

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Sistemas de
Produção Agrícola Familiar



TESE

**CONDIÇÕES AMBIENTAIS EM SISTEMAS AGROFLORESTAL E A PLENO
SOL E SEUS EFEITOS SOBRE AS CARACTERÍSTICAS FITOTÉCNICAS DO
MILHO E DO FEIJÃO**

VALERIA POHLMANN

Pelotas, 2024

VALERIA POHLMANN

**CONDIÇÕES AMBIENTAIS EM SISTEMAS AGROFLORESTAL E A PLENO
SOL E SEUS EFEITOS SOBRE AS CARACTERÍSTICAS FITOTÉCNICAS DO
MILHO E DO FEIJÃO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Edgar Ricardo Schöffel

Coorientador: Dr. Eberson Diedrich Eicholz

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

P748c Pohlmann, Valeria

Condições ambientais em sistemas agroflorestal e a pleno sol e seus efeitos sobre as características fitotécnicas do milho e do feijão [recurso eletrônico] / Valeria Pohlmann ; Edgar Ricardo Schöffel, orientador ; Eberson Diedrich Eicholz, coorientador. — Pelotas, 2024.

183 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Sistema de Produção Agrícola Familiar, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Agricultura familiar. 2. Déficit hídrico. 3. Sementes orgânicas. 4. Sombreamento. I. Schöffel, Edgar Ricardo, orient. II. Eicholz, Eberson Diedrich, coorient. III. Título.

CDD 630.2745

VALERIA POHLMANN

CONDIÇÕES AMBIENTAIS EM SISTEMAS AGROFLORESTAL E A PLENO
SOL E SEUS EFEITOS SOBRE AS CARACTERÍSTICAS FITOTÉCNICAS DO
MILHO E DO FEIJÃO

Tese aprovada, como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutor em Agronomia, Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da Defesa: 25 de novembro de 2024

Banca examinadora:

Prof. Dr. Edgar Ricardo Schöffel (Orientador), Doutor em Agronomia pela Universidade Estadual Paulista.

Prof. Dr. Roberto Trentin, Doutor em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Santa Maria.

Prof. Dr. Irajá Ferreira Antunes, Doutor em Genética e Melhoramento de Plantas pela Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz

Prof. Dr. Luis Osmar Braga Schuch, Doutor em Agronomia pela Universidade Federal de Pelotas

DEDICATÓRIA

*Aos meus pais Sergio Valdir Pohlmann e Nelci Olga Pohlmann por todo o apoio,
incentivo e amor.*

*Aos meus orientadores Edgar Ricardo Schöffel e Ebersson Diedrich Eicholz por toda a
ajuda em superar os desafios dessa proposta de tese.*

Agradecimentos

A minha família, em especial aos meus pais, Sergio e Nelci, que me passaram o amor pela agricultura, sempre me apoiando nos estudos e me ensinando a ser forte para superar todos os obstáculos. Agradeço a toda minha família, em especial a Vanessa e Lavínia por toda a força, paciência e carinho demonstrado ao longo dessa trajetória. A todos que torceram e me ajudaram, muito obrigada!

Ao meu companheiro, Tarcísio Strieder, por todo o suporte ao longo dessa jornada. Muito obrigada por ser essa pessoa parceira, que não hesitou em ajudar a capinar o experimento sob o sol de verão, irrigar as plantas ao sábado e preparar uma comida com muito carinho nos momentos difíceis! Obrigada por formar comigo uma família em Pelotas, e por todo o apoio emocional que me dedicastes. Muito obrigada a ti e a tua família, Gelci e Tarcísio, pela acolhida.

Aos meus orientadores, professor Dr. Edgar Ricardo Schöffel e Dr. Ebersson Diedrich Eicholz, pelas orientações, ensinamentos e conselhos durante o doutorado, e também por toda paciência, compreensão e flexibilidade. Muito obrigada pela amizade e por tornarem esse doutorado rico em aprendizado concomitante a muitas risadas. Obrigada por tornarem possível esse meu sonho de ser doutora e avançar no conhecimento!

Ao Gustavo Scheer e Eduarda Franz por toda ajuda durante os experimentos. Sem vocês eu não conseguiria coletar os dados e conduzir os experimentos. Vocês foram essenciais! Muito obrigada pelas risadas, companheirismo, dedicação e pelas maravilhosas batatas fritas. Muito obrigada!

Agradecimento especial também ao Matheus, Davi e Cristino, que, em ao meio às próprias avaliações, me socorreram quando o tempo foi curto para dar conta de tantas demandas! Agradeço também a Mônica, que além de estar ao meu lado em todas as colheitas de milho, se tornou uma amiga valiosa, ajudando-me a superar cada desafio. Muito obrigada!

Agradeço também ao Dr. Ernestino Guarino e aos colegas de trabalho do grupo de pesquisa em Manejo e Restauração de Vegetação Nativa (MAREV), Eric, Marcos e Arthur, que me ajudaram nas podas da agrofloresta e me apoiaram em muitos momentos! Agradecimento especial aos meus amigos Artur Molina, Frederico Mayer e Bruno DelPino por toda irmandade, companheirismo, apoio e conselhos que vão se estender

para além da Pós-Graduação, muito obrigada por todos os ensinamentos acadêmicos e de vida!

A toda a equipe da Embrapa Cascata que me proporcionou muito aprendizado, sempre com amizade e respeito, em especial ao Paulo, Beto, Osmar, Alexandre, Artur, Mauro, e ao sempre lembrado Geraldo. Muito obrigada a todos os pesquisadores que me fizeram sentir parte da equipe, em especial ao Wolff, Irajá e Bevilaqua, que me transmitiram seus amores pelas abelhas, feijões e sementes crioulas! Muito obrigada a todas e todos funcionários por toda a ajuda na implantação e manutenção dos experimentos, e especialmente pelas conversas, brincadeiras e risadas que deixaram o verão com 40°C divertido! Em especial, agradeço ao Rudi, que além de sempre me ajudar em todas as etapas da pesquisa, da semeadura a análise dos grãos, por ter se tornado um grande amigo! Obrigada Cassia por todo teu carinho e por sempre cuidar dos animais da estação! Vocês são muito especiais para todos que passam pela unidade Cascata!

Ao Grupo de Agrometeorologia da UFPel por todo o suporte para a realização dos experimentos!

Ao universo pela oportunidade de vivenciar toda essa trajetória e aos meus filhos de quatro patas por todo o amor e paz!

A Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) Cascata pelo fornecimento das cultivares estudadas e pela área cedida para realização do experimento.

Aos avaliadores desta dissertação, Roberto Trentin, Irajá Antunes, Helvio Casalinho e Luis Schuch, agradeço imensamente pelas contribuições a fim de aprimorar essa pesquisa!

A Universidade Federal de Pelotas e ao Programa de Pós-graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar pela oportunidade do curso de doutorado.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de doutorado.

A todos que de alguma forma contribuíram para a realização desta tese, o meu sincero agradecimento.

Muito obrigada!

“Um pingo de chuva, um dia, se transformará em chuvisco. ”

(Ana Maria Primavesi)

Resumo

POHLMANN, Valeria. **CONDIÇÕES AMBIENTAIS EM SISTEMAS AGROFLORESTAL E A PLENO SOL E SEUS EFEITOS SOBRE AS CARACTERÍSTICAS FITOTÉCNICAS DO MILHO E DO FEIJÃO**. 183 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Produção Agrícola Familiar, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

O milho e o feijão são alimentos essenciais para garantir a soberania e segurança alimentar da população brasileira. Contudo, o modelo agrícola baseado no monocultivo, com uso intensivo de insumos sintéticos e agrotóxicos, gera impactos negativos aos ambientes e à saúde. O crescente interesse por produtos orgânicos tem impulsionado a busca por sistemas de cultivo mais sustentáveis, como consórcios e agroflorestas. No entanto, ainda são escassos os estudos sobre o consórcio de milho e feijão em sistemas agroflorestais (SAF). Este estudo objetiva comparar o crescimento e a produtividade de plantas de milho e de feijão em cultivo solteiro e consorciados em sistema agroflorestal e em área a pleno sol. Foram conduzidos dois experimentos, em 2021 e 2022 em um SAF implantado em 2013 e em cultivo a pleno sol (PS). Foram utilizadas as cultivares de milho 'BRS 019TL' e 'BRS 015FB' e a de feijão, a 'BRS Paisano'. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso contendo os tratamentos: dois ambientes de cultivo (SAF e PS), três arranjos de cultivo (solteiro, consórcio 1:1 e 2:2) e duas cultivares de milho ('BRS 019TL' e 'BRS 015FB'). As análises abrangeram a caracterização micrometeorológica nos ambientes e seus efeitos no crescimento das plantas, produtividade de grãos, qualidade das sementes e parâmetros de uso da terra. Os dados foram analisados estatisticamente com testes de variância, teste t e correlações no software R. Os resultados mostram que o SAF tende a apresentar menores temperaturas do ar e evapotranspiração potencial dos cultivos como consequência da menor oferta de radiação solar, ocasionando um maior crescimento de estatura e área foliar das plantas e menor produtividade em comparação ao ambiente PS. O consórcio de milho e feijão mostrou-se viável, embora o feijão tenha apresentado maior potencial produtivo quando cultivado em solteiro. Sob intenso déficit hídrico os consórcios apresentam uso mais eficiente de terra no SAF do que a PS. Apesar da menor oferta de radiação solar nas linhas próximas às arbóreas, a distância influenciou apenas a produtividade do feijão, com maiores valores nas linhas centrais. Entre as cultivares de milho, a 'BRS 019TL' apresenta maiores valores aos parâmetros de crescimento e de produção. O sombreamento proporcionado pela agrofloresta e o cultivo consorciado aumenta a primeira contagem do teste de germinação do milho. Portanto, o SAF surge como uma estratégia produtiva promissora, especialmente diante do aumento de intempéries meteorológicas que demandam sistemas agrícolas de cultivo resilientes e conservadores dos agroecossistemas naturais. Além disso, embora a produção de grãos no SAF seja menor devido à redução de oferta energética, a qualidade das sementes de milho produzidas foi superior, ressaltando o potencial desse sistema para a produção de sementes orgânicas.

Palavras-chave: agricultura familiar; déficit hídrico; sementes orgânicas; sombreamento.

Abstract

POHLMANN, Valeria. **ENVIRONMENTAL CONDITIONS IN AGROFORESTRY SYSTEMS AND FULL SUN AND THEIR EFFECTS ON THE PHYTOTECHNICAL CHARACTERISTICS OF MAIZE AND COMMON BEAN.** 183 f. Thesis (Doctorate degree in Agronomy) – Graduate Program in Family Farming Production Systems, Federal University of Pelotas, 2024.

Corn and common bean are essential foods for ensuring the sovereignty and food security of the Brazilian population. However, the agricultural model based on monoculture, with intensive use of synthetic inputs and pesticides, generates environmental and health impacts. The growing interest in organic products has driven the search for more sustainable farming systems, such as intercropping and agroforestry. Nevertheless, studies on corn-bean intercropping in agroforestry systems (AFS) are still scarce. This study aims to compare the growth and productivity of corn and bean plants grown individually and intercropped in agroforestry systems and full-sun cultivation. Two experiments were conducted in 2021 and 2022, in an AFS established in 2013 and a full-sun (FS) cultivation area. The study used the corn cultivars 'BRS 019TL' and 'BRS 015FB' and the bean cultivar 'BRS Paisano'. The experimental design consisted of randomized blocks with treatments comprising two cultivation environments (AFS and FS), three planting arrangements (sole, 1:1 intercrop, and 2:2 intercrop), and two corn cultivars ('BRS 019TL' and 'BRS 015FB'). Analyses included micrometeorological characterization of the environments and their effects on plant growth, productivity, seed quality, and land-use efficiency parameters. Statistical analyses were performed using variance tests, t-tests, and correlations in R software. The results indicate that the AFS generally exhibits lower air temperatures and potential evapotranspiration due to reduced solar radiation, promoting greater plant height and leaf area growth but lower productivity compared to the FS environment. Corn-bean intercropping proved viable, although beans showed higher productive potential when grown individually. Under intense water deficit conditions, intercropping demonstrated more efficient land use in the AFS compared to FS. Despite the reduced solar radiation near tree rows, the distance only influenced bean productivity, which was higher in central rows. Among the corn cultivars, 'BRS 019TL' exhibited superior growth and yield parameters. The shading provided by the agroforestry system and intercropping increased the first count in the corn germination test. Therefore, AFS emerges as a promising productive strategy, especially considering the growing meteorological challenges that require resilient and agroecologically sustainable farming systems. Moreover, although grain production in AFS is lower due to reduced energy availability, the quality of corn seeds produced was higher, highlighting the potential of this system for organic seed production.

Keywords: family farming; water deficit; organic seeds; shading.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Imagem das áreas experimentais na Embrapa Clima Temperado, Unidade Experimental Cascata onde foram conduzidos os experimentos. Pelotas, RS.....	51
Figura 2	Imagens das áreas experimentais, sistema agroflorestal (A) e pleno sol (B), durante o preparo do solo e posteriormente com as graníferas (C) e (D), respectivamente. Pelotas, RS.....	52
Figura 3	Sementes das cultivares BRS 019 TL (A), BRS 015FB (B) e BRS Paisano (C). Pelotas, RS.....	54
Figura 4	Semeadura com saraquá e capina manual do experimento. Pelotas, RS.....	55
Figura 5	Estrutura para espantar pássaros durante o estabelecimento do experimento. Pelotas, RS.....	56
Figura 6	Estação meteorológica automática EMA1 instalada no interior do sistema agroflorestal. Pelotas, RS.....	58
Figura 7	Medição da radiação solar global instantânea com piranômetro portátil (A) e medição da temperatura foliar com um termômetro digital (B). Pelotas, RS.....	59
Figura 8	Medição da estatura (A), diâmetro da haste (B) e comprimento do folíolo central do trifólio para estimar área foliar da planta do feijão (C). Pelotas, RS.....	61
Figura 9	Medição do número de vagens (A) e espigas (B), número de grãos por vagem (C), diâmetro da espiga (D) peso dos grãos por linha de feijão (E) e de milho (F). Pelotas, RS.....	62
Figura 10	Teste de germinação nas sementes de milho e de feijão produzidas no sistema agroflorestal e a pleno sol. Pelotas, RS.....	63
Figura 11	Temperaturas médias (A, E), máximas e mínimas (B, F) diurnas (C, G) e noturnas (D, H) nos cultivos a pleno sol (PS) e sistema	

	agroflorestal (SAF) para as safras de 2021/22 (A, B, C, D) e 2022/23 (E, F, G, H). Pelotas, RS.....	73
Figura 12	Temperatura média horária ao longo dos dias na safra 2021/22 (A) e 2022/23 (B) para os ambientes de cultivo a pleno sol (PS) e sistema agroflorestal (PS). Pelotas, RS.....	76
Figura 13	Radiação solar global (Rs) e radiação fotossinteticamente ativa (RFA) para a safra de 2021/22 no cultivo a pleno sol (PS) (A), RFA no PS e no sistema agroflorestal (SAF) em 2022/23 (B) e Rs no PS e SAF em 2022/23 (C). Pelotas, RS.....	84
Figura 14	Precipitação pluvial (PP) e evapotranspiração de referência (ETo) acumulados em cada decêndio (D) em sistemas de produção a pleno sol (PS) e agroflorestal (SAF), na safra 2021/22 (A) e 2022/23 (B). Pelotas, RS.....	86
Figura 15	- Representação gráfica do espaçamento das entrelinhas dos arranjos solteiros de milho e feijão, e seus consórcios 1:1 e 2:2. Pelotas, RS.....	92
Figura 16	Temperatura do ar média e radiação solar global para os ambientes sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) na safra 2021/2022 (A) e 2022/2023 (B) e representação gráfica simplificada do balanço hídrico sequencial para as safras 2021/2022 (C) e 2022/2023 (D). TL: milho 'BRS 019TL', FB: milho 'BRS 015FB', B: feijão 'BRS Paisano'. Pelotas, RS.....	96
Figura 17	Imagens da localização do experimento e representação do distanciamento das entrelinhas dos cultivos de milho e de feijão das arbóreas no sistema agroflorestal. Pelotas, RS.....	115
Figura 18	Diferença entre a precipitação pluvial e evapotranspiração de cultivo (P-ETc) para o milho e feijão na safra 2021/2022 (A) e safra 2022/2023 (B) cultivados em Sistema Agroflorestal. Pelotas, RS.....	121
Figura 19	Radiação solar global em cultivos agroflorestal (SAF) e área a	

	pleno sol em condições de dias nublados e ensolarados no pendoamento do milho (A) e na floração do feijão (B). Pelotas, RS.....	122
Figura 20	Coeficiente de extinção do milho (A) e do feijão (C) e eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa do milho (B) e do feijão (D) em diferentes linhas de cultivo, correspondentes a distâncias das linhas arbóreas no sistema agroflorestal para dia nublado e dia ensolarado. Cultivares de milho BRS 019TL (TL) e BRS 015FB (FB). Letras minúsculas diferem as distâncias das linhas arbóreas e maiúsculas entre cultivares de milho por Tukey ($p < 0,05$). Ns: não significativo. Pelotas, RS.....	125
Figura 21	Gráfico das variáveis na análise de componentes principais no milho em 2021/22 (A), milho em 2022/23 (B), feijão em 2021/22 (C) e feijão em 2022/23 (D). Pelotas, RS.....	144
Figura 22	Espigas das cultivares BRS 019TL e BRS 015FB, e plantas e vagens da cultivar BRS Paisano colhidas no ambiente a pleno sol (PS) e sistema agroflorestal (SAF). Pelotas, RS.....	144
Figura 23	Peso de 1000 sementes das cultivares de milho BRS 019TL (TL) e BRS 015FB (FB) conduzidos em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) em cultivo solteiro (S) ou consorciação com o feijão 'BRS Paisano' (C) na safra 2021/22 (A) e 2022/23 (B) e peso de 1000 sementes do feijão para os ambientes, consorciação e arranjos de cultivo 1:1 e 2:2 na safra 2021/22 (C) e 2022/23 (D). Pelotas, RS.....	153

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Escala fenológica do milho. Pelotas, RS.....	25
Tabela 2	Escala fenológica do feijão. Pelotas, RS.....	28
Tabela 3	Nome e estatura das espécies arbóreas do sistema agroflorestal. Pelotas, RS.....	51
Tabela 4	Tratamentos avaliados nos ambientes de cultivo. Pelotas, RS.....	53
Tabela 5	Diagnóstico para acidez do solo e calagem para os ambientes pleno sol (PS) e sistema agroflorestal (SAF) em 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.....	54
Tabela 6	Temperatura foliar (°C) do milho 'BRS 019TL' e 'BRS 015FB' e do feijão 'BRS Paisano' cultivados em sistema agroflorestal (SAF) e em área a pleno sol (PS) medida em dias ensolarados (11/01/2022 e 14/12/2022) e nublados (08/12/2022 e 1/01/2023). Pelotas, RS.....	82
Tabela 7	Valores do teste F obtido na análise de variância para as variáveis de produção e de crescimento e seus coeficientes de variação (C.V., %) para as cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) e do feijão 'BRS Paisano'. Pelotas, RS.....	97
Tabela 8	Componentes fenométricos do milho produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) nas safras 2021/22 e 2022/23 para as cultivares BRS 019TL (TL) e BRS 015FB (FB) consorciado com feijão 'BRS Paisano'. Pelotas, RS.....	98
Tabela 9	Componentes fenométricos do feijão 'BRS Paisano' produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) em diferentes arranjos de plantas com as cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) nas safras	

	2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.....	101
Tabela 10	Produtividade e componentes de rendimento do milho produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) com as cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) consorciadas com o feijão 'BRS Paisano' nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.....	103
Tabela 11	Produtividade e componentes de rendimento do feijão 'BRS Paisano' produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) em diferentes arranjos de plantas com as cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.....	106
Tabela 12	Uso eficiente da terra (UET) e coeficiente equivalente da terra (CET) quatro arranjos de plantas de milho e feijão cultivados a pleno sol e em sistema agroflorestal por duas safras consecutivas, 2021/2022 e 2022/2023, em Pelotas, RS.....	110
Tabela 13	Estatura, diâmetro do colmo, área foliar e altura da inserção da espiga das cultivares de milho 'BRS 019TL' e 'BRS 015FB' cultivadas em sistema agroflorestal em diferentes linhas de cultivos nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.....	127
Tabela 14	Estatura, diâmetro da haste, número de nós e área foliar do feijão 'BRS Paisano' cultivado em sistema agroflorestal em diferentes linhas de cultivos nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.....	128
Tabela 15	Componentes de rendimento do milho 'BRS 019TL' e 'BRS 015FB' semeado em diferentes linhas de cultivo em sistema agroflorestal nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.....	130
Tabela 16	Componentes da produção do feijão 'BRS Paisano' em diferentes linhas de cultivo em sistema agroflorestal nas	

	safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.....	131
Tabela 17	Produtividade, em kg ha ⁻¹ , das cultivares de milho 'BRS 019TL' e 'BRS 015FB' e do feijão 'BRS paisano' semeadas em diferentes linhas de cultivo no sistema agroflorestal para as safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.....	133
Tabela 18	Qualidade de representação das variáveis (cos2) do estudo para o milho e o feijão nas safras 2021/22 e 2022/23 para os componentes principais 1 (Dim 1) e 2 (Dim 2). Pelotas, RS.....	143
Tabela 19	Teste de germinação e primeira contagem do teste de germinação total das cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) em diferentes arranjos de plantas com a cultivar de feijão 'BRS Paisano' nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.....	147
Tabela 20	Teste de germinação e primeira contagem do teste de germinação da cultivar de feijão 'BRS Paisano' produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) em diferentes arranjos de plantas com as cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.....	152

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2. REVISÃO DA LITERATURA	22
2.1. Milho e feijão: descrição botânica e fenológica	22
2.2. Consórcios de cultivos: produtividade e serviços ecossistêmicos.....	28
2.3. Sistemas agroflorestais (SAF's)	34
2.4. Radiação solar	41
3. MATERIAL E MÉTODOS	50
3.1. Localização e caracterização da área experimental	50
3.2. Dados meteorológicos.....	56
3.3. Avaliações	60
3.4. Teste de germinação.....	63
3.5. Índices para mensurar eficiência biológica.....	64
3.6. Análise estatística	64
4. CAPÍTULO 1 – CARACTERIZAÇÃO MICROMETEOROLÓGICA DO CULTIVO DE MILHO E DE FEIJÃO EM UM SISTEMA AGROFLORESTAL .	65
4.1. Introdução	65
4.2. Material e métodos.....	68
4.3. Resultados e discussão	71
4.4. Conclusões	88
5. CAPÍTULO 2 – CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE MILHO E FEIJÃO CULTIVADOS EM SISTEMA AGROFLORESTAL	88
5.1. Introdução	88
5.2. Material e métodos.....	90
5.3. Resultados e discussão	95
5.4. Conclusões	112
6. CAPÍTULO 3 – MILHO E FEIJÃO EM SISTEMA AGROFLORESTAL: CRESCIMENTO, PRODUÇÃO E EFICIÊNCIA DA INTERCEPTAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR	113
6.1. Introdução	113
6.2. Material e métodos.....	114
6.3. Resultados e discussão	119
6.4. Conclusões	136
7. CAPÍTULO 4 – IMPACTO DO SISTEMA AGROFLORESTAL E DO CULTIVO CONSORCIADO NO CRESCIMENTO, PRODUÇÃO E QUALIDADE DAS SEMENTES DE MILHO E FEIJÃO	137

7.1. Introdução	137
7.2. Material e métodos.....	138
7.3. Resultados e discussão	142
7.4. Conclusões	155
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS	156
REFERÊNCIAS.....	162

1. INTRODUÇÃO

O milho (*Zea mays* L.) e o feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) são importantes alimentos para a segurança alimentar e nutricional, consumidos diariamente pela maioria da população. Além da sua importância cultural e social, também apresenta destaque econômico, onde o Brasil é o terceiro maior produtor mundial do milho e segundo do feijão (FAOSTAT, 2022).

