%, respectivamente, voltando a reduzir em setembro de 2021 para 67,50%. Assim, *S. macranthera* mostrou efeito supressivo mais consistente que *M. oleifera*, mas inferior ao de *C. floribundus*. Como *S. macranthera* é descrita como espécie perenifolia (Carvalho, 2003; Carvalho, 2006), a oscilação observada provavelmente não se explica por caducifolia intrínseca, mas por variações na densidade do dossel, no acúmulo de serapilheira e na interação entre sombra e condições climáticas ao longo das estações, fatores que podem alterar a intensidade de sombreamento e as condições microclimáticas do sistema (Ricci *et al.*, 2013; Nasiro, 2024).

Em setembro de 2021, sob precipitação intermediária (50,60 mm) e temperatura média de 23,6 °C, o monocultivo apresentou 87,50% de cobertura, enquanto *M. oleifera*, *C. floribundus* e *S. macranthera* registraram 83,75%, 70,00% e 67,50%, respectivamente. Nesse momento, *S. macranthera* passou a apresentar o menor valor, ligeiramente inferior ao de *C. floribundus*. Ainda assim, considerando todo o período, *C. floribundus* foi o tratamento de melhor desempenho geral, pois combinou os menores percentuais médios e os menores valores nos meses de maior precipitação, quando a infestação tendia a aumentar em todos os sistemas.

Os resultados indicam que a precipitação e a temperatura influenciaram a cobertura do solo por plantas daninhas, mas o efeito dessas variáveis foi modulado pela espécie arbórea presente no sistema. Nos meses mais quentes e chuvosos, especialmente entre janeiro e maio de 2021, houve aumento expressivo da cobertura no monocultivo e no sistema com *M. oleifera*, sugerindo que a combinação de alta disponibilidade hídrica e maior entrada de luz favoreceu a infestação. Por outro lado, os sistemas com *C. floribundus* e *S. macranthera* amorteceram esse incremento, principalmente *C. floribundus*, indicando maior capacidade de atenuação

microclimática e maior restrição ao estabelecimento de espécies dominantes, como *P. hysterothorus*. Isso é compatível com a literatura que descreve *P. hysterothorus* como espécie favorecida por alta luminosidade, ampla faixa térmica de germinação e forte capacidade de invasão, mas sensível à redução da luz e ao sombreamento intenso (Matzrafi *et al.*, 2021).

Assim, a diferença de ocorrência entre os tratamentos não pode ser atribuída apenas ao fato de serem SAFs, mas à identidade funcional da espécie arbórea utilizada. Nas condições deste estudo, *C. floribundus* foi a espécie mais eficiente na supressão da cobertura do solo por plantas daninhas, seguida por *S. macranthera*, enquanto *M. oleífera* apresentou efeito mais limitado, com comportamento frequentemente próximo ao monocultivo.

Após *P. hysterothorus*, *R. brasiliensis* destacou-se como uma das espécies de maior representatividade na comunidade infestante, apresentando ocorrência expressiva principalmente entre julho de 2020 e janeiro de 2021, com redução acentuada nas avaliações posteriores. A espécie apresentou maior participação relativa nos meses de novembro de 2020, quando se tornou um dos principais componentes da cobertura do solo em todos os sistemas avaliados.

Em julho de 2020, sob baixa precipitação (8,0 mm) e temperatura média de 18,2 °C, *R. brasiliensis* apresentou baixa participação relativa na cobertura do solo, representando aproximadamente 10 a 15% da cobertura total nos tratamentos avaliados. Nesse período, sua ocorrência foi relativamente uniforme entre os sistemas, indicando que, sob condições iniciais de baixa disponibilidade hídrica e temperaturas moderadas, a espécie ainda apresentava estabelecimento restrito.

Entretanto, em setembro de 2020, quando a temperatura média se elevou para 24,4 °C e a precipitação permaneceu baixa (12,2 mm), observou-se incremento expressivo da participação relativa de *R. brasiliensis*, especialmente nos SAFs com *M. oleífera* e *C. floribundus*, nos quais a espécie representou aproximadamente 20 a 25% da cobertura total. Esse padrão sugere que, sob condições quentes e secas, a espécie pode ter sido favorecida pelo ambiente microclimático mais estável proporcionado pelo sombreamento parcial, com maior conservação da umidade superficial do solo e menor amplitude térmica nas entrelinhas. Segundo Ricci *et al.* (2013) e Nasiro (2024), o componente arbóreo em sistemas arborizados influencia as condições microclimáticas do solo, promovendo maior estabilidade térmica e hídrica em comparação a sistemas conduzidos a pleno sol.