As mudanças que ocorreram temporalmente nos sistemas de cultivo, resultaram em um problema de saúde pública a partir da especialização no sistema de produção, baseado em monocultivos em extensas áreas, com o uso de adubos sintéticos e agrotóxicos, que contaminam o solo, a água, fauna, flora e o ser humano (Lucas *et al.*, 2020; Pedroso *et al.*, 2020; Warner *et al.*, 2020; Queiroz *et al.*, 2023; Santos; Santos, 2024). Em virtude da preocupação com a preservação ambiental e com a saúde da população e dos ecossistemas, ocorreu o aumento na demanda por produtos orgânicos (Rana; Paul, 2017).

Não obstante, a falta de pesquisas nessa área, ausência de auxílio técnico, dificuldades no manejo, burocracia e alto custo da certificação são fatores limitantes da produção orgânica observados por Alberti; Melo; Wizniewsky (2022); Batista *et al.* (2020) e Inagaki; Junqueira; Bellon (2018). Assim, apesar da sua importância, a tecnologia disponível para esse cultivo ainda é deficitária, destacando a importância de intensificar pesquisas nesse setor, como o estudo sobre eficientes técnicas de manejo.

Entre os manejos de cultivos disponíveis, consórcios apresentam maior eficiência na absorção de radiação solar em comparação as monoculturas de milho e feijão (Mahallati *et al.*, 2015), o que resulta em maiores produtividades (Awal *et al.*, 2006). Esse sistema de cultivo contribui para reduzir os impactos ambientais na produção agrícola (Naudin *et al.*, 2014), além de diminuir a necessidade de adubos nitrogenados, se uma das espécies for leguminosa (Xu *et al.*, 2020), e proporcionar aumento na eficiência do uso da água das culturas (Yin *et al.*, 2020). As propriedades familiares brasileiras, apesar de representarem 76,8% dos estabelecimentos, abrangem apenas 23,0% da área agrícola (IBGE, 2017), possuindo, portanto, pequenas áreas, e o consórcio de

milho e feijão é uma alternativa de intensificação sustentável do sistema produtivo na agricultura familiar (Kermah *et al.*, 2018).

A combinação de milho e feijão é um dos consórcios mais usados e estudados desde 1983 por Cruz; Ramalho; Salles (1987) avaliando cultivares e densidades de semeadura de milho. Ao longo do tempo, ocorreu uma mudança no enfoque da pesquisa dessa área, deixando de concentrar esforços apenas no milho, e focando também no feijão. Recentemente, Mahallati *et al.* (2015) avaliaram a largura ótima para as faixas de cultivo, Nassary; Baijukya; Ndakidemi (2020) buscaram esclarecimentos sobre as épocas de cultivo e variedades de feijão e Fischer; Böhm; Heb (2020) solucionaram sobre o tempo de introdução do feijão no consórcio, antes, concomitante ou depois do milho estabelecido.

Os efeitos sinérgicos dos consórcios de milho e feijão são estudados ao longo da história, como supracitado. Entretanto, os trabalhos avaliando consórcios dentro dos sistemas agroflorestais (SAF's) são limitados, devido a sua complexidade de avaliação e interpretação dos resultados. Os SAF's referem-se à integração de árvores em cultivos agrícolas, diversificando a área, proporcionando meios de subsistência e de renda adicionais, além do benefício ambiental e social (Dinesh *et al.*, 2017). Os SAF's produzem alimentos em conjunto ao manejo sustentável da fertilidade do solo, dos recursos da terra e dos serviços ecossistêmicos. Entre as práticas agrícolas, as agroflorestas estão entre as dez melhores opções inteligentes para alcançar a segurança alimentar perante às mudanças climáticas de forma sustentável (Dinesh *et al.*, 2017).

Os estudos publicados com milho e feijão em SAF's são escassos. Estudando consórcio de milho e soja em SAF's (*Acer sacharrinum* e clone-DN-177), os autores Reynolds *et al.* (2007) observaram que a competição reduziu significativamente a radiação fotossintética, a assimilação líquida, o crescimento e a produtividade do milho e da soja, mas principalmente do milho em até 2 m de distância das árvores. Os autores destacaram a importância de novas pesquisas que busquem a remediação das interações competitivas para o avanço dessa tecnologia. Na África Ocidental, Bado; Whitbread; Manzo (2021) avaliaram cultivos solteiros e consorciados de milheto (*Pennisetum glaucum* (L.) R. Br.) e feijão caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.) com zizíphus (*Zizíphus mauritiana* Lam.) e sem zizíphus, com diferentes níveis de adubação e

concluíram que o sistema agroflorestal (milho/feijão/ziziphus e milho/ziziphus) em sistema de baixo insumo de adubação foi mais produtivo e rentável.

No Brasil são encontradas pesquisas avaliando as culturas graníferas no cultivo solteiro em consórcio às árvores, como o desenvolvido por Bertalot *et al.* (2010) com aveia preta e *Leucaena diversifolia* (Schlecht.) Bentham, destacando que a biomassa da *Leucaena diversifolia* pode substituir a fertilização química. Outro exemplo é o estudo de Pompeu *et al.* (2023) que avaliaram tipos de adubação para produção de milho e feijão caupi entre fileiras de *Mimosa caesalpiniiifolia* e *Spondias mombin*, observando que o esterco ovino, esterco bovino e palha de carnaúba podem ser utilizados para aumentar a produtividade de grãos em agrofloresta da região de estudo, Ceará.

No Rio Grande do Sul foram observadas algumas pesquisas com pouca diversidade de espécies de florestais e também sem explorar o consórcio de culturas anuais. Em Bagé Kleinpaul *et al.* (2010) quantificaram a biomassa produzida por milho em consorciação a *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mearnsii*, e não obtiveram diferenças na produtividade do milho em virtude das arbóreas ainda serem mudas. Em Frederico Westphalen, RS foram encontradas duas pesquisas, a primeira avaliando a produção de aveia preta com quatro diferentes espécies florestais (*Schizolobium parahyba*, *Peltophorum dubium*, *Parapiptadenia rígida* e *Eucalyptus urograndis*) (Sgarbossa *et al.*, 2020), observando que as características do dossel das árvores influenciaram na dinâmica da radiação solar, com os maiores valores de transmissividade relacionados a maior produtividade da aveia preta. A segunda pesquisa foi desenvolvida por Sgarbossa *et al.* (2021) com feijão e soja, avaliando a eficiência do uso da radiação solar e produtividade, recomendando o cultivo de feijão em SAF, entretanto, a soja apresentou redução na sua produtividade, tornando-se necessárias pesquisas para melhorar o seu manejo.

Assim, observa-se um escasso registro de pesquisas com milho e feijão em SAF's ao longo do mundo, no Brasil e em especial, no Rio Grande do Sul. A maioria das pesquisas supracitadas avaliaram florestas iniciais compostas por poucas espécies florestais, enquanto o estudo em SAF maduro e com espécies nativas e multidiversas permanece sendo uma lacuna do conhecimento.

Além disso, os períodos com déficit hídrico são frequentes no Rio Grande do Sul. Na safra de 2019/2020, por exemplo, de fevereiro a abril, ocorreu

redução de 72,7% na precipitação pluvial em relação à normal climatológica (Cera, 2020). A disponibilidade hídrica na região é influenciada pelo fenômeno El Niño - Oscilação Sul (ENOS). De acordo com o Índice Niño Oceânico, a safra 2019/2020 foi de ano neutro, enquanto as safras subsequentes 2020/21, 2021/22, 2022/23 atingiu índice máximo de -1,3, e -1,1 e -1,0, respectivamente, ambos compreendendo a fase atuante La Niña, enquanto que a última de 2023/24, com o fenômeno El Niño, atingindo índice máximo de 2,0 (NOAA, 2024). Este fenômeno, em sua fase La Niña ocasiona chuvas abaixo da média na primavera no Estado, e em anos de El Niño acima da média (Matzenauer; Radin; Maluf, 2017). Os autores também destacam que em anos neutros as chuvas são em menor quantidade de janeiro a março em relação à normal climatológica. Ademais, as mudanças climáticas podem resultar em aumento de períodos com déficit hídrico (Vicente-Serrano *et al.*, 2020). Esta situação de estresse aumenta a vulnerabilidade dos monocultivos tradicionais e acentua a insegurança alimentar e nutricional da população, principalmente àquela de baixa renda. Desse modo, técnicas de manejo que diversifiquem a área produtiva podem ser uma alternativa para diminuir perdas, e o componente arbóreo além de poder ser fonte de renda e alimento, auxilia na conservação de água do solo.

O feijão é uma planta de metabolismo C3, portanto, menos eficiente na absorção de radiação solar do que o milho, que é uma planta C4 (Taiz; Zeiger, 2013). As plantas C3 se tornam saturadas de luz em aproximadamente 50% da radiação solar global, enquanto as plantas C4 se saturam com quase a totalidade de radiação solar disponível (Reynolds *et al.*, 2007). Dessa forma, o consórcio de milho e feijão, se bem manejado, pode não resultar em diminuição da produtividade do feijão. Entretanto, em ambiente agroflorestal, o sombreamento no milho deve ser observado, pois pode ser fator limitante para atingir o potencial produtivo do genótipo.

Desse modo, o objetivo geral do estudo foi comparar o crescimento e a produtividade de plantas de milho e de feijão em cultivo solteiro e consorciados em sistema agroflorestal e em área a pleno sol. Os objetivos específicos foram (i) quantificar o crescimento e desenvolvimento do milho e do feijão em sistemas de cultivo consorciado e solteiro, (ii) quantificar o crescimento e desenvolvimento do milho e do feijão em sistemas agroflorestal e ambiente a pleno sol, (iii) determinar a produtividade de grãos do milho e do feijão sob diferentes arranjos

e sistemas de produção, (iv) identificar variações micrometeorológicas proporcionadas pelo sistema agroflorestal, (v) quantificar a eficiência biológica do consórcio milho-feijão dentro e fora de um sistema agroflorestal e (vi) verificar a qualidade da semente produzida em cultivo solteiro e consorciado, sob sistema agroflorestal e ambiente a pleno sol.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Milho e feijão: descrição botânica e fenológica

O milho (*Zea mays* L.) é uma gramínea pertencente à família Poaceae originária no México a partir da domesticação do seu ancestral, o teosinto, e atualmente espalhada no mundo (Doebley, 2004; Prasanna, 2012). É uma espécie de cultivo anual, pertencente ao grupo de metabolismo C4, com grão do tipo cariopse, em que o pericarpo está fundido ao tegumento da semente (MISOSUL, 2024).

A granífera apresenta ampla adaptação a diferentes condições edafoclimáticas devido a sua diversidade genética, que além da adaptabilidade, também favoreceu seus múltiplos usos, incluindo alimentação humana, animal, e como insumo na indústria (Langner, 2018). Economicamente, o Brasil é o terceiro maior produtor de milho (109 milhões de toneladas), atrás somente dos Estados Unidos (348 milhões de toneladas) e China (277 milhões de toneladas) (FAOSTAT, 2022). Dessa produção, em torno de 23% é oriunda da agricultura familiar (IBGE, 2017). Dentro do Brasil, a produtividade média da safra 2023/2024 foi de 5.561 kg ha⁻¹, sendo a região sul a detentora da maior produtividade, com 6.303 kg ha⁻¹, e destes, o Rio Grande do Sul (RS) apresentou produtividade intermediária de 6.474 kg ha⁻¹, acima do Paraná com 6.069 kg ha⁻¹ e inferior a Santa Catarina com 7.930 kg ha⁻¹ (CONAB, 2024). No RS, o milho ocupava 15% da área cultivada na primavera/verão, somando as áreas para produção de grãos e silagem, destacando a importância socioeconômica dessa granífera (MISOSUL, 2024). Entretanto, na safra de 2022/23 o milho grão ocupou

apenas 7,9% da área cultivada (CONAB, 2024), o qual está perdendo espaço em área para a soja. De acordo com o IBGE (2023) em 2023 Pelotas produziu milho em 31.077 ha com produtividade de 3.289 kg ha⁻¹.

As cultivares de milho modernas são insensíveis ao fotoperíodo e influenciadas pela soma térmica. De acordo com recomendação da MISOSUL (2024), a melhor época de semeadura é aquela em que não ocorre déficit hídrico na floração e coincida com os dias mais longos, próximo de 21 de dezembro, na máxima oferta de radiação solar. A época de semeadura recomendada para Pelotas, Rio Grande do Sul é de agosto a janeiro, variando conforme o tipo de solo, nível de risco de perda de produtividade e ciclo da cultivar, explicado detalhadamente para cada município no zoneamento agroclimático para milho no RS (MAPA, 2024)

A escolha da cultivar dependerá do objetivo da produção, distribuição do endosperma, cor e qualidade dos grãos. A publicação de MISOSUL (2024) detalha sobre as características de cada escolha de produção: se for para grão, cultivares com alto potencial produtivo devem ser escolhidas; se for silagem, deve-se optar por cultivares com alto teor de massa fresca da parte aérea, alta produção de grãos, e evitar cultivares hiper e superprecoce; os grãos dentados são mais moles e de fácil trituração, indicados para o fornecimento in natura aos animais, mas requerem maior cuidado no armazenamento; o grão pipoca é um milho duro, geralmente de tamanho reduzido com alta capacidade de expansão do endosperma e o milho doce é indicado para consumo humano no estágio de grãos leitosos, porém apresentam baixa produtividade, elevado ataque de patógenos e rápida deterioração após a colheita (MISOSUL, 2024)

Entre as cultivares, tem-se as híbridas e as de polinização aberta (variedades), as quais serão explicadas na sequência, de acordo com o MISOSUL (2024). As de polinização aberta são as sintéticas, subprodutos de híbridos, as melhoradas, que se inter cruzaram livremente, e as locais ou crioulas, que também se inter cruzaram livremente, mas são mantidas pelos agricultores e consideradas patrimônio genético natural. Os híbridos simples apresentam maior uniformidade e potencial produtivo, mas também apresentam maior custo das sementes e de manejo. As variedades melhoradas/crioulas apresentam menor custo de semente e manejo, pois a maioria dos agricultores são detentores do seu banco genético, porém, costumam ser menos produtivas.

A densidade de semeadura reflete na produtividade almejada e a densidade de semeadura indicada varia conforme a produção almejada. A densidade de 4 a 5 plantas m^{-2} refere-se a expectativa de rendimento de 6 toneladas ha^{-1} (polinização aberta melhoradas e híbridos duplos), de 6 a 7 plantas m^{-2} , 9 toneladas ha^{-1} (híbrido simples, duplo e triplo) e de 8 a 9 plantas m^{-2} , 12 toneladas ha^{-1} (híbrido simples ou triplo) (MISOSUL, 2024). O espaçamento entrelinhas mais comum é de 80 e 100 cm, entretanto, em lavouras com alta tecnologia vem sendo executado maiores populações de planta, com espaçamento de 45 e 60 cm em densidade maior de 5 plantas m^{-2} e produtividade maior de 6 toneladas ha^{-1} (MISOSUL, 2024).

Sobre as necessidades meteorológicas, as temperaturas cardeais de crescimento e desenvolvimento do milho são variáveis, mais baixas nas cultivares precoces e mais altas nas tardias (Bergamaschi; Matzenauer, 2014). De acordo com Birch; Hammer; Rickert (1998) as temperaturas cardeais, basal, ótima e máxima são de 8°C, 30°C e 40°C. A redução de 30 a 40% da oferta de radiação solar por longos períodos atrasa a maturação dos grãos e causa redução na produção (Landau; Magalhães; Guimarães, 2021).

O ciclo do milho é dividido em fase vegetativa e reprodutiva, conforme escala definida por Ritchie; Hanway; Benson (1993) e explicado por MISOSUL (2024). Na fase vegetativa a temperatura do ar é o principal elemento meteorológico que comanda a emergência e a taxa de aparecimento das folhas (Bergamaschi; Matzenauer, 2014). O déficit hídrico é causador de redução da produtividade durante a fase reprodutiva, de acordo com Bergamaschi; Matzenauer (2014), principalmente entre duas semanas antes e duas semanas depois do espigamento. Nesta fase também a polinização é crucial para a fecundação dos óvulos, déficit hídrico combinado a altas temperaturas podem atrasar a emissão dos estigmas e bloquear a polinização (Nielsen, 2020). Na Tabela 1 está exemplificado de forma resumida a escala fenológica do milho.

Tabela 1 - Escala fenológica do milho. Pelotas, RS.

Estádio	Características
Período Vegetativo	
VE - Germinação/emergência	Emergência do coleóptilo.
V3 - 3 folhas expandidas	3 folhas completamente expandidas de forma alternada em sucessão.
V6 - 6 folhas expandidas	6 folhas completamente expandidas, início diferenciação do pendão.
V9 - 9 folhas expandidas	9 folhas completamente expandidas, início do desenvolvimento da espiga.
V12 - 12 folhas expandidas	12 folhas completamente expandidas, número de óvulos e tamanho da espiga é determinado.
V15 - 15 folhas expandidas	15 folhas completamente expandidas, estilos com estigmas começam a crescer na espiga.
V18 - 18 folhas expandidas	18 folhas completamente expandidas, desenvolvimento da espiga.
VT - Pendoamento	Último ramo do pendão torna-se visível e os estigmas ainda não emergiram.
Período Reprodutivo	
R1 - Florescimento	Primeira estrutura estilo-estigma é visível.
R2 - Grão leitoso	Início do enchimento dos grãos.
R3 - Grão pastoso	Crescimento do embrião e estigmas estão marrons e secos.
R4 - Grão farináceo	Início da redução da umidade do grão.
R5 - Grão farináceo-duro	Rápida redução de umidade, grão em massa.
R6 - Maturação fisiológica	Todos os grãos estão com máximo peso seco, com camada preta na extremidade basal.
Maturação de colheita	Silagem de planta inteira deve ser colhido em R5, silagem de grão úmido em R6, colheita de grão em R6 com umidade entre 18 e 22%, e armazenamento entre 13 e 15%.

Fonte: Adaptado de Ritchie; Hanway; Benson (1993).