O maior pico de ocorrência de *R. brasiliensis* foi observado em novembro de 2020, período caracterizado por aumento da precipitação (82,6 mm) e manutenção de temperaturas elevadas (24,1°C). Nessa avaliação, a espécie representou aproximadamente 38% da cobertura no monocultivo, 38% no sistema com *M. oleifera*, 41% em *C. floribundus* e 18% em *S. macranthera*, demonstrando ampla expansão populacional em praticamente todos os tratamentos. Esse comportamento sugere forte resposta positiva da espécie ao aumento da disponibilidade hídrica associado às temperaturas elevadas, condições que favorecem o crescimento vegetativo de espécies perenes e estoloníferas. A literatura descreve *R. brasiliensis* como espécie adaptada a ambientes quentes e úmidos, com elevado potencial de propagação vegetativa e persistência em sistemas agrícolas perenes (Fontes *et al.*, 2022).

Do ponto de vista ecológico, os resultados sugerem que *R. brasiliensis* apresentou comportamento oportunista dentro da comunidade infestante, respondendo positivamente a condições de maior umidade e temperaturas elevadas, mas com menor capacidade de manutenção da dominância quando submetida à competição com espécies mais agressivas, especialmente *P. hysterophorus* (Qaderi, 2023; Adkins; Shabbir, 2014). Sua maior ocorrência em determinados SAFs pode indicar que a redução temporária da dominância de *P. hysterophorus*, espécie reconhecidamente favorecida por elevada intensidade luminosa e altamente competitiva em ambientes abertos (Adkins; Shabbir, 2014; Matzrafi *et al.*, 2021), tenha favorecido a expansão de *R. brasiliensis* em nichos momentaneamente menos competitivos dentro da comunidade infestante.

A ocorrência de *B. plantaginea* foi pontual ao longo do período avaliado, sendo registrada de forma expressiva apenas na avaliação de janeiro de 2021, quando apresentou participação relevante na cobertura do solo em todos os sistemas de cultivo, especialmente nos tratamentos com *M. oleifera* e *S. macranthera*. Nesse período, a espécie apresentou maior representatividade relativa nesses tratamentos, enquanto no sistema com *C. floribundus* sua participação foi inferior.

Esse padrão pode ser explicado pela interação entre as condições climáticas registradas no período e as exigências ecofisiológicas da espécie. Em janeiro de 2021 foram observados os maiores valores de precipitação do período experimental (230,6 mm), associados à temperatura média de 23,9 °C, (Figura 26), condições altamente favoráveis ao estabelecimento de gramíneas anuais tropicais. Segundo Qaderi (2023), temperaturas elevadas associadas à elevada disponibilidade hídrica aceleram o

crescimento vegetativo e o acúmulo de biomassa de plantas daninhas, favorecendo especialmente espécies de rápido crescimento e alta eficiência fotossintética.

A resposta observada para *B. plantaginea* é coerente com sua biologia, uma vez que se trata de uma gramínea anual de metabolismo C4, adaptada a ambientes quentes, úmidos e de elevada luminosidade, apresentando rápida germinação e elevado crescimento inicial quando exposta a condições favoráveis de água e temperatura (Mesquita; Andrade; Pereira, 2013). Além disso, espécies da família Poaceae apresentam elevada capacidade de exploração superficial do solo e rápida resposta a pulsos de recursos ambientais, o que favorece sua emergência após eventos intensos de precipitação.

A menor participação relativa de *B. plantaginea* no sistema com *C. floribundus* sugere que o maior fechamento de dossel promovido por essa espécie arbórea pode ter restringido parcialmente o estabelecimento da gramínea. Segundo Carvalho (2003), *C. floribundus* é uma espécie pioneira, semicaducifólia e de rápido crescimento, apresentando elevado potencial de sombreamento e produção de biomassa foliar. Esse ambiente mais sombreado pode reduzir a incidência luminosa sobre a superfície do solo e limitar o desenvolvimento de gramíneas heliófitas, grupo no qual se enquadra *B. plantaginea* (Fontes *et al.*, 2022).