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) é originário da América Central e do Sul dos Andes (Almeida *et al.*, 2016), pertencente à classe Dicotyledoneae, família Fabaceae, e subfamília Faboideae. O feijão possui grande importância na segurança alimentar e nutricional, representando a principal fonte proteica diária da maioria da população, fornecendo até 15% do total de calorias diárias e 36% do total de proteína diária em partes da África e das Américas (Schmutz; Mcclean; Jackson, 2014). No Brasil, em 2018 o consumo diário foi de 8 g pessoa⁻¹, e comparado aos países da América e da África, o Brasil é o quarto maior

consumidor de proteína por feijão em escala diária, ficando atrás de El Salvador e Cuba com 10 g pessoa⁻¹ e Rwanda com 23 g pessoa⁻¹ (FAO, 2021).

O Brasil é o segundo maior produtor mundial de feijão (2.842.395 t), atrás da Índia (6.610.000 t), os quais além de serem os maiores produtores, também são os maiores consumidores, resultando em pequeno excedente a ser exportado, e em âmbito da América do Sul, o Brasil apresenta participação superior a 70% na produção (FAOSTAT, 2022). Apesar da importância, a produtividade brasileira está inferior ao potencial produtivo, de até 3.000 kg ha⁻¹ sob alto nível de manejo (Silva; Lemos; Crusciol, 2011; Justino *et al.*, 2019). A produtividade média brasileira na safra 2023/24 foi de 1.074 kg ha⁻¹, com maior valor no Centro Oeste, com 2.072 kg ha⁻¹, seguido por Sudeste com 1.799 kg ha⁻¹ e região Sul com 1.569 kg ha⁻¹, e destes, o RS é o de menor produtividade com 1.528 kg ha⁻¹ (CONAB, 2024). O feijão é cultivado em duas safras no RS, a safra e a safrinha, com média de produtividade de 1.528 kg ha⁻¹ para ambas (CONAB, 2024). Da produção brasileira, cerca de 42% é produzido pela agricultura familiar (IBGE, 2022). De acordo com o IBGE (2023) na safra de 2023 a produtividade em Pelotas foi de 918 kg ha⁻¹.

A região Sul do Brasil apresenta preferência pelos grãos pretos, o qual é o mais produzido. Na safra 2023/2024 a região Sul foi responsável por 94,9% e 98,0% da produção de feijão nacional de grãos pretos da primeira e segunda safra, respectivamente (CONAB, 2024). O mesmo relatório aponta predominância de produção do feijão preto no RS, com produção em 2023/24 de 26,2 mil t e 16,9 mil t de feijão de cores, enquanto que na safrinha apenas feijão preto foi produzido, em torno de 31,0 mil t. No restante do país é produzido principalmente o tipo carioca, e isso é um fator limitante a exportação por ser um grão perecível e de baixa aceitação em outros países, por isso, quando há excesso de oferta do feijão carioca, este permanece nos armazéns perdendo qualidade (Ctsbf, 2012).

O feijão pertence ao metabolismo de tipo C3, as cultivares modernas são insensíveis ao fotoperíodo, possuindo temperaturas cardeais de crescimento entre 12°C e 29°C, com temperatura ótima de 21°C, (Silva; Heinemann, 2023). O autor Silva (2021) explica as características morfológicas do feijão: apresenta folhas primárias e trifoliadas, flores agrupadas compostas por um pedúnculo de coloração variada e o fruto é composto por uma vagem com sementes, os quais

variam em tamanho, formato e coloração; apresenta raiz principal, das quais, desenvolvem-se raízes laterais que se concentram na superfície do solo e podem apresentar nódulos por simbiose com bactérias fixadoras de nitrogênio; o caule é formado por nós e entrenós, sendo o primeiro nó constituído pelos cotilédones, o segundo nó pela inserção das folhas primárias, e o terceiro nó em diante, as folhas trifoliadas; o caule do feijão possui hábito de crescimento determinado ou indeterminado. O determinado é o tipo I, caracterizado por ser arbustivo e de porte ereto, enquanto os indeterminados são: tipo II (arbustivo, porte ereto e caule pouco ramificado); tipo III (prostrado ou semiprostrado, com ramificação bem desenvolvida e aberta); e o tipo IV (trepador, caule com dominância apical e número reduzido de ramos laterais) (Silva, 2021).

As cultivares de feijão apresentam quatro tipos de ciclo, superprecoce (em torno de 65 dias), precoce (em torno de 75 dias), normal (em torno de 95 dias) e tardio (acima de 95 dias) (Ferreira, 2020). A semeadura do feijão no RS pode ocorrer de agosto a outubro na safra ou primeira época, e janeiro a fevereiro na safrinha ou segunda época. O espaçamento de semeadura entre linhas é de 30 a 60 cm, com menores espaçamentos para cultivares precoces e crescimento dos tipos I e II. A densidade de semeadura varia conforme o tipo de crescimento e a cultivar, variando de 200 a 300 mil plantas ha⁻¹. No caso de consórcio de feijão com milho, a densidade deve ser menor, recomendando populações de 30 a 40 mil plantas de milho e de 150 a 250 mil plantas de feijão por hectare (CTSBF, 2012).

O crescimento e desenvolvimento do feijão pode ser descrito conforme a escala fenológica elaborada por Fernández; Gepts; Lopez (1986). A escala fenológica é dividida em vegetativa e reprodutiva. A fase vegetativa se estende desde a germinação da semente até o aparecimento dos botões florais nas cultivares de hábito de crescimento determinado e os primeiros racemos florais nas de hábito de crescimento indeterminado. A fase reprodutiva ocorre desde o aparecimento dos botões ou racemos florais até a maturação de colheita, mas os autores destacam que é possível, mesmo em fase reprodutiva, a planta continuar a produzir simultaneamente haste, folha, flor e vagem. Os estádios fenológicos estão demonstrados na Tabela 2, cuja duração de cada estágio varia conforme a cultivar e as condições edafoclimáticas. Destaca-se que o período crítico de competição com plantas espontâneas ocorre de V2 a R6 (Ctsbf, 2012)

e o período crítico ao déficit hídrico ocorre na germinação, florescimento e enchimento de grãos para Soratto *et al.* (2003), e o pré-florescimento por ser o início da fase reprodutiva para Mackay; Eaves (1962) e Ferreira (2017).

Tabela 2 - Escala fenológica do feijão. Pelotas, RS.

Estádio	Características
Período Vegetativo	
V0 - Germinação	Emergência da radícula, crescimento do hipocótilo.
V1 - Emergência	Cotilédones expostos sobre o solo, crescimento do epicótilo.
V2 - Folhas Primárias	Folhas primárias totalmente expandidas no segundo nó.
V3 - 1º Folha Trifoliada	Primeira folha trifoliada totalmente expandida e plana.
V4 - 3º Folha Trifoliada	Terceira folha trifoliada totalmente expandida e plana.
Período Reprodutivo	
R5 - Pré-floração	Emissão dos primeiros botões ou racemos florais.
R6 - Floração	Primeira flor aberta na planta.
R7 - Formação das Vagens	Primeira vagem com a corola da flor destacada.
R8 - Enchimento das Vagens	Primeiras sementes na vagem.
R9 - Maturação	Vagens secas com mudança de cor na vagem.

Fonte: Adaptado de Fernández; Gepts; Lopez (1986).

Existe uma preocupação futura na produção do feijão em virtude da diminuição na adequação climática projetada para a América do Sul devido às tensões causadas por altas temperaturas e déficit hídrico (Heinemann *et al.*, 2017). Os autores destacam a necessidade de pesquisas genéticas para selecionar cultivares tolerantes a seca e a altas temperaturas, com maturidade precoce, floração precoce e enraizamento profundo. Nesse aspecto, o uso de consórcios de cultivos pode ser uma alternativa sustentável de produção para reduzir o risco de perda de produção, pois haverá espécies distintas, com ciclos e tolerâncias a condições meteorológicas estressantes diferentes.

2.2. Consórcios de cultivos: produtividade e serviços ecossistêmicos

O consórcio corresponde a produção simultânea de múltiplas espécies na mesma área de terra, proporcionando uma intensificação sustentável com objetivo de produzir alimentos e ao mesmo tempo, diminuir o impacto ao meio ambiente (Martin-Guay *et al.*, 2018). São utilizados por pequenos proprietários desde o início da agricultura em virtude dos seus múltiplos benefícios (Vandermeer, 1989).

Os benefícios do consórcio já são comprovados na literatura. Em uma meta-análise, Martin-Guay *et al.* (2018) apontam que em comparação a monocultura, consórcios produziram, em média, 38% a mais de energia bruta e 33% de receita bruta com o benefício de usar 23% a menos de área de terra. Os autores também observaram que a consorciação é benéfica para as plantas irrigadas e estressadas por déficit hídrico, além de auxiliar nos serviços ecossistêmicos por aumentar a biomassa no sistema, aumentando a biodiversidade, diluindo a incidência de pragas e patógenos e aumentando a mobilização dos nutrientes no sistema.

Além dos benefícios aos ecossistemas, alta produção é alvo do sistema agrícola. Nesse sentido há outra vantagem dos consórcios, pois apresentam rendimento maior e mais estável em comparação aos monocultivos (Bedoussac *et al.*, 2015). Entretanto, além dessa contribuição, essa técnica de manejo diminui a necessidade de insumos químicos por meio da redução na incidência de insetos e doenças, como verificado por Zhang *et al.* (2019) a partir de uma meta-análise, concluindo que o consórcio de cereais com fava reduziu em 45% a incidência das doenças, significativamente para ferrugem amarela (*Puccinia striiformis* f.sp. tritici) e míldio (*Blumeria graminis*) em trigo, e mancha de chocolate (*Botrytis fabae*) e murcha de Fusarium (*Fusarium oxysporum*) em feijão fava (*Vicia faba*).

No consórcio de arroz com um aguapé (*Pontederia cordata*), também foi verificado a diminuição significativa na ocorrência de doenças e pragas do arroz (22,0 a 45,9% na queima da bainha e 33,8 a 34,4% das larvas foliares), além disso, a renda do consórcio foi de 2,5 vezes maior do que a monocultura de arroz, em virtude da melhor qualidade dos grãos, por meio da maior taxa de arroz beneficiado (11,2%) e de arroz integral beneficiado (12,8%), e diminuição da taxa

de arroz calcinado (30,9 a 39,8%) e do grau de giz (32,2%) (Xiang *et al.*, 2021). Apesar dos resultados promissores, vale destacar que esse consórcio prejudica a colheita mecanizada do arroz, mas, torna-se uma técnica eficiente para pequenas áreas. Sob consórcio em faixas de amendoim e milho, Ju *et al.* (2019) observaram o aumento de inimigos naturais, como a joaninha, que reduziu significativamente os pulgões no amendoim, resultando em aumento da sua produtividade. Em batata, o consórcio com milho aumentou o parasitismo de inimigos naturais e a diminuição da traça do tubérculo da batata (Zheng *et al.*, 2020).

Além da redução de pragas e doenças, também existe comprovação sobre as plantas espontâneas. Os consórcios podem diminuir a incidência e/ou suprimir o crescimento de plantas espontâneas, de milho com forrageiras (Severino; Carvalho; Christoffoleti, 2006), sorgo e forrageiras (Mota *et al.*, 2010) e milho com leguminosas (mucuna preta, crotalária e feijão-de-porco) (Oliveira *et al.*, 2014). Esse controle natural ocorre em virtude do fechamento do dossel das plantas cultivadas que permite transmitância de radiação solar ínfima para o solo, dificultando a emergência, crescimento e desenvolvimento das plantas espontâneas.

O consórcio também melhora a fertilidade do solo e a reciclagem de nutrientes, diminuindo a necessidade de aporte externo de nitrogênio (N) sob consórcio com leguminosa, já que esse sistema de cultivo estimula a fixação biológica de N (Bedoussac *et al.*, 2015). Leguminosas consorciadas apresentam proporção de N derivada da fixação de N₂, em média, 14% maior do que em monocultivo, além de aumentar a aquisição de N no solo em cereais (Rodrigues *et al.*, 2020). As leguminosas consorciadas obtêm mais N da atmosfera do que quando cultivada em monocultura, e existe a estimativa de que essa eficiência do uso de N no consórcio pode reduzir as necessidades de fertilizantes fósseis de N em cerca de 26% em escala global (Jensen; Carlsson; Hauggaard-Nielsen, 2020).

Além do N, também existem relatos sobre os benefícios do consórcio sobre o fósforo (P). Em consórcio de milho e feijão em solo deficientes em P, ocorre o aumento da rizosfera microbiana devido ao acréscimo na partição de carbono e N entre os nódulos das raízes do feijão e a comunidade microbiana da rizosfera (Latati *et al.*, 2017). A interação sinérgica entre os microorganismos,

especificamente fungos micorrízicos arbusculares (*Rhizophagus irregularis*) e suas bactérias associadas no consórcio de milho e soja, junto ao fertilizante mineral P, melhorou a mobilização no solo e a absorção de P pelas plantas, bem como a eficiência de uso (Song *et al.*, 2021). A partir de uma meta-análise, verificou-se que o consórcio de cereais e leguminosas gera uma necessidade de -21% de P do que no monocultivo (Tang *et al.*, 2021).

Portanto, os múltiplos benefícios do consórcio são comprovados, em artigos específicos dentro de cada área de estudo, bem como em artigos que apresentaram dados mais amplos. Sob consórcio com a soja, o milho é a cultura dominante por ser um melhor competidor por água e luz (Raza *et al.*, 2021). Os autores, a partir de experimentos no Paquistão verificaram que as razões de equivalência de água e de terra sugerem que um sistema consorciado pode economizar de 35% a 40% de água e terras agrícolas, e além desse benefício ambiental, apresentam receitas líquidas de 1.256 US \$ ha⁻¹ (consórcio duas fileiras de milho e duas de soja) e 1.338 US \$ ha⁻¹ (consórcio de 2 fileiras de milho e três de soja), maiores do que se a mesma área fosse ocupada por milho (987 US \$ ha⁻¹) ou soja (703 US \$ ha⁻¹).

Na África, pesquisas que busquem assegurar a segurança nutricional para a população sofrem com o limitante de um ambiente com adversidades meteorológicas e baixa qualidade do solo. Os autores Daryanto *et al.* (2020) relataram que o consórcio de cereais com leguminosas resultou em uma elevada razão de equivalência de terra de 1,31, com maiores valores para o consórcio de milho com feijão guandu (1,57) e de milho com amendoim (1,52). Os autores destacam que o consórcio é benéfico, mesmo com a variabilidade da precipitação pluvial e na ausência de fertilizante nitrogenado, diminuindo a erosão do solo (46%), a incidência de pragas e ervas daninhas (20 a 30%) e aumentando o sequestro de carbono (15%), em comparação ao monocultivo.

Dentre os consórcios, um dos mais comuns e estudados é o de milho e feijão. Em 1983/1984 e 1984/1985, Cruz, Ramalho, Salles (1987) realizaram experimentos em Minas Gerais para avaliar cultivares e densidades de semeadura de milho. Os autores observaram que as cultivares de milho apresentaram comportamento semelhante perante as densidades e presença do feijão, e referente a produtividade, em consórcio, o feijão produziu mais nas menores densidades de milho, compensando a produção de milho nesta

condição. A produtividade de milho foi inferior nas menores densidades, entretanto, foi observado um aumento no número de espigas por planta nas menores densidades.

Buscando entender a produção em diferentes arranjos em Minas Gerais, Costa; Silva (2008) avaliaram três sistemas, o sistema 1 consistia em fileiras duplas de milho com três fileiras de feijão, o sistema 2 com fileiras simples de milho com uma fileira intercalar de feijão e o sistema 3 com fileiras simples de milho com duas fileiras intercalares de feijão. O feijão sob consórcio apresentou redução de produtividade de 80 a 70% em relação ao cultivo solteiro, e o componente de produtividade que mais influenciou nesse cenário foi o número de vagens por planta. Enquanto que para o milho, a semeadura em fileiras duplas reduziu significativamente a sua produtividade, mas a produtividade, tanto em grão quanto para silagem foi influenciada pela distribuição espacial das plantas na área e não pela presença do feijão.

Avaliando a largura ótima para as faixas de cultivo para consórcio entre milho e feijão, por meio da eficiência do uso da radiação solar e de índices de competição, Mahallati *et al.* (2015), observaram que os arranjos em faixas duplas (2 linhas de milho: 2 linhas de feijão) e triplas (3 linhas de milho: 3 linhas de feijão) apresentaram os resultados mais promissores. Os autores destacam que o sistema em consórcio em faixas aumentou a eficiência do uso da radiação solar, o rendimento biológico, a proporção de terra equivalente e o índice de produtividade do sistema em comparação com a monocultura, e mesmo que o sistema em consórcio apresente menor produtividade das culturas individuais, a produtividade da área foi maior.

Em Pelotas, RS nas safras 2014/2015 e 2015/2016, Noveline (2018) conduziu experimentos com milho nas cultivares BRS 019TL e BRS Missões e com feijão 'BRS Expedito' buscando avaliar as respostas em cultivo solteiro e consorciado. Os consórcios foram nos seguintes arranjos: uma linha de milho para uma de feijão (1:1), duas de milho para duas de feijão (2:2) e 2 de milho para 3 de feijão (2:3). A autora observou que o arranjo 1:1 apresentou melhores resultados quanto ao uso eficiente da terra e índice de eficiência biológica, não afetando a produtividade do milho e agregando valor com adição do feijão, enquanto o arranjo 2:3 proporcionou maior oferta de radiação solar para o feijão, porém, a produtividade foi sempre menor do que o de feijão solteiro.

Buscando entender o efeito dos consórcios de milho e feijão, Nassary; Baijukya; Ndakidemi (2020) avaliaram épocas de cultivo e variedades de feijão ao longo de cinco safras, de 2015 a 2017, no norte da Tanzânia. Observaram que os fatores estudados apresentam influência na produtividade do consórcio, e que a área de terra necessária foi reduzida para 48 e 55%, das quais seriam necessárias como terras adicionais para monocultura de cada cultura, se não consorciadas. Destacaram a necessidade de realização de um estudo sobre o tempo de introdução do feijão no consórcio, antes, concomitante ou depois do milho estabelecido. No mesmo ano foi publicado outro trabalho que buscava solucionar essa dúvida, conduzido em 2011 e 2012 no norte da Alemanha. Os autores Fischer; Böhm; Heb (2020) avaliaram cultivares de feijão e épocas de semeadura do feijão no consórcio e concluíram que, para cultivares precoces o mais adequado foi semear o feijão quando as plantas de milho atingiram quatro folhas, o que possibilitou a capina no milho antes de semear o feijão, e em cultivares tardias, o mais adequado foi semear o feijão logo após o milho.

O uso do consórcio pelos agricultores enfrenta alguns desafios, dentre eles a mecanização (Bedoussac *et al.*, 2015). Nesse aspecto, cultivo em faixas pode ser uma solução. Mas além disso, existe a necessidade de desenvolver e/ou resgatar genótipos adaptados aos consórcios (Martin-Guay *et al.*, 2018). Readaptação dos agricultores, com incentivos econômicos para a transição desse manejo e melhor conhecimento sobre essa interação holística podem ser estratégias de políticas públicas para incentivar o uso de consórcios.

Portanto, entre os manejos de cultivos disponíveis, consórcios apresentam maior eficiência na absorção de radiação solar em comparação as monoculturas de milho e feijão (Mahallati *et al.*, 2015), o que resulta em maiores produtividades (Awal *et al.*, 2006). Esse sistema de cultivo contribui para reduzir os impactos ambientais na produção agrícola (Naudin *et al.*, 2014), além de diminuir a necessidade de adubos nitrogenados, se uma das espécies for leguminosa (Xu *et al.*, 2020), e proporcionar aumento na eficiência do uso da água das culturas (Yin *et al.*, 2020). As propriedades familiares brasileiras, apesar de representarem 76,8% dos estabelecimentos, abrangem apenas 23,0% da área agrícola (IBGE, 2017), possuindo, portanto, pequenas áreas, e o consórcio de milho e feijão é uma alternativa de intensificação sustentável do sistema produtivo na agricultura familiar (Kermah *et al.*, 2018). Aliado a questão

de otimização de área produtiva, a combinação de consórcios em sistemas de agroflorestas podem auxiliar ainda mais na diversificação, resiliência e eficiência no uso dos recursos na produção agrícola familiar.

2.3. Sistemas agroflorestais (SAF's)

Os sistemas agroflorestais (SAF's) consistem na produção agrícola baseada em consórcio de espécies florestais com cultivos anuais (Paludo; Costabeber, 2012). Agrofloresta corresponde a interação das árvores nas paisagens agrícolas, mas que não possuem somente o objetivo de produção, mas também de proteger o meio ambiente natural (The World Agroforestry Centre, 2021).

Apesar de conhecido o conceito de uma agrofloresta, existem ambiguidades na sua utilização na prática. De acordo com Ollinaho; Kröger, (2021) existem 3 tipos de transição agroflorestal: agroecológica, agronegócio e degradação florestal. A agroecológica é ecologicamente benéfica para os territórios, ajudando a fortalecer a justiça social *in loco*; o agronegócio são os princípios de lucratividade e produtividade empregados no cultivo de anuais com espécies arbóreas; e por fim, a degradação florestal é uma transição que estimula o desmatamento e a degradação de florestas primárias, mediante das “florestas plantadas”.

Os SAF's também são classificados de acordo com suas funcionalidades e estruturas. Diferenciam-se em sistemas silviagrícolas, correspondentes a combinação de espécies florestais e agrícolas anuais ou perenes, os sistemas silvipastoris, referentes a combinação de espécies arbóreas, pastagens e animais, e os sistemas agrossilvipastoris que é a associação de animais com cultivos agrícolas e árvores (Paludo; Costabeber, 2012). Esses sistemas são utilizados há muitos anos pelos agricultores, entretanto, houve um aumento na implementação devido ao Código Florestal Brasileiro (Lei nº 12.651 de 2012) permitir restaurar Reservas Legais e Áreas de Preservação Permanente com o cultivo de espécies nativas e exóticas comerciáveis, desde que mantenha as funções ecológicas básicas (Miccolis *et al.*, 2017). Essa possibilidade, além de

resultar em alimentos para subsistência, se bem manejado, pode gerar renda para os produtores rurais, desde que não se perca o objetivo principal, nesse caso, de preservar o meio ambiente.

Além dos SAF's contribuírem para a recuperação e reconstrução de áreas degradadas, os resultados da pesquisa desenvolvida em Mato Grosso do Sul, demonstram que o sistema é viável, com receita líquida de vendas superiores aos custos ao longo de 20 anos, tornando esse sistema vantajoso, independentemente do agricultor ser proprietário da área, mas destacam que o agricultor sendo dono da área, resulta em retorno mais rápido do investimento com menos riscos (Martinelli *et al.*, 2019). Os autores observaram que, na implantação, os custos com insumos são nove vezes maiores do que com mão de obra, e os maiores custos e despesas fixas e variáveis ocorreram nos três primeiros anos, em razão dos cultivos anuais nos anos iniciais demandarem maior mão de obra e insumo, em relação aos próximos anos. Os autores destacam que são necessárias culturas anuais desde o primeiro ano para aumentar o retorno a curto prazo, além de inclusão de espécies lenhosas com objetivo de retorno a longo prazo.

Os SAF's foram constatados como economicamente viáveis também em Pontal do Paranapanema, SP (Santos; Paiva, 2002). Os autores destacam que esse sistema pode promover um fluxo de caixa mais regular aos agricultores familiares, com maior flexibilidade de comercialização devido a maior diversidade de produtos. Outra análise econômica na Amazônia, concluiu que os SAF's podem ser uma alternativa de investimento para a diversificação da renda e recuperação ambiental, e que o sistema castanha-do-brasil, banana, pimenta-do-reino e cupuaçu foi o de melhor desempenho financeiro com lucro líquido de 15% (em torno de R\$35.000 ha ano⁻¹) (Bentes-Gama *et al.*, 2005).

Os trabalhos supracitados demonstram os benefícios econômicos oriundos dos SAF's, entretanto, seus retornos de investimento dependem de variáveis incontroláveis, que são as meteorológicas e de mercado (Martinelli *et al.*, 2019). Devido a essa complexidade, torna-se necessário um planejamento detalhado do sistema a fim de avaliar a viabilidade econômica e financeira desse sistema produtivo, como, o valor presente líquido, a taxa interna de retorno, a relação benefício-custo, o tempo de recuperação do capital e o valor anual equivalente (Arco-Verde; Amaro, 2014). Os autores desenvolveram o passo a

passo de confecção de planilhas, cenários e análises, perfazendo uma ferramenta de planejamento do agricultor. Além da análise econômica, destaca-se que por ser um sistema complexo, que também apresenta riscos e incertezas, são necessárias pesquisas com base nas culturas locais conhecidas pelos agricultores.

Não obstante, apesar do conhecimento adquirido pelos agricultores ao longo do tempo, experimentos com esse sistema é complexo devido ao grande número de fatores que influenciam os resultados. Pensando nesse desafio, os autores Schwarz; Schnabel; Bauhus (2021) elaboraram um conjunto de informações para poder estruturar um exemplo de projeto para um experimento de biodiversidade e funcionamento do ecossistema em SAF's, e para isso, elaboraram quatro princípios. O primeiro princípio é sobre a importância de que a seleção das espécies precisa se basear nas características funcionais destas, considerando a riqueza de espécies, densidade de plantio, topografia da área, tamanho das parcelas, entre outros. O segundo princípio se refere a ter diferentes formas de vida para estender o gradiente de diversidade funcional, a partir do aumento do número de espécies com funções diferentes nas parcelas agroflorestais. O terceiro princípio é sobre manter constante a densidade agroflorestal nas diferentes combinações de formas de vida, nesse caso, espécies de árvores, quando necessário, serão substituídas por espécies pertencentes a outras formas de vida, buscando manter a densidade de diversidade dos SAF's. O quarto princípio é sobre complementar os gradientes de diversidade funcional e riqueza de espécies com um terceiro gradiente, o de diversidade estrutural. Nesse caso, a diversidade funcional oriunda da riqueza de espécies, está mediada pela diversidade estrutural, devido as espécies apresentarem diferentes forma de vida, estatura e arquitetura, formando um gradiente vertical. Portanto, a riqueza e diversidade funcional auxiliam no desempenho do sistema em busca de produtividade e ciclagem de nutrientes, por exemplo, e os efeitos da diversidade estrutural pode auxiliar, na disponibilidade da radiação solar no sistema.

As vantagens dos SAF's para os agroecossistemas são inúmeras. Em escala global, os SAF's atuam na mitigação das mudanças climáticas devido a diminuição da emissão de gases de efeito estufa por meio da alta captura e estocagem de CO₂, variando entre arranjos e idade do sistema (Torres *et al.*,

2014). No Brasil, Schembergue *et al.* (2017) observaram que a adoção de SAF's é condicionada principalmente pelas condições socioeconômicas e climáticas dos municípios, e que têm potencial de melhorar o desempenho agrícola brasileiro por apresentar maior valor da terra, além de tornar o sistema produtivo menos exposto as consequências das mudanças climáticas.

Em escala local, os SAF's melhoram a qualidade do solo, já comprovada sob diversos aspectos. O sistema aumenta a fertilidade do solo, observado na região sudoeste dos Camarões, principalmente no sistema agrossilvipastoris (com animais) e agrossilviculturais (sem animais) (Tsufac *et al.*, 2021). Os autores destacam a necessidade de elaborar políticas públicas com intuito de melhorar a fertilidade dos solos a partir de SAF's. Na Amazônia colombiana, foi constatado que os SAF's aumentam a densidade dos engenheiros de solo, que possuem essa denominação por se locomoverem e criarem galerias que auxiliam na estrutura do solo e na ciclagem de nutrientes, e também aumenta a presença de macroagregados biogênicos, que são pequenos e grandes agregados com alto teor de carbono, sendo uma prática de manejo potencial para aumentar o armazenamento de carbono orgânico no solo como resultado da atividade biológica (Rodríguez *et al.*, 2021). Os estoques de carbono no solo são em 23,7% a 35,6% maiores em SAF's do que em monocultivos, comprovado em um SAF de 28 anos estabelecido na Índia, compostos por quatro espécies arbóreas teca (*Tectona grandis* Linn), Jacarandá do norte da Índia (*Dalbergia sissoo* Roxb. Ex DC.), eucalipto (*Eucalyptus globulus* L.) e nim (*Azadirachta indica* A. Juss) em combinação com abacaxi (*Ananas comosus* L. merr.) (Yadav *et al.*, 2021).

Além da melhoria nos atributos do solo, os SAF's podem fornecer habitats complementares para muitas espécies, incluindo pássaros da floresta, como observado para SAF's com cacauzeiros (Cabral; Faria; Morante-Filho, 2021). Por vezes, acredita-se que o ambiente dos SAF's pode favorecer a incidência de pragas e doenças devido a maior umidade, como na produção de cacau. Entretanto, Armengot *et al.* (2020) avaliaram essa hipótese e concluíram que os SAF's não aumentam a incidência de pragas e doenças em comparação com as monoculturas quando é realizado um manejo cultural, em que a colheita quinzenal e a remoção das vagens infectadas diminuíram significativamente a incidência da doença e aumentaram a produtividade do cacau em 25% e 46%,

respectivamente. Portanto, o adequado manejo em SAF's pode aumentar a produtividade do cacau.

Embora as vantagens ofertadas pelos SAF's sejam promissoras, um dos grandes desafios para a sua consolidação é buscar estratégias para mitigar a competição das árvores por água e luz. Esse sistema, geralmente, reduz a radiação fotossintética, a assimilação líquida, o crescimento e o rendimento de plantas de soja e milho semeado perto das árvores (2 m), sendo o milho o mais impactado pelo sombreamento (Reynolds *et al.*, 2007). Um estudo conduzido na China comparando dois SAF's (1: jujuba (*Zizyphus jujuba* Mill.) + Trigo (*Triticum aestivum* L.) e 2: choupo (*Populus* L.) + alfafa (*Medicago sativa* L.) em sistema silvipastoril) com monocultivo, concluíram que as mudanças causadas nas condições microclimáticas e a competição por recursos nos sistemas causaram redução na produtividade do grão de trigo e do feno de alfafa, bem como reduções no teor de proteína do trigo e da alfafa (Yang *et al.*, 2021a). Entretanto, os autores destacam que em ambos SAF's, mesmo com a redução da produtividade, ocorreu aumento na receita anual total em comparação ao monocultivo, indicando ser viável além de fornecer maiores benefícios econômicos a longo prazo. Vale ressaltar que os SAF's estudados nesse artigo eram com fileiras estreitas, o que pode ter influenciado no resultado.

Embora esteja ocorrendo uma intensificação nos estudos com espécies anuais em SAF's, o estudo de consórcios de espécies anuais nesse sistema, ainda demandam de informações. Estudando consórcio de milho e soja em SAF's (*Acer sacharrinum* e clone-DN-177), os autores Reynolds *et al.* (2007) publicaram dados de experimentos conduzidos em 1997 e 1998 no Canadá, avaliando os efeitos competitivos por radiação solar e água das árvores às plantas. Foi possível observar que a competição reduziu significativamente a radiação fotossintética, a assimilação líquida, o crescimento e a produtividade do milho e da soja, mas principalmente do milho em até 2 m de distância das árvores. Os autores destacaram a importância de novas pesquisas que busquem a remediação das interações competitivas para o avanço dessa tecnologia. Na África Ocidental, Bado; Whitbread; Manzo (2021) realizaram uma pesquisa de 2015-2018 avaliando cultivos solteiros e consórcios de milheto (*Pennisetum glaucum*) e feijão caupi (*Vigna unguiculata*) com e sem ziziphus (*Ziziphus mauritiana*), com diferentes níveis de adubação. Concluíram que o sistema

agroflorestal (milho/feijão/zizíphus e milho/zizíphus) em sistema de baixo insumo de adubação foi mais produtivo e rentável.

No Brasil são encontrados estudos que avaliam as culturas anuais em consórcio apenas com as arbóreas. Em São Paulo foi avaliada a produção de milho em sucessão a aveia preta em consórcio a *Leucaena diversifolia* (Schlecht.) Bentham avaliando sobre o tipo de adubação na produção das culturas, observando que tanto o fertilizante quanto a biomassa da poda da *Leucaena diversifolia* manteve as culturas produtivas, e assim, a biomassa pode substituir a fertilização química (Bertalot *et al.*, 2010). No Paraná foi avaliada a produção de aveia em diferentes distâncias das linhas de *Eucalyptus dunnii* Maiden sob diferentes níveis de adubação nitrogenada e concluíram que diferentes níveis de nitrogênio devem ser utilizados nas distâncias do eucalipto para potencializar a produtividade da aveia em SAF (Deiss *et al.*, 2014). Também no Paraná Werner *et al.* (2017) avaliaram genótipos de soja em consórcio com *Eucalyptus grandis*, observando que a consorciação próxima as árvores reduziram os componentes de rendimento e a produtividade de soja, não obstante não altera os teores de óleo e proteína nos grãos. Recentemente no Ceará Pompeu *et al.* (2023) avaliaram tipos de adubação para produção de milho e feijão caupi entre fileiras de *Mimosa caesalpinifolia* e *Spondias mombin*, observando que a fertilização orgânica não melhorou o crescimento das árvores recém estabelecidas, mas aumentou a produtividade em 60% do milho e 90% do feijão caupi, sendo que o esterco ovino, esterco bovino e palha de carnaúba podem ser utilizados para aumentar a produtividade de grãos em agroflorestas da região.

No Rio Grande do Sul foram realizadas algumas pesquisas com reduzida biodiversidade de espécies florestais e sem explorar o consórcio concomitante das graníferas. Em Bagé, Kleinpaul *et al.* (2010) quantificou a biomassa produzida por milho em consorciação a *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mearnsii*, os quais não observaram diferença na produção do milho solteiro em comparação ao consorciado, embora os autores relatam que isso é explicado pelo fato das espécies arbóreas serem jovens, com até 10 meses de plantio. No norte do estado do RS, em Frederico Westphalen, Sgarbossa *et al.* (2020) avaliaram a produção de aveia preta com quatro diferentes espécies florestais (*Schizolobium parahyba*, *Peltophorum dubium*, *Parapiptadenia rígida* e

Eucalyptus urograndis) (Sgarbossa *et al.*, 2020). Os autores observaram que as características do dossel das árvores influenciaram na dinâmica da radiação solar, com os maiores valores de transmissividade obtidos em *Parapiptadenia rígida* e por consequência, maior produtividade da aveia preta. De forma geral, níveis mais elevados de sombreamento reduziram o crescimento e a produtividade, ao mesmo tempo que aumentaram a eficiência do uso da radiação, o número de estômatos na superfície foliar e o teor de proteína bruta da aveia preta. Em outra pesquisa no mesmo SAF, Sgarbossa *et al.* (2021) cultivaram feijão e soja em SAF, com destaque à avaliação da eficiência do uso da radiação solar e produtividade, recomendando o cultivo de feijão em SAF, mesmo com a redução de 58,5% na produtividade em comparação ao pleno sol, entretanto, a soja apresentou redução de 84,5% e 94,8% na sua produtividade, tornando-se inviável sua produção em sistema agroflorestal com *Eucalyptus urophylla* e *Peltophorum dubium*, sendo necessárias pesquisas para melhorar o seu manejo. Assim, observa-se um escasso registro de pesquisas com essas culturas em SAF's ao longo do mundo, no Brasil e em especial, no Rio Grande do Sul.

Além de se observar certa limitação nas pesquisas sobre produção de grãos em SAF's, nos estudos supracitados no estado, os autores avaliaram florestas iniciais compostas por poucas espécies florestais, enquanto o estudo em SAF antigo e com espécies nativas e multidiversas permanece sendo uma lacuna do conhecimento. Sendo assim, permanece a necessidade de otimizar os estudos nos SAF's. Estes praticam os princípios agroecológicos e buscam harmonizar os agroecossistemas com os processos sistêmicos dos ecossistemas naturais, sendo um importante sistema produtivo para a agricultura familiar na conservação da vida, protegendo os recursos naturais e combatendo a pobreza rural ao garantir a segurança alimentar dos produtores e comunidade (Paludo; Costabeber, 2012). Os autores também destacam que apesar dos benefícios para os agricultores familiares, existem problemas de sanidade e produtividade. Desse modo, o estudo do consórcio de milho e feijão, amplamente estudado, em sistema agroflorestal é necessário para avançar nos conhecimentos desse manejo.

O feijão é uma planta C3, portanto, menos eficiente na absorção de radiação solar do que o milho, que é uma planta C4. As plantas C3 se tornam

saturadas de luz em aproximadamente 50% da radiação solar global, enquanto as plantas C4 se saturam com quase a totalidade de radiação solar disponível (Reynolds *et al.*, 2007). Dessa forma, o consórcio de milho e feijão, se bem manejado, pode não resultar em diminuição da produtividade do feijão. Entretanto, em ambiente agroflorestal, o sombreamento no milho deve ser observado, pois pode ser fator limitante para atingir o potencial produtivo do genótipo. Para o avanço dos SAF's nas propriedades agrícolas, além da propriedade da terra, o acesso a crédito, assistência técnica, essas informações são de extrema necessidade (Schembergue *et al.*, 2017).

Pelotas, em especial a região da Cascata possui potencial de implementação de SAF devido a possibilidade de inserir frutíferas de clima temperado, as quais por apresentarem hábito caducifólio, caducam suas folhas no outono/inverno, permitindo maior entrada de radiação solar no interior do SAF, característica típica da floresta estacional semidecidual, cuja semidecidualidade foliar atinge cerca de 20 a 50% do estrato superior da floresta (Teixeira *et al.*, 1986). Nesse caso, a semeadura dos grãos poderia ocorrer quando as árvores caducifólias ainda estivessem sem folhas ou no início de sua brotação, permitindo a entrada de radiação solar para garantir a necessidade térmica suficiente para ocorrer a adequada germinação das sementes. Desse modo, pesquisa em SAF's com consórcio de milho e feijão é fundamental para entender a viabilidade desse manejo, em que os resultados podem ser diferentes conforme as diferentes condições edafoclimáticas dos locais, e por isso a necessidade de serem analisados em locais em potencial, como na região de Pelotas, no Sul do Rio Grande do Sul.

2.4. Radiação solar

A radiação solar é a principal fonte de energia dos ecossistemas, responsável energeticamente por vários processos fisiológicos das plantas. Dentre eles, se destaca a fotossíntese, que por meio da absorção da energia dos fótons, desencadeia reações fotoquímicas para, a partir do metabolismo redutivo do carbono, sintetizar carboidratos (Taiz; Zeiger, 2013).

A radiação solar também atua de forma indireta nas plantas por ser um fator que condiciona os outros elementos meteorológicos, como temperatura do ar, vento e umidade do ar, alterando o balanço energético do ambiente. A radiação solar global (R_s) é composta por radiações direta e difusa. Nem toda a R_s é absorvida pelas plantas, pois depende do fluxo de energia solar incidente, do ângulo de incidência sobre as folhas e da área foliar. Inicialmente, apenas uma parte da R_s está na faixa da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), correspondente à faixa de 300 a 700 nm de comprimento de onda, em torno de 40 a 45% da R_s (Bergamaschi; Bergonci, 2017).

A captação da RFA ocorre nos órgãos fotossintetizantes das plantas, dentre eles, se destacam as folhas. A maior quantidade de área foliar, por sua vez, não representa, necessariamente, maior absorção de RFA, em virtude de folhas expostas perpendiculares a radiação e não sombreadas absorverem maior quantidade do que folhas inclinadas e sob sombreamento, como ocorre comumente em plantas de baixa estatura em consórcios. A arquitetura da planta, ou seja, os ângulos do pecíolo com a haste que influenciam a posição das folhas na planta, podem ser de característica genética, mas também, em virtude do para-heliotropismo, quando a planta modifica a exposição da folha em busca da diminuição da absorção de energia, buscando diminuir a necessidade de troca de energia em momentos de déficit hídrico (Durigon *et al.*, 2019).

Além da exposição foliar, características metabólicas da planta influenciam a absorção de RFA. As plantas possuem o ponto de compensação a luz, que ocorre quando a quantidade de CO_2 liberada pela respiração da planta se iguala ao uso de CO_2 pela fotossíntese, após esse ponto, a planta começa a fixar mais carbono do que liberar pela respiração, aumentando o rendimento fotossintético linearmente até atingir a máxima capacidade de assimilação de carbono da planta, que ocorre sob radiação solar intensa, denominado de ponto de saturação por radiação solar, mais comumente em plantas de metabolismo C_3 , as quais apresentam menor eficiência no uso da radiação solar em comparação as plantas C_4 (Larcher, 2000). De acordo com o autor supracitado, o ponto de compensação a luz das plantas C_4 , a qual pertence o milho é de 20 a $50 \mu\text{mol fotóns m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e o ponto de saturação maior que $1.500 \mu\text{mol fotóns m}^{-2} \text{s}^{-1}$, enquanto que das plantas C_3 , a qual pertence o feijão, de 20 a $40 \mu\text{mol}$

fotóns $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ de ponto de compensação a luz e de 1.000 a 1.500 μmol fotóns $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ o ponto de saturação.

Outro ponto, é que em ambientes sombreados, com baixo nível de RFA, a folha pode entrar no ponto de compensação, pois o ganho por fotossíntese se equivale a perda por respiração, e nesse caso, é demonstrado o porquê de que a maior área foliar, não necessariamente corresponde a maior taxa fotossintética (Bergamaschi; Bergonci, 2017). Abaixo do ponto de compensação nas plantas, as folhas possuem fotossíntese líquida, ou seja, as perdas por respiração são maiores do que o ganho por fotossíntese, e nesse caso, são prejudiciais ao crescimento e desenvolvimento das plantas, e as folhas entram em senescência, sendo visível de observar no interior das árvores frutíferas não podadas, que perdem as folhas por falta de iluminação.