Por outro lado, a maior ocorrência observada nos sistemas com *M. oleifera* e *S. macranthera* sugere que esses tratamentos apresentaram menor restrição luminosa no período, possibilitando maior estabelecimento da espécie mesmo sob sistema arborizado. No caso de *M. oleifera*, a arquitetura de copa mais aberta e menor densidade de dossel podem ter permitido maior entrada de radiação solar nas entrelinhas, favorecendo espécies responsivas à luminosidade, como gramíneas anuais (Kamanga *et al.*, 2025).

A ausência de *B. plantaginea* nas avaliações subsequentes sugere que sua ocorrência esteve associada a uma janela específica de elevada disponibilidade hídrica e temperatura, característica típica de espécies oportunistas de emergência rápida. Após esse pico inicial, a intensificação da competição interespecífica com espécies dominantes da comunidade, especialmente *P. hystrophorus*, pode ter reduzido sua permanência nas avaliações posteriores, evidenciando sua baixa capacidade de manutenção da dominância em ambientes de elevada competição.

A ocorrência de *S. americanum* foi pontual ao longo do período avaliado, sendo registrada de forma expressiva apenas na avaliação de setembro de 2021. Nessa

ocasião, a espécie apresentou participação relativa de aproximadamente 12% no monocultivo, 8% no sistema com *M. oleifera*, 15% no sistema com *C. floribundus* e 10% no sistema com *S. macranthera*, demonstrando distribuição relativamente uniforme entre os tratamentos, porém com maior representatividade no SAF com *C. floribundus*.

Esse episódio de ocorrência coincidiu com condições de precipitação intermediária (50,6 mm) e temperatura média de 23,6 °C (Figura 26), ambiente potencialmente favorável ao estabelecimento de *S. americanum*. Segundo Qaderi (2023), temperaturas moderadas a elevadas associadas à adequada disponibilidade hídrica favorecem o estabelecimento de espécies dicotiledôneas herbáceas adaptadas a ambientes tropicais e subtropicais, como *S. americanum*, cujo crescimento vegetativo é intensificado sob essas condições.

A maior participação relativa de *S. americanum* no SAF com *C. floribundus* pode estar associada às condições microambientais promovidas por esse sistema, caracterizadas por maior heterogeneidade estrutural e por modificações no microclima das entrelinhas. Ambientes parcialmente sombreados podem favorecer o estabelecimento de espécies dicotiledôneas herbáceas com maior tolerância ao sombreamento moderado, como *S. americanum*, especialmente quando ocorre redução temporária da dominância de espécies mais agressivas da comunidade infestante (Wienhold; Goulao, 2023).

Além disso, a ocorrência isolada da espécie sugere comportamento oportunista e baixa persistência competitiva no sistema estudado, indicando que, embora a espécie provavelmente componha o banco de sementes da área, suas condições de estabelecimento favorável ocorreram apenas pontualmente durante o período experimental. Esse padrão é compatível com a dinâmica temporal de comunidades infestantes submetidas à variação ambiental e à competição interespecífica, nas quais determinadas espécies emergem apenas sob condições momentaneamente favoráveis de ambiente e competição (Forte *et al.*, 2018).

Do ponto de vista agrônomo, embora sua participação relativa tenha sido inferior à observada para espécies dominantes como *P. hysterophorus* e *R. brasiliensis*, a presença de *S. americanum* merece atenção em programas de manejo, uma vez que a espécie possui distribuição cosmopolita e elevada capacidade de colonização de áreas perturbadas (Carneiro; Irgang, 2005) Segundo Faria e Andrade (2024), *S. americanum* é uma das espécies identificadas em levantamentos

fitossociológicos de cafezais no Sul de Minas, exigindo métodos de controle eficientes para evitar sua propagação.