Em sistema de consórcio, a RFA disponível pelas plantas de porte inferior corresponde a quantidade que não foi absorvida pela planta de estatura superior, ou seja, a planta de menor estatura sempre receberá menor energia fotossintética, e por isso a escolha de uma espécie tolerante ao sombreamento pode ser crucial para diminuir a perda de produção. Como por exemplo, a canela-batalha (*Cryptocaria aschersoniana* Mez.), uma espécie nativa que apresenta melhor crescimento e desenvolvimento sob restrição de 30 e 50% da radiação solar incidente (Almeida *et al.*, 2004).

Para entender a oferta de radiação solar à planta dentro de uma comunidade de plantas é necessário o conhecimento sobre algumas leis da radiação. A primeira a se referir é a Lei de Lambert que estima o efeito da inclinação da superfície sobre o fluxo de radiação solar incidente (Bergamaschi; Bergonci, 2017) e pode ser determinada conforme a equação:

$$I = I_0 \cos\theta \text{ Ou } I = I_0 \sin\beta \quad (1)$$

sendo I a densidade de fluxo de radiação na superfície, I_0 a densidade do fluxo original, $\cos\theta$ o cosseno do ângulo zenital e $\sin\beta$ o seno do ângulo complementar.

A lei de Beer surge para complementar a Lei de Lambert, por isso comumente chamada de Lei Lambert-Beer que permite estimar o fluxo de

radiação (I) que atravessa um meio ótico (X) a partir de um fluxo inicial (I_0) e do coeficiente de extinção (k). Nesse caso a radiação solar ao atravessar o meio é extinta exponencialmente (Bergamaschi; Bergonci, 2017):

$$I = I_0 e^{-kX} \quad (2)$$

Sendo assim, a lei de Beer também denominada de Lei de Lambert-Beer ou Lambert-Beer-Bouguer estabelece a relação entre a absorvância de uma solução e sua concentração ao ser atravessada pela radiação solar (Lima, 2013). Posteriormente, Monsi; Saeki (1953) adaptaram a Lei para o dossel vegetativo, substituindo o caminho ótico (X) pelo índice de área foliar (IAF), assim consegue-se estimar a radiação solar absorvida ao atravessar o dossel das plantas.

O coeficiente de extinção (k) oriundo da Lei de Beer é um expoente negativo, quanto maior o k , menor a quantidade de radiação solar que será disponibilizada para o dossel abaixo dessa planta. Geralmente baixos valores de k são mais comuns em gramíneas, com folhas estreitas e eretas, e maiores valores de k em leguminosas (Bergamaschi; Bergonci, 2017). O k em feijão é de 0,76 (Teixeira; Stone; Heinemnan, 2015) e o de milho é de 0,63 (Ferreira Junior *et al.*, 2014). O k é alterado pela arquitetura foliar, que pode variar conforme os genótipos, pois com o melhoramento genético, tem-se obtido plantas com menor estatura e folhas mais curtas, estreitas e eretas a fim de aumentar a densidade de semeadura (Bergamaschi; Bergonci, 2017). Vale destacar que na cultura do milho, as variedades crioulas ainda são muito usadas, principalmente pelos agricultores familiares, e apresentam grande variabilidade genética (Lima *et al.*, 2020), destacando a importância de estudar diferentes variedades de milho crioulo sob consórcios, principalmente em SAF's. Além disso, o k pode ser usado como indicador do estado hídrico da planta, pois sob déficit hídrico as folhas das plantas tendem a murchar ou enrolar e a modificar sua orientação solar. Em plantas irrigadas de milho foi observado k de 0,63 (Ferreira Junior *et al.*, 2014), entretanto, em milho em déficit hídrico Farré; Faci (2006) observaram k de 0,37. Os autores também relatam da importância de considerar o k variável ao longo da cultura e conforme o manejo adotado.

Para analisar arranjos de plantas é importante calcular índices que expliquem numericamente o que acontece no dossel das plantas, como

demonstrado em Bergamaschi; Bergonci (2017). A radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo dossel (RFA_{int}) pode ser calculada pela diferença entre o fluxo incidente sobre o dossel (RFA_i) e o fluxo transmitido pelo dossel (RFA_t):

$$RFA_{int} = RFA_i - RFA_t \quad (3)$$

Entretanto, uma parte da radiação interceptada não será absorvida pela planta, e por isso, pode-se calcular a RFA absorvida pelo dossel (RFA_a) mediante a subtração do fluxo incidente sobre o dossel (RFA_i), fluxo transmitido pelo dossel (RFA_t), e o fluxo refletivo pelo sistema solo+cultura (RFA_{rsc}), e somar ao fluxo refletido pelo solo (RFA_{rs}), pois parte da radiação solar que chega na superfície do solo pode ser absorvida ou refletida pelas partículas presentes na superfície:

$$RFA_a = RFA_i - RFA_t - RFA_{rsc} + RFA_{rs} \quad (4)$$

A partir desses dados é possível calcular a eficiência da interceptação (ϵ_{int}) e eficiência da absorção (ϵ_a):

$$\epsilon_{int} = RFA_{int} / RFA_i \quad (5)$$

$$\epsilon_a = RFA_a / RFA_i \quad (6)$$

Não obstante, a diferença entre as duas eficiências pode ser baixa. Em um híbrido precoce de milho, em condição irrigada e não irrigada, apenas 8% da radiação interceptada não foi absorvida (Müller; Bergamaschi, 2005).

Para realizar os cálculos supracitados, é necessário mensurar os valores. A medição da radiação solar pode ser realizada por sensores, dos quais, os piranômetros são os mais utilizados, e as leituras são realizadas diretamente no equipamento, ou por sistema automático que armazenam dados, como os dataloggers. Para medir a RFA, existem equipamentos específicos, dentre eles, o tipo quantum. Também há a possibilidade de colocar células fotovoltaicas de silício amorfo ligadas em paralelo para medir a RFA no interior a vegetação (Bergamaschi; Bergonci, 2017).

Assim, acima do dossel são colocados sensores para medir os fluxos de radiação incidente e refletida pelo sistema solo+cultura, inseridos a uma certa altura acima do dossel para a correta medição. Outros sensores na base das plantas e acima da superfície do solo devem ser instalados para medir a radiação refletida pelo solo. Para obter medidas de interceptação da radiação solar, são necessárias apenas medidas de radiação incidente e transmitida em culturas individuais. Em consórcios, o perfil vegetal deve ser segmentado, distribuindo os sensores conforme a estatura a ser analisada (Bergamaschi; Bergonci, 2017).

O acúmulo de RFAint aumenta linearmente a massa seca da soja, entretanto, esse comportamento varia conforme a cultivar e época de semeadura (Schöffel; Volpe, 2001). Outros fatores também influenciam a eficiência do uso da radiação solar, como o déficit hídrico (Müller; Bergamaschi, 2005), adubação (Ribeiro *et al.*, 2007), excesso hídrico e geada (Nied, 2013). O tipo de metabolismo também influencia, comparando uma planta C3 (soja) e uma C4 (milho), em condição hídrica irrigada, o milho apresentou mais que o dobro de eficiência de uso da radiação solar do que a soja (Müller *et al.*, 2005; Martorano, 2007). Entretanto, os valores foram expressos em gramas, se fossem apresentados em valor calórico, a diferença poderia ser menor devido a soja acumular maior teor de proteína e de lipídios do que o milho. Além desses fatores, a nebulosidade pode causar redução de 85% da R_s em relação a um dia ensolarado (Schöffel *et al.*, 2021).

A radiação solar está diretamente relacionada a produtividade. Uma redução de apenas 30% da radiação solar aumenta a lacuna de produtividade para 8,9 e 5,8 t ha⁻¹, dependendo da cultivar de milho, devido a diminuição da RFAint total, resultando em redução da matéria seca da parte aérea em 11,1% no espigamento, 21% na maturidade e de 50,5% das raízes (Yang *et al.*, 2021b). No feijão em consórcio com milho, a restrição na luminosidade pode causar uma redução na produtividade de 70 a 80% em comparação ao cultivo solteiro, porque, mesmo sendo uma planta C3, com saturação de radiação solar reduzida, a RFA disponibilizada ao feijão sob consórcio com milho é inferior a sua necessidade (Costa; Silva, 2008).

Sob restrição de radiação solar de 50% em vasos, Lacerda *et al.* (2010) avaliaram o crescimento do milho e do feijão. Os autores concluíram que o milho foi mais eficiente no crescimento inicial por ter maior eficiência no uso da

radiação, mesmo com restrição de 50% da Rs, e que isso pode sugerir uma melhor adaptação do milho à baixa luminosidade. Entretanto, no milho e no feijão o sombreamento reduziu a matéria seca total, por apresentar menores valores das massas secas do limbo, haste e raiz. Por outro lado, a área foliar foi maior sob restrição de 50% da Rs, sendo uma resposta morfológica adaptativa a baixa luminosa, buscando aumentar a área de captação de energia. O milho, por ser uma planta C4, apresentou melhor resultado quanto ao crescimento em comparação ao feijão, uma planta C3, em ambiente de restrição luminosa e em pleno sol.

Buscando avaliar o efeito da radiação solar no consórcio de milho e feijão em diferentes arranjos (uma linha de milho e uma linha de feijão, duas linhas de feijão e duas linhas de milho e três linhas de feijão e duas linhas de milho), Noveline (2018) conduziu dois experimentos em Pelotas, RS nos anos de 2015 e 2016. Os resultados indicam que consórcios com menores espaçamentos receberam menores quantidades de Rs, mas que em todos os arranjos consorciados, o feijão foi prejudicado quanto a luminosidade. Entre os arranjos avaliados, uma linha intercalada de cada espécie proporcionou maior sombreamento do milho sobre o feijão, e no arranjo com três linhas de feijão e duas de milho, o menor sombreamento. Mesmo sob maior espaçamento, de três linhas de feijão, a Rs apresentou uma redução de 26% em 2015 em relação ao cultivo solteiro. Isso foi expresso em menor produtividade do feijão em todos os consórcios em relação ao cultivo em solteiro. Enquanto que o milho com uma linha intercalada com feijão não diferiu na produtividade de solteiro, indicando que pode haver uma produção extra de feijão sem perder produção no milho. A autora também observa que sob âmbito da oscilação diária da Rs, até às 9 horas a Rs disponibilizada não sofre efeito dos tratamentos, mas após esse horário, inicia o efeito do sombreamento do milho sobre a cultura do feijão.

Em busca da complexação do sistema produtivo, o estudo da oferta de Rs em consórcios sob SAF's são cruciais, ao mesmo tempo que escassos. Em São Paulo, SP de 2013 a 2019 foram conduzidos experimentos com um sistema integrado lavoura-pecuária-floresta e um sistema integrado pecuária-floresta, composto por pastagem de capim-paliçada (*Urochloa brizantha*) e eucaliptos (*Eucalyptus urograndis*) (Pezzopane *et al.*, 2021). Obtiveram de resultado que na primavera/verão houve maior transmissão de RFA para a pastagem (75% a

52%), em comparação ao outono/inverno (61% a 41%), devido a maior inclinação solar que causou menor transmissão de RFA pelas árvores. Destacam que o desbaste das árvores causou um aumento de RFA de 51% para 67% nos verões subsequentes, o que pode ser uma técnica de manejo eficiente.

Em estudo com videira na Serra Gaúcha, Radünz *et al.* (2013) observaram que a poda seca influencia o albedo da videira Bordô, e o acúmulo de sólidos solúveis possui relação positiva com a radiação solar disponível ao nível dos cachos. Em outro estudo com amora-preta, foi constatado que em dias nublados ocorre diminuição na radiação solar incidente, diminuindo em 85% o balanço de ondas curtas para todas as três épocas de poda, não obstante, referente ao balanço de ondas longas, a nebulosidade reduziu em 60% a radiação solar incidente na poda tardia e 50% na poda precoce e convencional em relação ao dia ensolarado (Schöffel *et al.*, 2021). Possivelmente, as plantas na poda precoce e convencional estavam com maior área foliar, resultando em maior área de perda de energia radiante emitida pela superfície em direção a atmosfera, resultando em menor diminuição no balanço de ondas longas em comparação com a poda tardia.

Outro estudo conduzido em São Paulo, SP foi avaliado dois sistemas, o primeiro, um sistema integrado lavoura-pecuária (milho semeado simultaneamente com o capim piatã) e o sistema de integração lavoura-pecuária-floresta (milho, capim piatã e *Eucalyptus urograndisas*) (Pezzopane *et al.*, 2019). A produção de milho no sistema lavoura-pecuária-floresta apresentou redução de 43,3% do segundo ano de cultivo em relação ao primeiro ano (5.266,1 vs. 9.816,7 kg massa seca ha⁻¹), e menor produção nas plantas próximas à linha das árvores. Nesse caso, foi possível observar que RFA inferior a 85% causa redução na produção de milho, entretanto, vale destacar que ocorreu déficit hídrico nesse período de produção do milho. Por outro lado, o sistema lavoura-pecuária apresentou média de 10.082,0 kg massa seca ha⁻¹, comprovando que a redução da radiação solar em consequência do sombreamento das árvores causa redução na produtividade do milho. Para a pastagem, a produção relativa indica que até uma transmissão de RFA de 35%, a produção foi maior com floresta.

Um estudo conduzido na China comparando dois SAF's (1: jujuba (*Zizyphus jujuba* Mill.) + trigo (*Triticum aestivum* L.) e 2: choupo (*Populus* L.) +

alfafa (*Medicago sativa* L.), avaliaram rendimento e teor de proteína, além da temperatura do ar e PAR no dossel (Yang *et al.*, 2021a). A RFA e a temperatura do ar foram medidas na linha das árvores, na linha central do cultivo (cerca de 3 m de distância das árvores), ½ linha central (cerca de 1,5 m da linha de árvores), e ⅓ linha central (cerca de 1 m da linha de árvores). As medições da RFA ocorreram às 12 h em dia não nublado e em dois momentos, no início do estabelecimento e enchimento dos grãos para o trigo, e no estabelecimento e na fase de rebrote da alfafa. A temperatura do ar foi medida na mesma altura da RFA, só que medidas horárias durante o dia em todo o experimento. Os resultados demonstraram que a competição por recursos nos sistemas causou redução na produtividade do grão de trigo e do feno de alfafa, bem como reduções no teor de proteína do trigo e da alfafa. Isso ocorreu, pela diminuição da RFA e da temperatura do ar nas parcelas dos sistemas. Entre as linhas avaliadas, o rendimento e o conteúdo de proteína das culturas, RFA e a temperatura do ar foram maiores na linha central do sistema e diminuíram com a aproximação das árvores. O tipo de SAF alterou a RFA no dossel do cultivo e causou redução de 20,2% e 25,0%, para o trigo e alfafa, respectivamente, quando comparado com a monocultura. A temperatura do ar no dossel também variou de acordo com o modo de cultivo das culturas e a distância da fileira de árvores nos sistemas, em que as temperaturas máximas, tanto do trigo (-5,7°C) quanto alfafa (-8,2°C) foram maiores no monocultivo do que nos SAF's.

Em outro estudo no norte do RS, também foi verificado que as características do dossel das árvores influenciaram na dinâmica da radiação solar (Sgarbossa *et al.*, 2020). Os autores avaliaram quatro diferentes espécies florestais (*Schizolobium parahyba*, *Peltophorum dubium*, *Parapiptadenia rígida* e *Eucalyptus urograndis*), observaram maiores valores de transmissividade obtidos em *Parapiptadenia rígida* e por consequência, maior produtividade. Em 2017, os maiores valores de transmissividade foram observados para *P. rígida* (73,7%), sendo 19,4% maior em relação a *E. urograndis*, 44,3% para *P. dubium* e 57,0% para *S. parahyba*. Isso ocorreu porque a espécie é decídua e perde as folhas no inverno, e esse processo de senescência foliar ocorreu para essa espécie antes das outras. A eficiência na conversão de radiação solar para biomassa ocorreu sob níveis mais elevados de sombra, com maior valor em *S. parahyba* (6,5 MJ m⁻²).

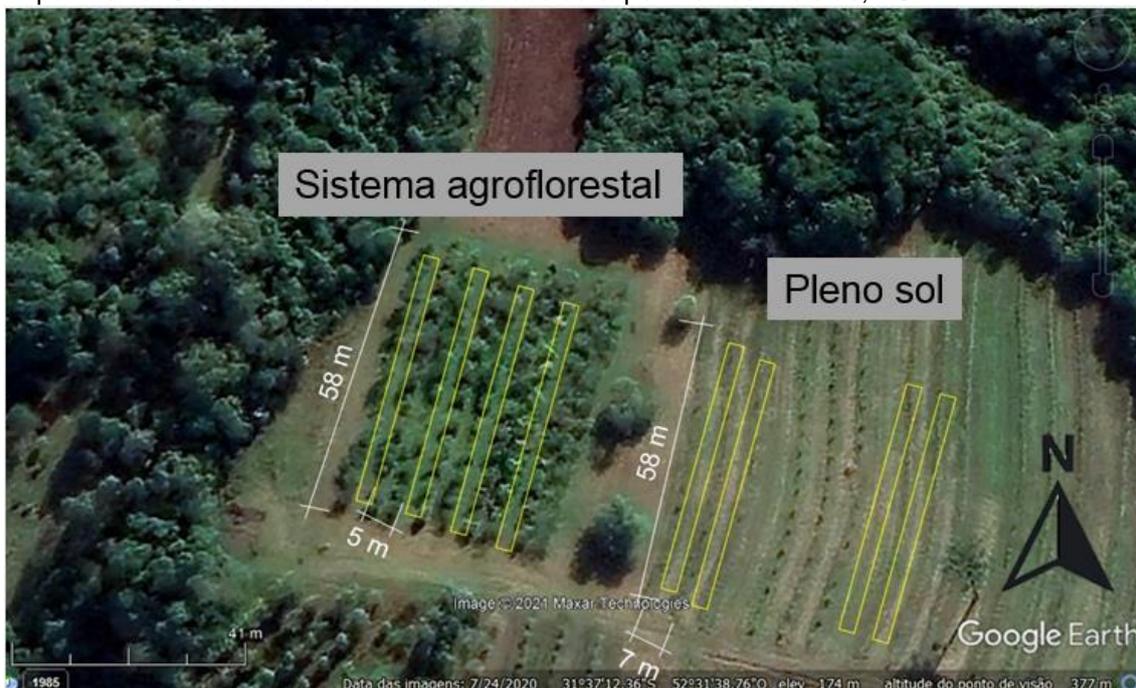
Como observado, a oferta de radiação solar é fator crítico para o alcance produtivo dos genótipos, e o sombreamento causado por outras espécies pode limitar esse potencial, entretanto, o quanto essa limitação influencia a dinâmica da radiação solar dentro de um consórcio de milho e feijão em sistema agroflorestal, e o quanto que isso pode reduzir a produção ainda são dados não divulgados, destacando a necessidade desta pesquisa.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e caracterização da área experimental

Dois experimentos foram conduzidos na Embrapa Clima Temperado, Estação Experimental Cascata (Latitude 31°37'S, Longitude 52°31' W, 173 m). O primeiro com semeadura em outubro/2021 e o segundo em outubro/2022. Os experimentos foram conduzidos em duas áreas próximas (Figura 1), a primeira, um sistema agroflorestal (SAF) implantado em 2013 na direção NNE-SSW, composto por espécies frutíferas e florestais espaçadas a 5 m entre fileiras. Os nomes comuns e científicos das espécies e suas estaturas médias obtidas na safra 2022/23 constam na Tabela 3. A segunda área, ao lado do SAF representou o cultivo tradicional a pleno sol (PS). Na Figura 2 é possível observar uma entre linha do SAF onde foram cultivadas as graníferas (A) e do PS (B) após o solo ter sido arado e gradeado, e posteriormente com os cultivos (C) e (D), respectivamente, após uma capina manual.

Figura 1 - Imagem das áreas experimentais na Embrapa Clima Temperado, Unidade Experimental Cascata onde foram conduzidos os experimentos. Pelotas, RS.



Fonte: Google Maps.

Tabela 3 – Nome e estatura das espécies arbóreas do sistema agroflorestal. Pelotas, RS.

Espécies		Estatura (m)
Nome comum	Nome científico	
Nogueira pecã	<i>Carya illinoensis</i> (Wangenh.) K. Koch	6,0
Caqui	<i>Diospyros kaki</i> L.	3,2
Tangerina	<i>Citrus bergamia</i> R.	2,5
Laranja	<i>Citrus sinensis</i> L.	3,4
Goiaba	<i>Psidium guajava</i> L.	4,3
Butiá	<i>Butia</i> sp	2,1
Trema	<i>Trema micrantha</i> (L.) Blum	5,4
Pêssego do mato	<i>Prunus myrtifolia</i> L.	5,4
Timbaúva	<i>Enterolobium contortisiliquum</i> (Vell.) Morong	9,1
Guajuvira	<i>Patagonula americana</i> L.	4,9
Açoita cavalo	<i>Luehea divaricata</i> Mart.	5,5
Louro pardo	<i>Cordia trichotoma</i> (Vellozo) Arrabida ex Steudel	5,4
Cedro	<i>Cedrela fissilis</i> Vell.	4,9
Canafístula	<i>Peltophorum dubium</i> (Sprengel) Taubert	8,2

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 2 - Imagens das áreas experimentais, sistema agroflorestal (A) e pleno sol (B), durante o preparo do solo e posteriormente com as graníferas (C) e (D), respectivamente. Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

O delineamento experimental utilizado foi o delineamento de blocos ao acaso, com três repetições em 2021/22 e quatro repetições em 2022/23, utilizado duas espécies (milho e feijão) em esquema fatorial composto por três

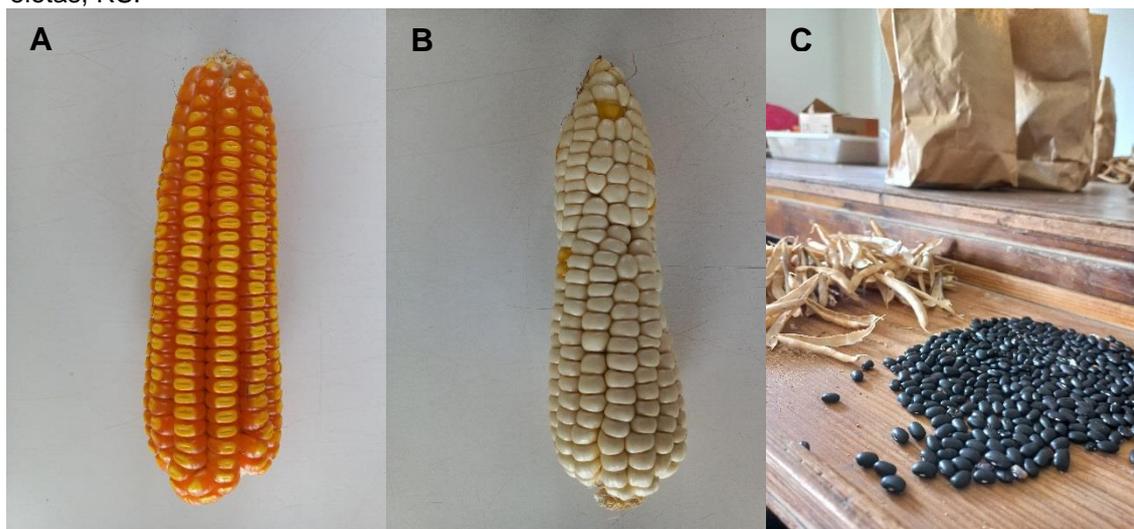
arranjos de cultivo (solteiro, consócio 1:1 e consócio 2:2) e dois ambientes de cultivo (SAF e PS) demonstrado na Tabela 4. Cada unidade experimental possuiu área de 15 m² (3 x 5 m) no SAF e 20 m² (4 x 5 m) no PS, considerando a bordadura. O espaçamento dos cultivos foi de 0,8 m entre linhas e 0,25 m entre plantas para o milho, totalizando 5 sementes por metro linear, e de 0,40 m entre linhas e 0,10 m entre plantas para o feijão, totalizando 10 sementes por metro linear. As cultivares de milho utilizadas foram ‘BRS 019 TL’ (Tupi Laranja) e ‘BRS 015FB’ (Farináceo Branco), ambas foram selecionadas por serem as utilizadas pelos agricultores familiares locais, apresentarem rusticidade, diferentes estaturas e propósitos de uso. A ‘BRS 019 TL’ é utilizada para produção de grãos e a ‘BRS 015FB’ de farinha (Schiedeck et al., 2021). O feijão utilizado foi a cultivar BRS Paisano, pertencente ao grupo de grãos pretos, amplamente utilizada pelos agricultores familiares locais por apresentar elevado potencial produtivo (CONAB, 2023). Na Figura 3 podem ser observadas as sementes da ‘BRS 019 TL’ (A), ‘BRS 015FB’ (B) e ‘BRS Paisano’ (C).

Tabela 4 – Tratamentos avaliados nos ambientes de cultivo. Pelotas, RS.

Ambiente de cultivo	
Sistema agroflorestal	Pleno sol
Feijão solteiro	Feijão solteiro
Milho solteiro ‘BRS 019 TL’	Milho solteiro ‘BRS 019 TL’
Milho solteiro ‘BRS 015FB’	Milho solteiro ‘BRS 015FB’
Consócio 1:1 ‘BRS 019 TL’	Consócio 1:1 ‘BRS 019 TL’
Consócio 2:2 ‘BRS 019 TL’	Consócio 2:2 ‘BRS 019 TL’
Consócio 1:1 ‘BRS 015FB’	Consócio 1:1 ‘BRS 015FB’
Consócio 2:2 ‘BRS 015FB’	Consócio 2:2 ‘BRS 015FB’

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 3 - Sementes das cultivares BRS 019 TL (A), BRS 015FB (B) e BRS Paisano (C). Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

As análises químicas do solo foram coletadas em zig-zag, em agosto de cada ano agrícola no período da manhã, realizando doze coletas, homogeneizando-as e retirando uma amostra final. As análises revelaram teores de 2,7 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ e 1,4 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ de Ca, 1,4 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ e 1,5 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ de Mg, 0,1 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ e 0,1 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ de Al, 4,4 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ e 3,1 $\text{cmol}_c/\text{dm}^3$ de CTC efetiva, 17,9 mg/dm^3 e 9,0 mg/dm^3 de P, 83 mg/dm^3 e 34 mg/dm^3 de K, 2,3% e 3,2% de saturação de Al, 53% e 52% de saturação de bases, 6,1 e 6,4 de índice SMP, 2,07% e 1,52% de matéria orgânica, 23% e 21% de argila, para o PS e SAF, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5 - Diagnóstico para acidez do solo e calagem para os ambientes pleno sol (PS) e sistema agroflorestal (SAF) em 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.

Diagnóstico	Unidade	2021/22		2022/23	
		PS	SAF	PS	SAF
Matéria orgânica	%	2,1	1,5	2,6	1,9
P	mg/dm^3	17,9	9,0	17,8	5,2
K	mg/dm^3	83,0	34,0	82,0	47,0
Ca	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	2,7	1,4	3,9	4,0
Mg	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	1,4	1,5	1,7	1,9
Al	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	0,1	0,1	0,1	0,1
CTC efetiva	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	4,4	3,1	6,0	6,2
CTC pH7	$\text{cmol}_c/\text{dm}^3$	8,2	5,8	9,4	9,6
Índice SMP	-	6,1	6,4	6,2	6,2
Argila	%	23,0	21,0	21,0	20,0

Fonte: Elaborada pela autora.

Inicialmente a área experimental estava em pousio e infestada de grama seda (*Cynodon dactylon*), a qual possui difícil controle no sistema orgânico, assim, o preparo do solo consistiu em arado, gradagem e manutenção por capinas. Foram realizadas análises químicas do solo para corrigir os níveis nutricionais, conforme a recomendação técnica (CQFS-RS/SC, 2016), com adubo de esterco de peru peletizado na dose de 800 g linha⁻¹ de base no milho e no feijão, e 800 g linha⁻¹ em cobertura somente no milho. A semeadura ocorreu com auxílio de saraquá, adicionadas duas sementes por berço, aproximadamente, a 5 cm de profundidade. O espaçamento dos cultivos foi de 0,8 m entre linhas e 0,25 m entre plantas para o milho, totalizando cinco sementes por metro linear, e de 0,4 m entre linhas e 0,1 m entre plantas para o feijão, totalizando 10 sementes por metro linear. Na safra de 2021/22 a semeadura ocorreu em 08/10/21 e ressemeadura em 21/10/21. Na safra de 2022/23, em 14/10/22 e 25/10/22, ocorreram a semeadura e ressemeadura, respectivamente. Na Figura 4 pode ser observada a semeadura com saraquá e a capina manual.

Figura 4 - Semeadura com saraquá e capina manual do experimento. Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

A única aplicação para controle de pragas ocorreu em a safra 2022/23, sendo aplicado *Baccilus thuringiensis* para controle da lagarta-do-cartucho no milho. Para espantar pássaros que estavam comendo as sementes e plântulas de milho e de feijão, foram inseridos cata-ventos confeccionados a partir de latas de alumínio em conjunto a adição de sacos vermelhos, conforme pode ser observado na Figura 5.

Figura 5 - Estrutura para espantar pássaros durante o estabelecimento do experimento. Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

3.2. Dados meteorológicos

As condições meteorológicas durante o período experimental foram caracterizadas a partir de dados coletados em quatro estações meteorológicas automáticas (EMAs). A EMA1 foi instalada no interior do SAF; a EMA2, localizada a 110 m da área experimental; e a EMA3 pertencente ao INMET A887, localizada a 23 km de distância em linha reta da área experimental. Além disso, em virtude de uma tempestade que interrompeu o registro dos dados da EMA2

em janeiro de 2022, os dados faltantes foram adquiridos da estação meteorológica automática da Embrapa (EMA4) localizada a 12 km de distância da área experimental.

Na EMA1, a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) foi medida com um sensor quântico LI-COR, modelo LI190, posicionado a 1 m acima da superfície do solo. A temperatura do ar foi registrada com termômetros de bulbo seco, instalados dentro de um abrigo termométrico a 2 m acima do solo. Ambos os instrumentos foram configurados em uma unidade experimental com o tratamento de feijão solteiro. Os instrumentos meteorológicos foram ligados a um sistema de aquisição de dados 'datalogger' modelo CR1000 (Campbell Scientific®), armazenando a cada 15 minutos um valor médio para os valores instantâneos medidos a cada um segundo. Da EMA2 foram coletados dados de precipitação pluvial (mm) e temperatura do ar (°C) durante o ano agrícola de 2021/22, e no de 2022/23 foram coletados até o dia 29/01/2023 quando, devido a uma tempestade, foi interrompido o registro dos dados, sendo necessária a utilização de dados da EMA4. Da EMA3 foram utilizados dados de radiação solar global (Rs) ($\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$). A partir dos dados meteorológicos foi calculada a evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Jensen Haise modificado para Pelotas-RS (Hallal *et al.*, 2014). Os dados de Rs foram convertidos para radiação fotossinteticamente ativa (RFA) utilizando o índice de 0,47 estimado para Pelotas (Assis; Mendez, 1989). Os dados de Rs em 2021/22 no SAF foram estimados a partir da relação obtida entre a Rs externa e interna do SAF coletada em 2022/23. A EMA1 pode ser observada na Figura 6.

Figura 6 - Estação meteorológica automática EMA1 instalada no interior do sistema agroflorestal. Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

A radiação solar global incidente nos extratos vegetativos foi medida em todas as unidades experimentais no SAF e no PS com piranômetro portátil (Li-Cor, modelo LI-185B), a distância de 0,5 m acima do dossel do milho, 0,5 m acima do dossel do feijão e sob a superfície do solo, realizada próxima a passagem meridiana do Sol, ao meio-dia, quando o ângulo horário (h) é de 0° , durante o intervalo entre 11 horas ($h = -15^\circ$) e 13 horas ($h = 15^\circ$), nos dias 08/12/2021 e 14/12/2022, quando as plantas de feijão estavam na floração (R6), e nos dias 11/01/2022 e 19/01/2023, quando as plantas de milho estavam no pendoamento (VT). Esses estádios fenológicos foram escolhidos por serem as fases sensíveis à produção de grãos das culturas, comumente estudada na literatura (Pias *et al.*, 2017; Pohlmann *et al.*, 2022a) e também porque no início da fase reprodutiva, o crescimento e a área foliar da planta estão estabelecidos. As datas 11/01/22 e 14/12/22 foram dias ensolaradas e as datas 8/12/21 e 19/1/23 dias nublados.

Nas mesmas datas supracitadas, foram medidas as temperaturas foliares com um termômetro digital infravermelho (GM 320), entre às 14h e 15h. As temperaturas foliares foram medidas em folhas totalmente expandidas no terço superior da planta, no centro da folha desviando da nervura central, e no caso

do feijão, no folíolo central do trifólio, ambos a uma distância de 300 mm e emissividade fixa de 0,95, conforme indicado pelo equipamento. Na Figura 7 é possível observar o piranômetro portátil e o termômetro infravermelho utilizado.

Figura 7 - Medição da radiação solar global instantânea com piranômetro portátil (A) e medição da temperatura foliar com um termômetro digital (B). Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

Com os dados de radiação solar, foi calculada a sua transmissividade pela equação:

$$T = (RS_{saf} / RS_{ps}) * 100 \quad (7)$$

onde, T = transmissividade (%); RS saf= radiação solar incidente dentro do sistema agroflorestal ($W m^{-2}$); RS ps = radiação solar incidente fora do sistema agroflorestal ($W m^{-2}$) (Sgarbossa *et al.*, 2020).

Foi calculado também o coeficiente de extinção (k) nos dias do florescimento para cada espécie, 11/01/2022 e 19/01/23 para o milho e 08/12/21 e 14/12/22 para o feijão, conforme equação de Cunha; Volpe (2010):

$$k = -\frac{\ln\left(\frac{RFA_t}{RFA_i}\right)}{IAF} \quad (8)$$

onde RFA_t e RFA_i são valores de radiação fotossinteticamente ativa transmitida abaixo do dossel da planta de milho e de feijão e a incidente acima do dossel, respectivamente. IAF é o índice de área foliar, obtido por meio da divisão entre a área foliar da planta (m² planta⁻¹) e a área ocupada pela planta (m²).

A eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (ϵ_{int}) foi calculada conforme descrito por Bergamaschi; Bergonci (2017):

$$\epsilon_{int} = \frac{RFA_{int}}{RFA_i} \quad (9)$$

$$RFA_{int} = \frac{RFA_{planta}}{RFA_{solo}} \quad (10)$$

onde RFA_{int} é a radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo milho ou pelo feijão (RFA planta) e a que é transmitida por estas, medidas ao nível do solo (RFA solo); e RFA_i a incidente acima do dossel.

3.3. Avaliações

Durante as fases R6 do feijão (Fernandez; Geptz; Lopes, 1986) e VT do milho (Ritchie; Hanway; Benson, 1993) foram coletados dados fenométrico das plantas, referentes a estatura (cm), número de nós, diâmetro do colmo do milho e da haste do feijão (mm) e área foliar (cm² planta⁻¹). Na Figura 8 está exemplificada as medições no feijão. A área foliar foi determinada a partir do somatório do produto das medidas lineares (comprimento (C) e largura (L)) de todas as folhas do milho, e de todos os comprimentos dos folíolos centrais dos trifólios do feijão, conforme a equação utilizada para o milho, de número 11 (Montgomery, 1911) e do feijão, de número 12 (Pohlmann *et al.*, 2021):

$$AF: \sum n^{\circ}\text{folhas } 0,75 \text{ CL} \quad (11)$$

$$AF = \sum n^{\circ}\text{folíolos centrais } 1,092 \text{ C}^{1,945} \quad (12)$$

Figura 8 - Medição da estatura (A), diâmetro da haste (B) e comprimento do folíolo central do trifólio para estimar área foliar da planta do feijão (C). Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

No final do ciclo todas as plantas foram colhidas de cada linha de cultivo para a determinação individual da produtividade e, ainda, em cinco plantas de cada linha foram avaliados os componentes de rendimento. Os componentes de rendimento avaliados foram: número de vagens granadas, grãos por vagem e grãos por planta para o feijão, grãos por espiga, comprimento e diâmetro das espigas para o milho, além da produção por planta (g planta^{-1}) e produtividade (Kg ha^{-1}) estimada para ambas as culturas (Figura 9). O peso da produção de grãos foi ajustado para 13% de umidade, conforme umidade medida em cada unidade experimental com auxílio de um analisador de umidade (Gehaka Agri/G650).

Figura 9 - Medição do número de vagens (A) e espigas (B), número de grãos por vagem (C), diâmetro da espiga (D) peso dos grãos por linha de feijão (E) e de milho (F). Pelotas, RS.

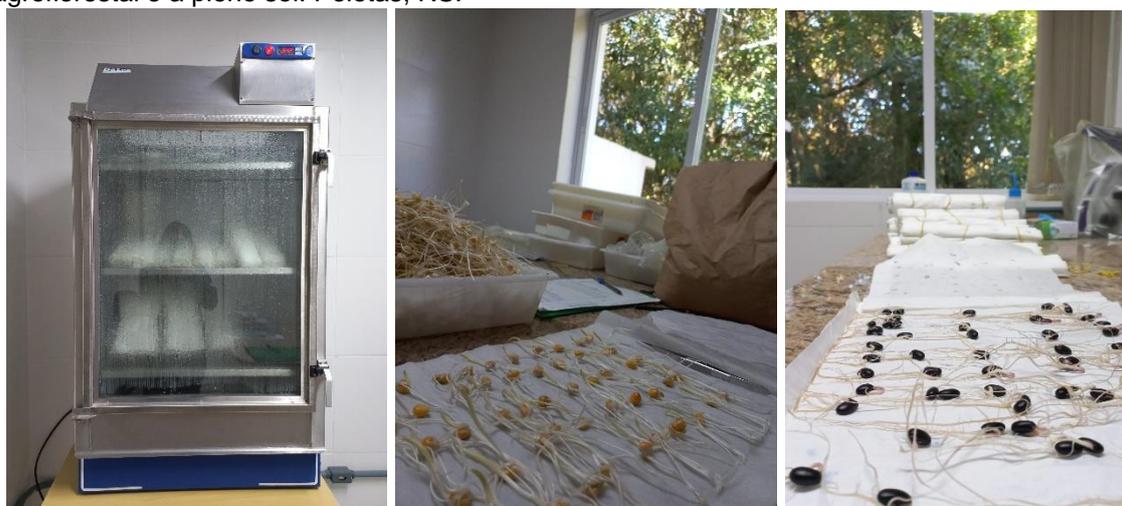


Fonte: Elaborada pela autora.

3.4. Teste de germinação

As sementes colhidas foram secas ao sol até atingirem aproximadamente umidade de 13% medida com auxílio de um analisador de umidade (Gehaka Agri/ G650). Todas as sementes de cada repetição foram misturadas e obtidas uma amostra única, e destas, retiradas quatro repetições. Para o teste de germinação, realizou-se quatro repetições de 100 sementes, totalizando 400 sementes por tratamento, distribuídas entre folhas de papel germinador pré-umedecidas com água destilada equivalente a 2,5 vezes a sua massa, enroladas, levadas ao germinador à temperatura média do ar de 25° C, e avaliadas no quarto e sétimo dia para o milho e quinto e nono dia para o feijão (Figura 10). A contagem ao quarto e quinto dia foi denominada como primeira contagem do teste de (PCG) e a segunda, como teste de germinação (TG). Os resultados foram expressos em porcentagem de germinação de plântulas normais (Brasil, 2009). Também foi obtido o peso de 1000 sementes (Brasil, 2009).

Figura 10 - Teste de germinação nas sementes de milho e de feijão produzidas no sistema agroflorestal e a pleno sol. Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

3.5. Índices para mensurar eficiência biológica

A estimativa referente a participação da produtividade de cada cultura no consórcio será avaliada por meio do uso eficiente da terra (UET). A equação proposta por Mead; Willey (1980) refere-se a área de terra necessária nas monoculturas para produzir as mesmas produtividades do consórcio:

$$UET = \frac{Y_m}{X_m} + \frac{Y_f}{X_f} \quad (13)$$

em que Y_m e Y_f são as produtividades do milho e feijão, respectivamente, em consórcio, X_m e X_f são as produtividades das culturas em monocultivo. Se $UET > 1$ houve vantagem produtiva, se $UET = 1$ não houve vantagem produtiva, se $UET < 1$ houve desvantagem produtiva.

O Coeficiente Equivalente de Terra (CET) avalia a interação entre as culturas em consórcio. O CET é calculado pela metodologia proposta por Adetiloye *et al.* (1983):

$$CET = UET_m * UET_f \quad (14)$$

em que UET_m e UET_f representam o uso eficiente de terra parcial do milho e feijão, respectivamente. Em consórcio entre duas cultivares, os autores mencionam que se espera um CET de 0,25 ou 25% para o consórcio ser viável, possuir vantagem de produtividade sobre o monocultivo. Esse valor surge da produtividade teórica de 50:50, onde a competição interespecífica é igual a intraespecífica.

3.6. Análise estatística

Os dados coletados foram analisados quanto ao atendimento aos pressupostos do modelo matemático, de normalidade do erro experimental com auxílio do teste Shapiro Wilk, e de homogeneidade das variâncias pelo teste Bartlet. Quando não atendidos, os dados foram transformados por BoxCox por meio do software Action (2014). Os dados foram analisados pelo teste de variância, e quando significativo, suas médias foram distinguidas pelo teste Tukey a 0,05 de probabilidade do erro com o software R (R Core Team, 2020). Para os dados meteorológicos, as médias foram distinguidas pelo teste t ($p < 0,05$) com o software R (R Core Team, 2020). Também foram realizadas análises de correlações entre as variáveis pela análise dos componentes principais (PCA) com uso do pacote “FactoMineR” software R (R Core Team, 2020).