A ocorrência de *Amaranthus* spp. foi restrita às avaliações de julho e setembro de 2020, não sendo observada nas avaliações subsequentes, o que evidencia baixa persistência competitiva da espécie na comunidade infestante ao longo do período experimental. Em julho de 2020, *Amaranthus* spp. esteve ausente no monocultivo e no SAF com *S. macranthera*, enquanto apresentou participação relativa de 7,50% no SAF com *M. oleifera* e 1,25% no SAF com *C. floribundus*. Já em setembro de 2020, observou-se alteração nesse padrão, com aumento da participação relativa da espécie no monocultivo para 5,00%, manutenção de baixa ocorrência nos SAFs com *M. oleifera* e *C. floribundus* (1,25% em ambos) e ausência no SAF com *S. macranthera*.

Esse comportamento coincidiu com aumento da temperatura média do ar de 18,2 °C, em julho, para 24,4 °C, em setembro, associado à manutenção de baixa precipitação no período (12,2 mm), condições potencialmente favoráveis ao estabelecimento de espécies do gênero *Amaranthus*. Segundo Fontes *et al.* (2022), espécies desse gênero apresentam germinação favorecida por temperaturas elevadas e alta disponibilidade luminosa, sendo classificadas como plantas infestantes anuais, heliófitas e com sementes predominantemente fotoblásticas positivas. Adicionalmente, Rodrigues *et al.* (2022) destacam que representantes da família Amaranthaceae possuem metabolismo fotossintético C4, característica que confere elevada eficiência fisiológica em ambientes de alta radiação solar e temperatura, favorecendo seu estabelecimento em condições de pleno sol.

A maior participação relativa observada no monocultivo em setembro de 2020 reforça a associação de *Amaranthus* spp. com ambientes de maior exposição luminosa, enquanto sua baixa ocorrência ou ausência nos SAFs sugere que o sombreamento e a deposição de serapilheira podem ter limitado seu estabelecimento. De acordo com Nasiro (2024), a redução da incidência luminosa sobre a superfície do solo e a presença de cobertura morta em sistemas arborizados reduzem a emergência de espécies fotoblásticas positivas, especialmente aquelas dependentes de luz direta para germinação. Esse comportamento também é coerente com o caráter ruderal atribuído ao gênero *Amaranthus*, cujas espécies apresentam elevada capacidade de colonização de áreas abertas e perturbadas, com rápido ciclo de desenvolvimento e produção precoce de sementes (Carneiro; Irgang, 2005; Faria; Andrade, 2024).

A ausência de *Amaranthus* spp. nas avaliações posteriores sugere que, embora a espécie seja capaz de emergir rapidamente sob condições ambientais favoráveis, apresenta baixa capacidade de manutenção competitiva em comunidades infestantes mais densas e estruturadas. Esse padrão é compatível com a dinâmica sucessional descrita por Forte *et al.* (2018), segundo a qual espécies de rápida emergência e colonização inicial tendem a ocupar nichos temporariamente disponíveis, mas são progressivamente substituídas por espécies de maior persistência e competitividade à medida que aumenta a complexidade estrutural da comunidade vegetal.

Assim, os resultados indicam que *Amaranthus* spp. apresentou comportamento oportunista e fortemente dependente de elevada disponibilidade luminosa e temperatura para seu estabelecimento, com ocorrência pontual e reduzida persistência competitiva dentro da comunidade infestante do cafeeiro.

7.6.3 Massa Seca de Plantas Daninhas

A análise da massa seca de plantas daninhas nas entrelinhas revelou variações temporais e entre sistemas de cultivo (Tabela 10). Em quatro dos sete períodos avaliados (setembro de 2020, janeiro, maio e setembro de 2021), não foram observadas diferenças entre os tratamentos, indicando que, mesmo sob distintos arranjos estruturais de cultivo, a produção de biomassa manteve-se semelhante. Esse comportamento pode estar relacionado à elevada plasticidade ecológica das plantas daninhas, que apresentam ampla capacidade de adaptação às variações ambientais e rápida resposta a condições favoráveis de temperatura e disponibilidade hídrica (Qaderi, 2023). Assim, a presença de espécies arbóreas nos SAFs, embora possa modificar a estrutura do ambiente, não foi suficiente para promover diferenças consistentes na produção de massa seca ao longo de todo o período avaliado.

Tabela 10 – Massa seca de plantas daninhas nas entrelinhas de cafeeiros em monocultivo e em sistemas agroflorestais, no período de julho de 2020 a setembro de 2021. Londrina, PR.