4. CAPÍTULO 1 – CARACTERIZAÇÃO MICROMETEOROLÓGICA DO CULTIVO DE MILHO E DE FEIJÃO EM UM SISTEMA AGROFLORESTAL

4.1. Introdução

O aumento dos gases poluentes na atmosfera preocupa a produção futura de alimentos. Em primeiro instante, o aumento de CO₂ pode parecer favorável, aumentando a produção do milho e do feijão (Braga *et al.*, 2021), entretanto, segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), o aumento do dióxido de carbono, metano e óxido nitroso atingiram níveis extremos em 2022 e traz como consequências diminuição das geleiras e aumentos da temperatura média global e do nível médio do mar. O mesmo relatório do IPCC (2023) destaca que esse cenário causa condições meteorológicas adversas, como calor extremo, incêndios florestais e inundações, aumentando a vulnerabilidade e insegurança alimentar da população. Torna-se crucial uma agricultura convergente à preservação do meio ambiente e a mitigação das mudanças climáticas.

Neste contexto, intensifica-se o uso dos sistemas agroflorestais (SAF's) por ser um sistema de manejo que concilia a produção agrícola com a conservação das árvores e dos ecossistemas naturais. Os SAF's consistem em consórcios de plantas anuais e perenes, com criação ou não de animais, objetivando diversificar a produção de alimentos com renda contínua ao longo do ano, evitando lacunas produtivas, e ao mesmo tempo preservando o meio ambiente (Camargo; Pereira; Dias Filho, 2023).

As linhas com as arbóreas contribuem para a construção de um microclima favorável ao crescimento das culturas, reduzindo a velocidade do vento (Kanzler *et al.*, 2019) e proporcionando maior umidade relativa do ar e menor temperatura do ar (Castillo; Tiezzi; Franzluebbbers, 2020). Em estudo com trigo consorciado com *Robinia pseudoacacia* L. e o clone 'Max' (*Populus nigra* L. x *P. maximowiczii* Henry) na Alemanha, Kanzler *et al.* (2019) observaram que no SAF houve reduções de até 93% na velocidade do vento durante a noite, de até 32% na demanda evaporativa da atmosfera e de 1°C na temperatura diurna do ar, além do aumento em 1°C na temperatura noturna do ar em comparação ao ambiente externo. Ao avaliar o microclima de um SAF com idade de 10 anos nos Estados Unidos, composto por três espécies florestais (*Pinus palustris*, *Pinus taeda* e *Quercus pagoda*) Castillo; Tiezzi; Franzluebbbers (2020) verificaram diminuição na temperatura do ar em até 1°C durante o dia e aumento de até 0,5°C durante a noite e comportamento inverso da umidade relativa do ar, com aumento de até 3% durante o dia e diminuição de até 1% durante a noite.

Não obstante, a oferta de radiação solar global (R_s) é menor nas entrelinhas das árvores e a tolerância a sombra da espécie a ser cultivada deve ser considerada. Na África Oriental em um SAF composto por *Alnus acuminata* (Kunth) e *Markhamia lutea* (Seem.) Ndoli *et al.* (2017) observaram redução da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) de 47 a 67% a 1 m de distância e de 14 a 17% a 3 m de distância. Em milho consorciado com pau-branco no Brasil, Mendes *et al.* (2013) observaram redução aproximada de 71,2% aos 30 dias após a semeadura entre a RFA da área a pleno sol e 1 m de distância das árvores. Em um SAF consolidado de 10 anos em Pelotas, RS composto por diversas espécies florestais e frutíferas foi verificado, em dias específicos do período reprodutivo das plantas de milho e de feijão, uma

atenuação na transmissividade da Rs de até 33,5%, o que causou uma redução na produtividade de 60% no milho e de 56,5% no feijão (Pohlmann *et al.*, 2024).

Ao longo do tempo as árvores amadurecem, crescem e tendem a acentuar o sombreamento, tornando o manejo da poda crucial para a perpetuação da produção de grãos nas entrelinhas (Ndoli *et al.*, 2017). Ao mesmo tempo que árvores de grande estatura podem prejudicar a produção por aumentar o sombreamento, árvores com estaturas maiores que 7 m atenuam variações microclimáticas extremas por dificultar as trocas gasosas e energéticas com o ambiente externo (Merle *et al.*, 2022), tornando assim o cultivo mais resiliente no que tange a realidade das mudanças climáticas. Além disso, a água pode ser um fator limitante, pois apesar do SAF ser responsável por aumentar a reserva de água no ambiente, considerando que pode diminuir a evapotranspiração de 24 a 32% em comparação a área externa a pleno sol (Kanzler *et al.*, 2019), em períodos com déficit hídrico as árvores podem competir agressivamente pelos recursos hídricos com as plantas anuais cultivadas (Duan *et al.*, 2019).

Uma alternativa de consórcio com as árvores é a produção de milho e de feijão, grãos importantes para a renda da propriedade e pertencentes a base alimentar das famílias. Apesar da importância dessas graníferas e das florestas, seus cultivos consorciados ainda carecem de informações. As árvores diminuem a produção do milho por reduzirem a oferta de Rs (Zalac *et al.*, 2023), não obstante, o efeito negativo do sombreamento pode ser compensado pelo aporte de nitrogênio no solo devido a deposição de serapilheira (Ndoli *et al.*, 2017). Por outro lado, para o feijão o sombreamento pode ser favorável por este ser uma planta de metabolismo C3 e se saturar de luz em aproximadamente 50% da oferta da Rs, enquanto as plantas C4, como o milho, se saturam com quase a totalidade de Rs disponível (Reynolds *et al.*, 2007). Além da radiação solar em excesso possibilitar rotas metabólicas prejudiciais à planta, como a fotoinibição, temperaturas altas podem resultar em aumento nas temperaturas foliares nos horários mais quentes do dia, quando o déficit hídrico no solo promove o fechamento parcial ou total dos estômatos, causando danos em membranas e enzimas, inibindo a fotossíntese e desnaturando as proteínas (Taiz; Zeiger, 2013).

Esse aumento da temperatura do ambiente é influenciado pela magnitude do fechamento da copa, a qual governa o crescimento e o desenvolvimento da cultura do milho e do feijão. Para cultura do milho, a faixa de temperatura favorável para seu desenvolvimento ocorre em 8°C, 30°C e 40°C de valores mínimos, médios e máximos, respectivamente (Birch, 1982), sendo que temperaturas extremas, acima de 35°C causam diminuição no teor proteico dos grãos e superiores a 33°C comprometem a germinação do grão de pólen do milho (Landau; Magalhaes; Guimaraes, 2021). Para o feijão os valores mínimo, ótimo e máximo são de 12°C, 21°C e 29°C, respectivamente (Heinemann; Stone; Silva, 2009) e durante os estádios de floração e formação das vagens, temperaturas extremas abaixo de 12°C e superiores a 35°C comprometem a produtividade (Fernández; Gepts; Lopez, 1986; Heinemann; Stone; Silva, 2009). Portanto, a escolha da espécie em concomitância as condições meteorológicas do SAF, que estão atreladas ao seu nível de sombreamento, são fundamentais para o sucesso dessa prática agrícola. Assim, o objetivo desse estudo foi identificar possíveis alterações promovidas por um sistema agroflorestal sobre a temperatura do ar, radiação solar e evapotranspiração em cultivos de milho e de feijão.

4.2. Material e métodos

Os experimentos foram conduzidos nas safras 2021/22 e 2022/23 em uma área experimental da Estação Experimental Cascata (31°37'S, 52°31'W, 173 m), Embrapa Clima Temperado. Os experimentos consistiram no cultivo de milho e feijão no interior de um sistema agroflorestal (SAF) e em uma área próxima à 40 m com 1624 m², a pleno sol (PS). Devido à grande diversidade de materiais de milho foram semeadas duas cultivares BRS 019TL e BRS 015FB, escolhidas por características quanto a rusticidade, diferentes estaturas, produtividades e propósitos de uso (Schiedeck *et al.*, 2021), e semeado o feijão 'BRS Paisano', pertencente ao grupo de grãos pretos, preferencialmente produzido no sul do Brasil (CONAB, 2023). O espaçamento dos cultivos foi de 0,8 m entre linhas e 0,25 m entre plantas para o milho, totalizando cinco

sementes por metro linear, e de 0,4 m entre linhas e 0,1 m entre plantas para o feijão, totalizando 10 sementes por metro linear.

O SAF foi implantado em 2013, composto por espécies frutíferas *Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch (nogueira-pecã), *Citrus sinensis* L. (laranja), *Citrus bergamia* L. (bergamota), *Diospyros kaki* L. (caqui), *Psidium guajava* L. (goiaba) e *Butia* sp. (butiá) e as espécies florestais *Trema micranta* (L.) Blum (trema), *Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong (timbaúva), *Peltophorum dubium* (Sprengel) Taubert (canafístula), *Cedrela fissilis* Vell. (cedro), *Luehea divaricata* Mart. (açoita-cavalo), *Cordia trichotoma* (Vellozo) Arrabida ex Steudel (louro-pardo), *Prunus myrtifolia* L. (pêssego do mato) e *Patagonula americana* L. (guajuvira) cultivadas no alinhamento norte-sul e espaçadas a 5 m entre fileiras. Na safra 2021/22 foi realizada uma poda de limpeza para retirar os galhos em estrato baixo e médio nas entrelinhas e na safra 2022/23 foi realizada uma poda drástica nas espécies florestais para permitir maior transmissividade de radiação solar (Rs). O manejo dos experimentos foi em sistema orgânico, com capinas manuais para controle de plantas espontâneas, e na safra 2022/23 foi aplicado *Bacillus thuringiensis* para controle da lagarta do cartucho no milho. Para adubação, foi colocado esterco de peru peletizado na dose de 800 g linha⁻¹ de base no milho e no feijão, e 800 g linha⁻¹ em cobertura somente no milho conforme a recomendação técnica (CQFS-RS/SC, 2016).

As duas safras em que a pesquisa foi conduzida apresentaram interferência de episódio La Niña com Índice Niño Oceânico atingindo valor de -1,0 durante o período experimental (NOAA, 2024). O episódio de La Niña está associado a redução na quantidade de chuva na região sul do Brasil (Matzenauer; Radin; Maluf, 2017). As condições meteorológicas durante o período experimental foram caracterizadas a partir de dados coletados em quatro EMAs (estação meteorológica automática). A EMA1 foi instalada no interior do SAF: a EMA2, estava localizada a 110 m da área experimental; e a EMA3 pertencente ao INMET A887, localizada a 23 km de distância em linha reta a área experimental, forneceu apenas dados de radiação solar global. Além disso, em virtude de uma tempestade que interrompeu o registro dos dados da EMA2 em janeiro de 2022, os dados faltantes foram adquiridos da estação meteorológica automática da Embrapa (EMA4) localizada a 12 km de distância da área experimental.

Na EMA1 foram medidas a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) com um sensor quântico LI-COR Q18339 instalado a 1 m de altura, e para a temperatura do ar foram utilizados termômetros de bulbo seco, instalados no interior de abrigo termométrico a 2 m de altura. Os instrumentos meteorológicos foram ligados a um sistema de aquisição de dados 'datalogger' modelo CR1000 (Campbell Scientific®), armazenando a cada 15 minutos um valor médio para os valores instantâneos medidos a cada um segundo. Da EMA2 foram coletados dados de precipitação pluvial (mm) e temperatura do ar (°C) durante o ano agrícola de 2021/22, e no de 2022/23 foram coletados até o dia 29/01/2023 quando, devido a uma tempestade, foi interrompido o registro dos dados, sendo necessária a utilização de dados da EMA4. Da EMA3 foram utilizados dados de radiação solar global (Rs) ($\text{MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$). A partir dos dados meteorológicos foi calculada a evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Jensen Haise modificado para Pelotas-RS (Hallal *et al.*, 2014). Os dados de Rs foram convertidos para radiação fotossinteticamente ativa (RFA) utilizando o índice de 0,47 estimado para Pelotas (Assis; Mendez, 1989). Os dados de Rs em 2021/22 no SAF foram estimados a partir da relação obtida entre a Rs externa e interna do SAF coletada em 2022/23.

A análise de ocorrência de temperaturas ótimas para o milho ocorreu da emergência até a colheita das plantas, considerando as temperaturas cardeais de 8°C, 30°C e 40°C de temperaturas-base inferior, ótima e superior (Birch, 1982) e de temperaturas extremas superiores a 35°C e 33°C (Landau; Magalhaes; Guimaraes, 2021). Para o feijão as temperaturas cardeais avaliadas foram de 12°C, 21°C e 29°C de temperaturas-base inferior, ótima e superior, respectivamente (Heinemann; Stone; Silva, 2009) e de temperaturas extremas que ocorreram fora do limite de 12°C até 35°C durante R6 de floração até o estágio R7, quando apareceram as primeiras vagens (Fernández; Gepts; Lopez, 1986; Heinemann; Stone; Silva, 2009).

O ciclo de cultivo do milho, considerando a escala fenológica de Ritchie; Hanway; Benson (1993) na safra 2021/22, da emergência a colheita durou 145 dias (23/10/21 até 17/03/22) e de VT-R1 27 dias (25/12/21 até 20/01/22) e na safra 2022/23 da emergência a colheita durou 142 dias (24/10/22 até 15/03/23) e de VT-R1 20 dias (13/01/22 até 01/02/23). Para o feijão, utilizando a escala fenológica de Fernandez; Geptz; Lopes (1986), em 2021/22, da emergência à

colheita durou 82 dias (23/10/21 até 13/01/22) e R6-R7 15 dias (01/12/21 até 15/12/21), em 2022/23 da emergência a colheita durou 91 dias (24/10/22 até 23/01/23) e de R6-R7 15 dias (04/12/22 até 15/12/22).

Nos dois ambientes foram medidas as temperaturas foliares com um termômetro digital infravermelho (GM 320), entre as 14h e 15h, quando as plantas de feijão estavam na floração (R6), nos dias 08/12/2021 e 14/12/2022 e quando as plantas de milho estavam no pendramento (VT), nos dias 11/01/2022 e 19/01/2023, ambos estádios fenológicos foram definidos por serem críticos, principalmente quanto a sensibilidade ao déficit hídrico (Langner *et al.*, 2022; Pohlmann *et al.*, 2022a). As temperaturas foliares foram medidas em folhas totalmente expandidas no terço superior da planta, no centro da folha desviando da nervura central, e no caso do feijão, no folíolo central do trifólio, ambos a uma distância de 300 mm e emissividade fixa de 0,95, conforme indicado pelo equipamento.

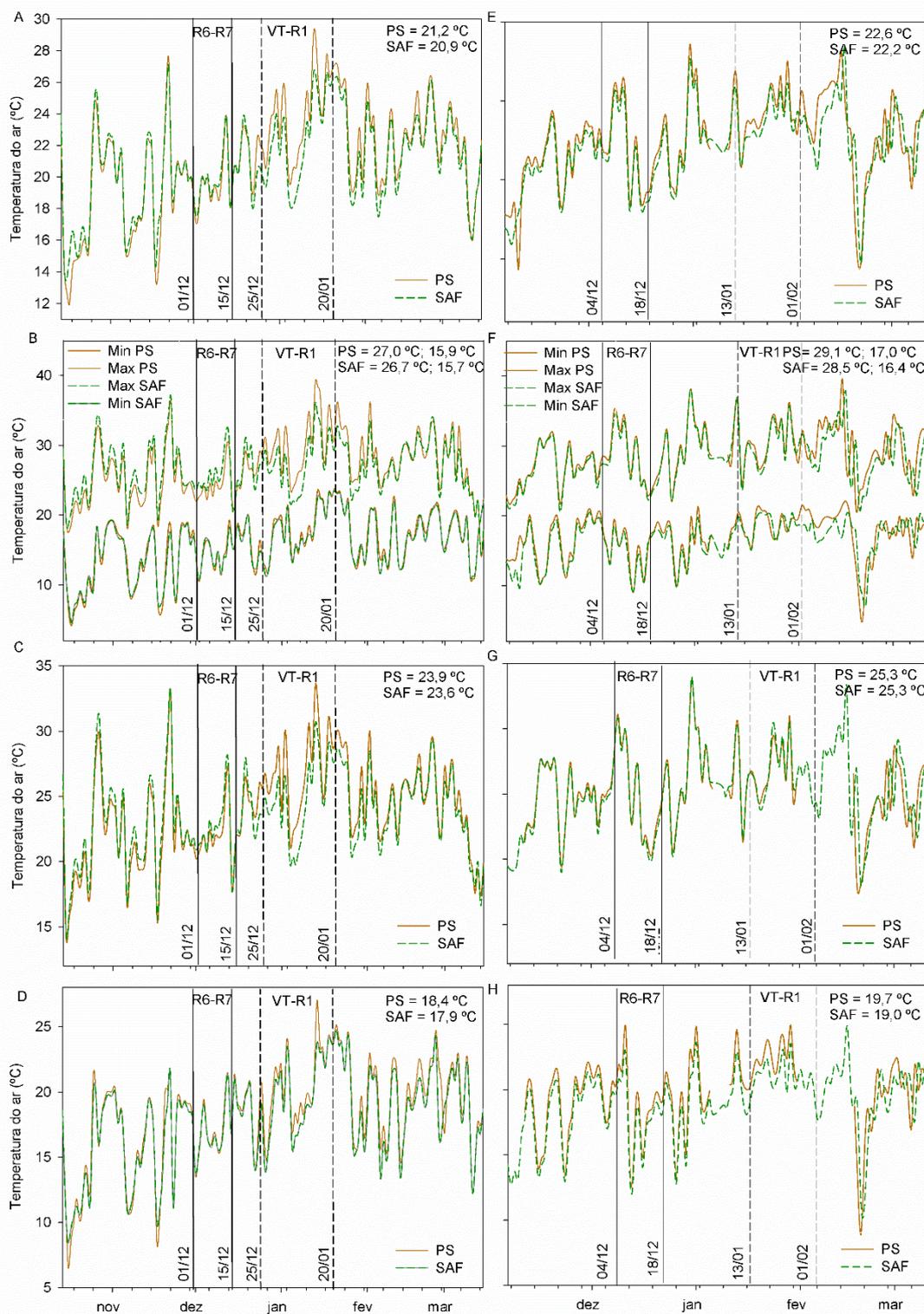
Com os dados da Rs foram realizadas somas diárias e médias mensais. Com os dados de temperatura do ar foram realizadas médias diárias, diurnas (7 h às 18 h) e noturnas (19 h às 6 h). Foram identificadas as temperaturas máximas e mínimas absolutas diárias, e realizado o cálculo da amplitude térmica mediante a subtração destas. Os dados de precipitação pluvial e ETo foram acumulados para obter o total dos decêndios mensais.

Os dados obtidos de temperatura foliar foram analisados quanto ao atendimento aos pressupostos do modelo matemático, de normalidade do erro experimental por meio do teste Shapiro Wilk, e de homogeneidade das variâncias por meio do teste Oneillmathews, posteriormente foram analisados pelo teste de variância e quando significativos suas médias foram distinguidas pelo teste Tukey a 0,05 de probabilidade do erro, pelo software R (R Core Team, 2020). Para os dados de proteína, temperatura do ar, radiação solar e precipitação pluvial foi aplicado o teste t a 0,05 de probabilidade do erro, pelo software R (R Core Team, 2020), comparando os ambientes e as safras.

4.3. Resultados e discussão

As temperaturas do ar médias diárias, mínimas, máximas, noturnas e diurnas foram, respectivamente, de 21,2 °C, 15,9°C, 27,0°C, 18,4°C e 23,9°C, no cultivo a pleno sol (PS), e de 20,9°C, 15,7°C, 26,7°C 17,9°C e 23,6°C, no sistema agroflorestal (SAF), durante a safra 2021/22, e de 22,6°C, 17,0°C, 29,1°C 19,7°C e 25,3°C, no PS, e de 22,2°C, 16,4°C, 28,5°C 19,0°C e 25,3°C, no SAF, na safra 2022/23. Percebe-se que essas temperaturas médias do SAF foram um pouco abaixo àquelas do PS, entretanto, significativamente menor apenas para a noturna em 2022/23 (p-valor = 0,04). Essa tendência dos dados médios pode ser visualizada na Figura 11, na qual estão representadas temperaturas na escala diária. O cultivo da safra em 2022/23 aconteceu sob condições térmicas superiores com temperatura média maior de 1,4°C no PS e de 1,3°C no SAF (p-valor = 0,00) em relação à safra 2021/22.