Tratamento	Massa seca (g/m ⁻²)									
	Jul/2020	Set/2020	Nov/2020	Jan/2021	Mar/2021	Mai/2021	Set/2021	Média		
Monocultivo	105,57*	a 160,08	a 236,95	a 221,60	a 338,30	a 133,72	a 240,75	a 205,28	a	
<i>Moringa oleifera</i>	26,39	ab 154,91	a 234,62	a 198,68	a 283,82	ab 182,84	a 237,60	a 188,41	a	
<i>Croton floribundus</i>	15,81	b 42,42	a 115,46	b 133,76	a 219,37	bc 104,72	a 160,05	a 113,08	b	
<i>Senna macranthera</i>	48,39	ab 151,60	a 245,38	a 144,29	a 196,11	c 116,28	a 212,20	a 159,18	ab	
CV (%)	41,45	33,59	11,50	15,13	7,98	35,85	13,01	7,92		

*Médias seguidas de mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Dados transformados por $\sqrt{(2x+1)}$.

Fonte: A autora (2026).

Nos períodos em que houve diferença significativa entre os tratamentos, destacou-se principalmente o SAF com *C. floribundus*, que apresentou as menores produções de massa seca de plantas daninhas. Em julho de 2020, esse tratamento apresentou redução de aproximadamente 85% em relação ao monocultivo. Padrão semelhante foi observado em novembro de 2020, quando a redução foi de aproximadamente 51%, e em março de 2021, período em que os SAFs com *C. floribundus* e *S. macranthera* apresentaram produções cerca de 35% e 42% inferiores ao monocultivo, respectivamente. Esses resultados corroboram estudos que demonstram que o sombreamento promovido por espécies arbóreas reduz a taxa de incremento da biomassa de plantas daninhas em cafezais, especialmente em sistemas arborizados com maior fechamento de dossel (Nestel; Altieri, 1992; Silva *et al.*, 2006).

Considerando todos os tratamentos, a menor produção total de massa seca foi registrada em julho de 2020 (196,16 g m⁻²), período correspondente ao inverno, enquanto a maior produção ocorreu em março de 2021 (1.037,60 g m⁻²), durante o verão, evidenciando forte influência sazonal sobre o crescimento das plantas daninhas. Esse padrão está de acordo com a literatura, que aponta maior emergência, germinação e desenvolvimento vegetativo de plantas daninhas em condições de temperaturas elevadas e maior disponibilidade hídrica, especialmente entre primavera e verão (Fialho *et al.*, 2010; Qaderi, 2023).

Na média geral do período avaliado, os maiores valores de massa seca foram observados no monocultivo (205,28 g m⁻²) e no SAF com *M. oleifera* (188,41 g m⁻²), enquanto os menores valores ocorreram nos SAFs com *C. floribundus* (113,08 g m⁻²) e *S. macranthera* (159,18 g m⁻²). Esse padrão pode estar associado às diferenças estruturais entre as espécies arbóreas utilizadas. *M. oleifera* apresenta arquitetura de copa mais aberta e menor densidade foliar, característica típica de espécies decíduas de rápido crescimento (BANIA *et al.*, 2023), enquanto *C. floribundus* apresenta comportamento semicaducifólio e copa mais adensada (Carvalho, 2003), e *S. macranthera* apresenta copa arredondada e relativamente densa (Oliveira; Garcia, 2021). Kumar, Singh e Dhyani (2012) destacam que espécies arbóreas com copas mais abertas permitem maior transmitância luminosa para a vegetação subjacente, favorecendo o desenvolvimento de plantas herbáceas nas entrelinhas.

Entretanto, a redução da massa seca de plantas daninhas não deve ser interpretada exclusivamente como um efeito positivo. Embora essas plantas sejam

tradicionalmente associadas à competição por água, luz e nutrientes (Ronchi *et al.*, 2003; Canuto, 2020), evidências recentes indicam que a presença controlada de biomassa vegetal nas entrelinhas pode desempenhar funções ecológicas relevantes no agroecossistema cafeeiro. Zaidan *et al.* (2022) demonstraram que o acúmulo moderado de matéria seca sobre o solo contribui para a conservação da umidade superficial, redução da evaporação e manutenção da produtividade do cafeeiro em períodos de restrição hídrica. Adicionalmente, Fontes *et al.* (2022) destacam que a cobertura vegetal espontânea, quando adequadamente manejada, pode atuar na proteção física do solo, mitigação da erosão e incremento do teor de matéria orgânica. Nesse contexto, os menores valores de massa seca observados nos SAFs indicam menor pressão competitiva das plantas daninhas, mas também reforçam a necessidade de um manejo equilibrado, que considere simultaneamente a supressão de espécies agressivas e a manutenção de cobertura vegetal funcional no sistema produtivo.

8 CONCLUSÃO

O sistema de cultivo exerce papel relevante na dinâmica das plantas daninhas em cafeeiros, podendo influenciar tanto a cobertura do solo quanto o acúmulo de biomassa nas entrelinhas, a depender das espécies arbóreas presentes e das condições ambientais.

Os SAFs podem apresentar maior capacidade de suprimir plantas daninhas em comparação ao monocultivo, a depender das espécies arbóreas utilizadas e das condições ambientais, evidenciando o efeito regulador do sombreamento e da deposição de resíduos vegetais sobre o microambiente do solo.

O monocultivo favorece maior emergência e desenvolvimento de plantas daninhas, reforçando a dependência da luminosidade e das condições climáticas para a expressão do potencial infestante dessas espécies.

Entre os SAFs avaliados, os cafeeiros arborizados com *C. floribundus* mostraram maior potencial para limitar o crescimento de plantas daninhas, sugerindo eficiência diferenciada no manejo natural da comunidade infestante

A redução da biomassa de plantas daninhas em alguns SAFs, especialmente nos meses de maior sombreamento e acúmulo de resíduos vegetais, como maio e setembro, pode contribuir para diminuir a pressão competitiva sobre o cafeeiro e, em

determinadas situações, reduzir a necessidade de intervenções mecânicas e químicas, favorecendo sistemas produtivos mais sustentáveis.

Estudos futuros devem aprofundar a análise das interações funcionais entre espécies arbóreas e plantas daninhas, considerando mecanismos como alelopatia, ciclagem de nutrientes, composição florística e serviços ecossistêmicos associados aos SAFs.

REFERÊNCIAS

- ADKINS, S.; SHABBIR, A. Biology, ecology and management of the invasive parthenium weed (*Parthenium hysterophorus* L.). **Pest Management Science**, v. 70, n. 7, p. 1023-1029, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1002/ps.3708>.
- ARAÚJO, J. O. *et al.* Selection of superior *Senna macranthera* seeds, carbon stock, and seedling survival, and costs for habitat restoration. **Sustainability**, v. 15, n. 13, p. 9875, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15139875>.
- AUGUSTO, D. C. C. *et al.* Utilização de esgotos domésticos tratados através de um sistema biológico na produção de mudas de *Croton floribundus* Spreng. (capixingui) e *Copaifera langsdorffii* Desf. (copaíba). **Revista Árvore, Viçosa**, v. 27, n. 3, p. 335-342, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000300009>.
- BANIA, J. K. *et al.* Integrating *Moringa oleifera* and *Moringa stenopetala* in agroforestry for adaptation and mitigation of climate change in Asia and Africa. In: **Agroforestry for sustainable intensification of agriculture in Asia and Africa**: Springer, 2023. p. 719-737. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-19-4602-8_22
- BARMAN, A. *et al.* Synergizing sustainability: a critical review on harnessing agroforestry for biomass, carbon sequestration, and water-food-energy nexus. **Energy, Ecology and Environment**, p. 1-35, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40974-024-00336-6>
- CANUTO, R. S. O. *et al.* Levantamento fitossociológico de plantas daninhas em área de produção de café catuaí amarelo. **Revista Inova Ciência & Tecnologia**, v. 6, n. 1, p. 18-23, 2020. Disponível em: <https://periodicos.iftm.edu.br/index.php/inova/article/view/1017>. Acesso em: 8 abr. 2026
- CARNEIRO, A. M.; IRGANG, B. E. Origem e distribuição geográfica das espécies ruderais da Vila de Santo Amaro, General Câmara, Rio Grande do Sul. **Iheringia, Série Botânica**, v. 60, n. 2, p. 175-188, 2005. Disponível em: <https://isb.emnuvens.com.br/iheringia/article/view/194>. Acesso em: 8 abr. 2026.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2014. v. 5, p. 497-505. Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/handle/doc/305634>
- CARVALHO, L. B. *et al.* Detection of sourgrass (*Digitaria insularis*) biotypes resistant to glyphosate in Brazil. **Weed Science**, v. 59, n. 2, p. 171-176, 2011. DOI: <http://doi.org/10.1614/ws-d-10-00113.1>

FARIA, P. H. O.; ANDRADE, P. P. Eficiência de métodos de controle na população de plantas daninhas na cultura do café. **Revista Agroveterinária do Sul de Minas**, v. 6, n. 3, p. 154-178, 2024. Disponível em: <https://www.periodicos.unis.edu.br/agrovetsulminas/article/view/958>. Acesso em: 8 abr. 2026.

FERREIRA, D. F. Sisvar: um guia dos seus procedimentos de comparações múltiplas Bootstrap. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 38, n. 2, p. 109-112, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542014000200001>

FIALHO, C. M. T. *et al.* Competição de plantas daninhas com a cultura do café em duas épocas de infestação. **Planta daninha**, v. 28, n. spe, p. 969-978, 2010. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582010000500005>

FIALHO, C. M. T. *et al.* Interferência de plantas daninhas sobre o crescimento inicial de *Coffea arabica*. **Planta Daninha**, v. 29, p. 137-147, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582011000100016>

FIALHO, C. M. T. *et al.* Teor foliar de nutrientes em plantas daninhas e de café cultivadas em competição. **Planta daninha**, v. 30, p. 65-73, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582012000100008>

FONTES, D. R. *et al.* Integrated weed management in coffee for sustainable agriculture: a practical Brazilian approach. In: *New insights in herbicide science*. **IntechOpen**, 2022. DOI: <https://doi.org/10.5772/intechopen.108881>.

FORTE, C. T. *et al.* Cultivation systems, vegetable soil covers and their influence on the phytosociology of weeds. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 36, p. 1-15, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582018360100099>

HENRIQUE, N. S.; MALTONI, K. L.; FARIA, G. A. Litterfall decomposition of coffee shaded with *Tectona grandis* or in full sun. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 26, n. 2, p. 91-96, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v26n2p91-96>

IDR-PARANÁ. **Atlas climático do Estado do Paraná**: normal climatológica de temperatura e precipitação. Londrina: IDR-Paraná.

KAMANGA, B. M. *et al.* Allelopathic effects of *Moringa oleifera* Lam. on cultivated and weed species: implications for sustainable weed management. **Agronomy**, v. 15, n. 8, p. 1766, 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy15081766>.

KOUTOULEAS, A. *et al.* Shaded-coffee: A nature-based strategy for coffee production under climate change? A review. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 6, p. 877476, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2022.877476>.

KUMAR, B. M.; SINGH, A. K.; DHYANI, S. K. South Asian agroforestry: traditions, transformations, and prospects. *In*: NAIR, P. K. R.; GARRITY, D. (ed.). **Agroforestry: the future of global land use**. Dordrecht: Springer, 2012. p. 359-389. (Advances in Agroforestry, v. 9).

MARTINS, J. M. M.; ANDREANI JUNIOR, R. Impactos das plantas daninhas nas culturas agrícolas e seus métodos de controle. **Revista VIDA: Exatas e Ciências da Terra**, v. 1, n. 2, p. 34-54, 2023. DOI: <https://doi.org/10.63021/issn.2965-8861.v1n2a2023.151>

MATOS, C. C. *et al.* Características fisiológicas do cafeeiro em competição com plantas daninhas. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 29, n. 5, p. 1111-1119, 2013.

MATZRAFI, M. *et al.* Distribution and biology of the invasive weed *Parthenium hysterophorus* L. in Israel. **Frontiers in Agronomy**, v. 3, p. 639991, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3389/fagro.2021.639991>

MESQUITA, M. L. R.; ANDRADE, L. A.; PEREIRA, W. E. Floristic diversity of the soil weed seed bank in a rice growing area of Brazil: in situ and ex situ evaluation. **Acta Botanica Brasilica**, v. 27, n. 3, p. 465-471, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0102-33062013000300001>

NASIRO, K. The benefits of agroforestry coffee production systems: a review. **World Journal of Food Science and Technology**, New York, v. 8, n. 4, p. 86-105, 2024. DOI: <https://doi.org/10.11648/j.wjfst.20240804.13>

NESTEL, D. *et al.* The weed community of Mexican coffee agroecosystems: effect of management upon plant biomass and species composition. **Acta Oecologica**, v. 13, n. 6, 1992.

OLIVEIRA, L. G. R.; GARCIA, F. C. P. *Senna* (Leguminosae-Caesalpinioideae) in Minas Gerais state, Brazil. *Rodriguésia*, Rio de Janeiro, v. 72, p. e01482019, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/2175-7860202172104>

QADERI, M. M. Environmental regulation of weed seed dormancy and germination. **Seeds**, v. 2, n. 3, p. 259-277, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/seeds2030020>

PAREEK, A. *et al.* *Moringa oleifera*: an updated comprehensive review of its pharmacological activities, ethnomedicinal, phytopharmaceutical formulation, clinical, phytochemical, and toxicological aspects. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 24, n. 3, p. 2098, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijms24032098>.

PIATO, K. *et al.* Organic farming practices and shade trees reduce pest infestation and promote quality in coffee agroecosystems. **Life**, v. 11, n. 5, p. 413, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/life11050413>.

RICCI, M. S. F.; COCHETO JUNIOR, D. G.; ALMEIDA, F. F. D. Condições microclimáticas, fenologia e morfologia externa de cafeeiros em sistemas arborizados e a pleno sol. **Coffee Science**, v. 11, n. 1, p. 1-12, 2013. Disponível em: <http://www.sbicafe.ufv.br/handle/123456789/7992>. Acesso em: 8 abr. 2026.

RODRIGUES, R. J. A.; CARVALHO, G. R.; GONÇALVES, A. H.; CARVALHO, J. P. F.; ALCÂNTARA, E. N.; RESENDE, L. S. Phytosociology of weeds on Cerrado Mineiro coffee growing farms. **Advances in Weed Science**, v. 40, p. e020220029, 2022. DOI: <https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2022;40:00013>

RONCHI, C. P.; TERRA, A. A.; SILVA, A. A. Growth and nutrient concentration in coffee root system under weed species competition. **Planta daninha**, v. 25, n. 4, p. 679-687, 2007. <https://doi.org/10.1590/S0100-83582007000400004>

RONCHI, C. P.; SILVA, A. A. Effects of weed species competition on the growth of young coffee plants. **Planta Daninha**, v. 24, p. 415-423, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582006000300001>

SANTOS, H. G. *et al.* **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 5. ed. Brasília: Embrapa, 2018.

Disponível em: <https://www.agroapi.cnptia.embrapa.br/portal/assets/docs/SiBCS-2018-ISBN-9788570358004.pdf>. Acesso em: 8 abr. 2026.

SILVA, S. O. *et al.* Diversidade e frequência de plantas daninhas em associações entre cafeeiros e grevileas. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE PESQUISAS CAFEEIRAS, 32., 2006, Poços de Caldas. **Anais [...]**. Brasília, DF: Embrapa Café, 2006. p. 303-304.

Disponível em: <https://sbicafe.ufv.br/bitstreams/dae317af-f5e5-48af-8192-871acf1d0177/download>

STAVIER, C.; JUVENTIA, S.; NAVARRETE, E.; NAVARRETE, L.; SEPÚLVEDA, N.; BARRIOS, M. Long-term response of groundcover components to organic and conventional weed control in shaded and open-sun coffee in Nicaragua. **Crop Protection**, v. 133, p. 105150, 2020. DOI:

<https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105150>

TEFERI, D. Coffee weed management review in South West Ethiopia. **International Journal of Agriculture and Biosciences**, v. 6, n. 5, p. 252-257, 2017. Disponível em: <https://ijagbio.com/pdf-files/volume-6-no-5-2017/252-257.pdf>

WIENHOLD, K.; GOULAO, L. F. The embedded agroecology of coffee agroforestry: a contextualized review of smallholder farmers' adoption and resistance.

Sustainability, v. 15, n. 8, p. 6827, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15086827>

ZAIDAN, Ú. R. *et al.* Productivity and grain size of coffee grown in different weed management systems. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 44, p. e55692, 2022. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v44i1.55692>