Figura 11 - Temperaturas médias (A, E), máximas e mínimas (B, F) diurnas (C, G) e noturnas (D, H) nos cultivos a pleno sol (PS) e sistema agroflorestal (SAF) para as safras de 2021/22 (A, B, C, D) e 2022/23 (E, F, G, H). Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

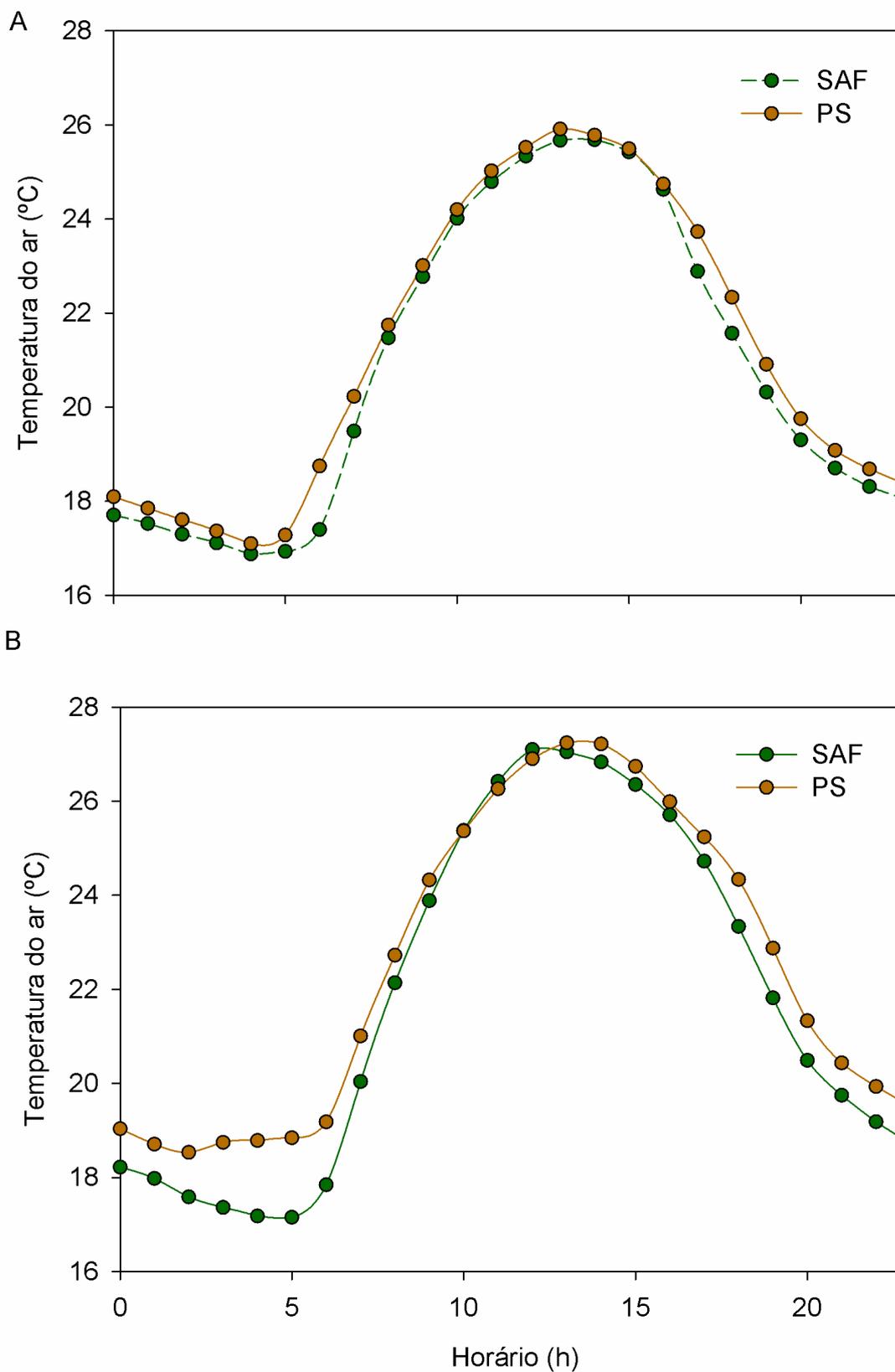
Conforme pode ser verificado na Figura 11B e 11F as temperaturas mínimas foram semelhantes nos ambientes, fato confirmado pelo teste t. Para efeitos de análise evidenciou-se que na safra 2021/22 os valores foram, em média, de 15,9 °C, no PS, e de 15,7 °C, no SAF, enquanto na safra seguinte, 2022/23, apresentaram média de 17,0 °C, no PS, e de 16,4 °C, no SAF. As mínimas absolutas registradas foram de 4,2 °C e 4,6 °C, em 17/10/2021, e de 5,0 °C e 7,2 °C, em 20/03/23 e 21/02/23 para o PS e SAF, respectivamente. As temperaturas máximas também foram, em média, similares nos ambientes com 27,0 °C, no PS, e 26,7 °C, no SAF, em 2021/22, e 29,1 °C, no PS, e de 28,5 °C, no SAF, na safra 2022/23 (Figura 11B). Entretanto, a máxima absoluta apresentou diferença de 1,9 °C em 2021/22 com valor de 38,6 °C no PS e de 36,7 °C no SAF, e diferença de 1,5 °C em 2022/23 alcançando valores de 39,6 °C no PS e de 38,1 °C no SAF, como pode ser visualizado na Figura 11F. Nesta Figura nota-se que, nas duas safras, as temperaturas máximas do ar foram verificadas no cultivo PS e as temperaturas mínimas tenderam a serem menores no SAF. Interessante perceber que quando se analisam os valores absolutos das temperaturas mínimas, nas duas safras, os valores extremos foram verificados no cultivo PS. Em noites com queda acentuada das temperaturas o SAF oferece condições que proporcionam redução menos intensa, da mesma forma, em dias com temperatura do ar elevada, o SAF proporciona uma barreira a entrada de energia que proporciona menor aquecimento interno.

Para elucidar o poder atenuador de temperaturas extremas proporcionadas pelo SAF, como supracitado no parágrafo anterior, analisou-se apenas os dias com temperatura máxima superior a 30 °C, para as duas safras. O SAF atuou como atenuador sobre a temperatura média diurna, com média de 24,2 °C no SAF e 25,2 °C no PS (p-valor = 0,03), em 2021/22, e de 23,9 °C no SAF e 24,8 °C no PS (p-valor = 0,01), em 2022/23. Também atenuou a temperatura diurna em 2021/22 com média de 27,5 °C no SAF e de 28,7 °C no PS (p-valor = 0,01) e a temperatura noturna em 2022/23, com 20,2 °C no SAF e 21,1 °C no PS (p-valor = 0,04). Esses resultados corroboram com aqueles obtidos por Kanzler *et al.* (2019), que durante a primavera e o verão na Alemanha, observaram que quanto maior a temperatura do ar, mais forte é a influência da floresta sobre a temperatura no seu interior. Em outra pesquisa, realizada nas condições tropicais da Costa Rica, Merle *et al.* (2022) observaram

que outro fator que influencia é a estatura das árvores do SAF, de modo que árvores altas diminuem em até 4°C na temperatura máxima do ar.

Assim como as médias gerais, as temperaturas horárias também apresentaram comportamentos semelhantes nas duas safras, com tendência do SAF manifestar menores valores (Figura 12). Entretanto, as temperaturas no SAF foram significativamente menores, de acordo com o teste t (p-valor < 0,05), nos horários das 6h, 7h e 17h em 2021/22 e das 2h às 6h e das 18h às 20h em 2022/23. Ademais é possível observar que a influência do SAF foi maior em 2022/23, uma safra mais quente, em comparação a 2021/22 referente ao térmico ao longo do dia. Importante destacar que ao analisar a variação entre as safras dos ambientes, o SAF apresentou menor amplitude dos dados somente em janeiro de 2021/22, de 9,2 °C do que o PS com 11,7 °C, de acordo com o teste t (p-valor <0,05), reafirmando a característica de estabilidade térmica proporcionada pelo SAF neste mês que foi o de maior temperatura média, mínima e máxima durante o período analisado. Nos outros meses e na safra 2022/23 não houve diferença significativa entre os ambientes para a amplitude térmica.

Figura 12 - Temperatura média horária ao longo dos dias na safra 2021/22 (A) e 2022/23 (B) para os ambientes de cultivo a pleno sol (PS) e sistema agroflorestal (PS). Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

O balanço de radiação governa o aquecimento da temperatura do ar junto à superfície. Durante o dia o balanço se torna positivo, e a energia recebida na superfície é utilizada na evapotranspiração por fluxo de calor latente, no aquecimento do solo por fluxo de calor no solo e no aquecimento do ar por fluxo de calor sensível (Bergamaschi; Bergonci, 2017). Quando há água disponível no ambiente, a maior parte da energia vai ser consumida por evapotranspiração e na sequência, o aquecimento do ar. Assim, a temperatura diária e diurna menor no SAF em relação ao ambiente PS deve-se a menor transmissividade de radiação solar mediante da redução na entrada de energia no ambiente, abaixo do dossel do SAF, desfavorecendo o acréscimo na temperatura do ar.

Durante a noite, em condições normais, acontece o procedimento inverso, o saldo de radiação é negativo, pois a emissão de energia pela superfície de ondas longas é maior do que retorna da atmosfera, ocasionando o resfriamento da superfície (Bergamaschi; Bergonci, 2017). O ambiente protegido, no caso por espécies arbóreas, poderia atenuar a perda de energia noturna, formando um microclima específico com maiores temperaturas em comparação a uma área descoberta. Entretanto, nos experimentos foi observado resultado contrário, a temperatura noturna no SAF foi menor do que no PS. Isto pode ser atribuído a presença das árvores do SAF que funcionam como quebra-vento, diminuindo a renovação e a homogeneização de ar, formando um microclima singular, favorecendo a estagnação e acúmulo do ar frio, mais denso, junto a superfície (Bergamaschi; Bergonci, 2017; Kanzler *et al.*, 2019). Além disso, a inclinação do terreno favoreceu a drenagem do ar frio em condições de cultivo a PS, enquanto no SAF esse ar frio noturno ficou represado.

A menor temperatura diurna no SAF é corroborada por outros autores, entretanto, o fato do SAF apresentar menor temperatura durante a noite vai contra ao observado em outros trabalhos, possivelmente explicável pelas condições climáticas da região, de clima subtropical, da época do ano avaliada e da alta densidade arbórea no SAF estudado. Pondera-se ainda que estes resultados se referem ao período de primavera e verão, e que em outras estações do ano, especialmente, no inverno, a temperatura do ar no interior do SAF necessita ser observada. Ao avaliar o microclima de um SAF com idade de 10 anos nos Estados Unidos, composto por três espécies florestais (*Pinus*

palustris, *Pinus taeda* e *Quercus pagoda*) Castillo; Tiezzi; Franzluebbbers (2020) verificaram potencial de mitigação das árvores na temperatura do ar em $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante o dia e aumentando em $+0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante a noite. Em outro estudo na Alemanha em um SAF composto, por *Robinia pseudoacacia* L. e o clone “Max” (*Populus nigra* L. x *P. maximowiczii* Henry), com 6 anos de idade e com plantas de 3 a 5 m de estatura, Kanzler *et al.* (2019) avaliaram os efeitos do microclima em diferentes distâncias das árvores (24, 48 e 96 m) e observaram redução na temperatura do ar de $-1\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante o dia (6 h às 20:50 h) e pelo menos $+1\text{ }^{\circ}\text{C}$ à noite (21 h às 5:50 h). Ainda, importante destacar que os trabalhos supracitados foram desenvolvidos em locais com climas totalmente diferentes do atual estudo.

As distintas espécies utilizadas nos SAF's também alteram a formação do microclima a medida em que influenciam no sombreamento e circulação de ar. Como observado por Ndoli *et al.* (2017), a espécie *Alnus acuminata* aumentou em $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ na temperatura noturna e reduziu em $1,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a temperatura diurna, enquanto a *Markhamia lutea* reduziu em $0,3\text{ }^{\circ}\text{C}$ a noturna e reduziu em $0,28\text{ }^{\circ}\text{C}$ a diurna. Os autores explicam que *A. acuminata* cooperou para aumentar a temperatura noturna do ar por “efeito cobertor” em virtude do seu dossel denso, enquanto a *Markhamia lutea*, por apresentar um dossel mais fino, influenciou menos. O mesmo efeito pode acontecer no SAF desta pesquisa, que apesar de ser composto por espécies de diferentes extratos e fechamentos de copa, foram realizadas podas para diminuir a densidade da copa e seu sombreamento. Os autores Zalac *et al.* (2023) avaliaram o desenvolvimento da cultura do milho sombreado em um SAF composto por nogueiras pecãs de 14 anos na Croácia, observaram que a temperatura máxima do ar diminuiu $5\text{ }^{\circ}\text{C}$ em algumas datas. Como pode ser visualizado na Figura 11, no SAF deste experimento, em comparação ao PS, foi observada redução de até $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $4,7\text{ }^{\circ}\text{C}$, em janeiro de 2021/22, e de até $4,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $7,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ em fevereiro de 2022/23, nas temperaturas médias e máximas, respectivamente.

Além da caracterização da temperatura do ar do ambiente, a análise de ocorrência de temperaturas ótimas para as graníferas é fundamental para avaliar a viabilidade de produção no SAF. Para o milho, da emergência até a colheita, considerando as temperaturas cardeais de $8\text{ }^{\circ}\text{C}$, $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperaturas-base inferior, ótima e superior (Birch, 1982), foram registrados no PS apenas dois dias e no SAF um dia dos 145 e 142 dias de duração do ciclo de

desenvolvimento nos anos agrícolas de 2021/22 e 2022/23, respectivamente, com temperaturas inferiores a 8 °C e nenhum dia foi registrada temperatura superior a 40 °C (Figura 11). As temperaturas médias cardeais de 30 °C, durante o período diurno, ocorreram em 2021/22 em 6 de 145 dias no PS e 3 de 145 dias no SAF e em 2022/23 em 4 de 142 dias no PS e 7 de 142 dias no SAF. Assim, o PS apresentou maior frequência de temperatura média durante o dia ideal para o milho em 2021/22 e o SAF em 2022/23.

Para o feijão, o intervalo de temperaturas cardeais é mais restrito, pois de acordo com Heinemann; Stone; Silva (2009) temperaturas do ar menores do que 12 °C ou maiores do que 29 °C diminuem o potencial produtivo da cultura e, nesta pesquisa, como pode ser visualizado na Figura 11, foi verificado maior número de dias em que a temperatura do ar extrapolou esse intervalo. Em 2021/22 os dois ambientes apresentaram 17 dos 82 dias do ciclo fenológico com temperatura mínima do ar inferior a 12 °C e de 21 de 82 dias com temperaturas máximas superiores a 29 °C, enquanto a temperatura média de 21 °C durante o período diurno ocorreu em 14 de 82 dias no PS e de 6 de 82 dias no SAF. Em 2022/23 os ambientes apresentaram maiores diferenças, o PS apresentou 7 de 91 dias e o SAF 11 de 91 dias com temperatura inferior a 12 °C, 5 de 91 dias no PS e 6 de 91 dias no SAF com temperatura superior a 29 °C e 30 dias no PS e 29 dias no SAF dos 91 dias com temperatura diurna de 21 °C. Dessa forma, para o feijão o ambiente PS apresentou temperatura ideal mais frequente para o crescimento e desenvolvimento da espécie.

Para entender a viabilidade de produção de milho e feijão neste SAF multidiverso, além das temperaturas cardeais durante o ciclo, uma análise criteriosa durante o período de florescimento é crucial. As linhas tracejadas e contínuas representam o intervalo entre os estádios fenológicos VT-R1, para o milho, e R6-R7, para o feijão, nas safras 2021/22 e 2022/23 (Figura 11). As fases de floração/pendoamento são consideradas críticas para a produção dessas duas culturas porque são sensíveis às intempéries meteorológicas, principalmente referente ao déficit hídrico no solo, causando perdas significativas na produção (Pohlmann *et al.*, 2022a; Langner *et al.*, 2022). Nestas fases, a ocorrência de temperaturas extremas altas pode causar abortamento de flores e diminuir a viabilidade do pólen (Heinemann; Stone; Silva, 2009; Landau; Magalhaes; Guimaraes, 2021).

O máximo potencial de crescimento do milho não é alcançado quando as temperaturas médias diárias são inferiores a 19,0 °C durante o dia e 12,8 °C durante a noite por diminuir seu metabolismo, enquanto temperaturas médias noturnas acima de 24,0 °C aceleram seu metabolismo, aumentando a respiração, diminuindo a taxa de fotoassimilados e por consequência, reduzindo a produção de grãos (Landau; Magalhaes; Guimarães, 2021). No PS e no SAF, da emergência a colheita, as temperaturas médias durante o dia apresentaram médias inferiores a 19,0 °C em nove e seis dias de 145 dias de ciclo de desenvolvimento, respectivamente em 2021/22 e de dois e um de 142 dias, respectivamente em 2022/23. Sobre as temperaturas noturnas, ocorreram média inferior a 12,8 °C em 7 e 8 de 145 dias em 2021/22 e 1 e 5 de 142 dias em 2022/23 para o PS e SAF, respectivamente (Figuras 11C, D, G, H). Entretanto, em relação a temperatura noturna acima de 24 °C foi observado em 2021/22 6 de 145 dias no PS e 3 de 145 dias no SAF e em 2022/23 4 de 142 dias no PS e 1 de 142 dias no SAF. Assim, o SAF apresenta mais dias com a temperatura média diária acima de 19,0 °C e menos dias com temperatura noturna superior a 24 °C, condições favoráveis à produção de milho, mas também apresentou maior frequência de dias com a temperatura noturna inferior a 12,8 °C.

Por outro lado, temperaturas superiores a 33 °C já são suficientes para comprometer a germinação do grão de pólen do milho (Landau; Magalhaes; Guimaraes, 2021), condição observada, entre VT-R1, em cinco de 27 dias no PS e dois de 27 dias no SAF em 2021/22 e em seis de 20 dias no PS e SAF em 2022/23. Portanto, além do cultivo a PS apresentar mais dias com a temperatura noturna acima de 24 °C, que acelera o metabolismo e diminui o acúmulo de carbono no milho, também é caracterizado por mais dias com temperatura máxima extrema que pode diminuir o teor proteico dos grãos e a viabilidade do pólen. Caracterizando os ambientes, o cultivo no SAF apresenta condições térmicas mais favoráveis ao crescimento, ao desenvolvimento e à produção de milho, considerando temperaturas extremas durante VT-R1.

O melhor limite térmico para o feijão durante o estágio da floração ocorre com temperatura do ar acima de 12 °C e inferior a 35 °C, ocorrendo o abortamento de flores ao extrapolar estes limites (Heinemann; Stone; Silva, 2009). As temperaturas médias em ambas as safras para os dois ambientes permaneceram dentro do limite supracitado, bem como as temperaturas

máximas absolutas. Entretanto, durante a floração (R6-R7) do feijão, tanto no PS como no SAF, temperaturas mínimas absolutas inferiores a 12 °C ocorreram em dois de 15 dias na safra 2021/22, e em três de 15 dias na safra 2022/23. Por outro lado, temperaturas médias diurnas e noturnas superiores a 30 °C e 25 °C, respectivamente, causam abscisão de flores e vagens pequenas (Heinemann; Stone; Silva, 2009), das quais foram observadas apenas em um dia em cada ambiente na safra 2022/23 com média diurna acima de 30 °C. Não obstante, considerando que existe uma preocupação futura na produção do feijão em virtude da diminuição na adequação climática projetada para a América do Sul, especialmente tensões causadas por altas temperaturas e déficit hídrico (Heinemann *et al.*, 2017), nesse aspecto, o uso dos cultivos em SAF que apresenta menor temperatura média do ar e temperaturas máximas absolutas do que o cultivo a PS (Figura 11) pode ser uma alternativa sustentável de produção.

A temperatura foliar não apresentou interação significativa entre espécie x ambiente, assim, as médias estão apresentadas separadamente na Tabela 6. A menor temperatura do ar no SAF refletiu no resultado da temperatura foliar na safra 2021/22, com maiores temperaturas no sistema PS do que no SAF. Em estudo com café Merle *et al.* (2022) observaram que a baixa abertura do dossel e homogeneidade das lacunas de luz resultou no aumento da temperatura foliar mínima e diminuição da temperatura foliar máxima no SAF em comparação a uma área PS. Os autores explicam que isso ocorre pelo “poder tampão” das árvores, dificultando as trocas com o ambiente externo. Na safra 2022/23 não foi identificado diferença significativa entre os ambientes quanto a temperatura foliar, possivelmente em virtude da baixa precipitação pluvial que ocorreu no período de cultivo (Figura 14B) e da poda drástica realizada que permitiu maior entrada de energia no ambiente, pois uma menor densidade de plantas e/ou de dossel acarreta em um sombreamento mais heterogêneo e assim a temperatura foliar do cultivo apresenta grandes oscilações ao longo do dia, o oposto do observado por Elli *et al.* (2016) para cana-de-açúcar cultivada em linha consorciada com canafístula em um dossel homogêneo.

Tabela 6 - Temperatura foliar (°C) do milho 'BRS 019TL' e 'BRS 015FB' e do feijão 'BRS Paisano' cultivados em sistema agroflorestal (SAF) e em área a pleno sol (PS) medida em dias ensolarados (11/01/2022 e 14/12/2022) e nublados (08/12/2022 e 1/01/2023). Pelotas, RS.

Fatores	08/12/2021		11/01/2022		14/12/2022		19/01/2023	
'BRS 019TL'	21,3	NS	31,5	B	31,7	NS	23,2	NS
'BRS 015FB'	21,1		32,5	AB	31,4		24,0	
'BRS Paisano'	19,8		33,6	A	31,5		24,1	
PS	22,9	A*	33,3	A	32,1	NS	23,9	NS
SAF	18,6	B	31,7	B	31,0		23,6	
C.V. (%)	10,8		3,5		8,5		3,7	

*Letras diferentes na coluna diferem para os tratamentos. NS = não significativo ao nível de confiança de 0,05 de probabilidade de erro por Tukey.

Fonte: Elaborada pela autora.

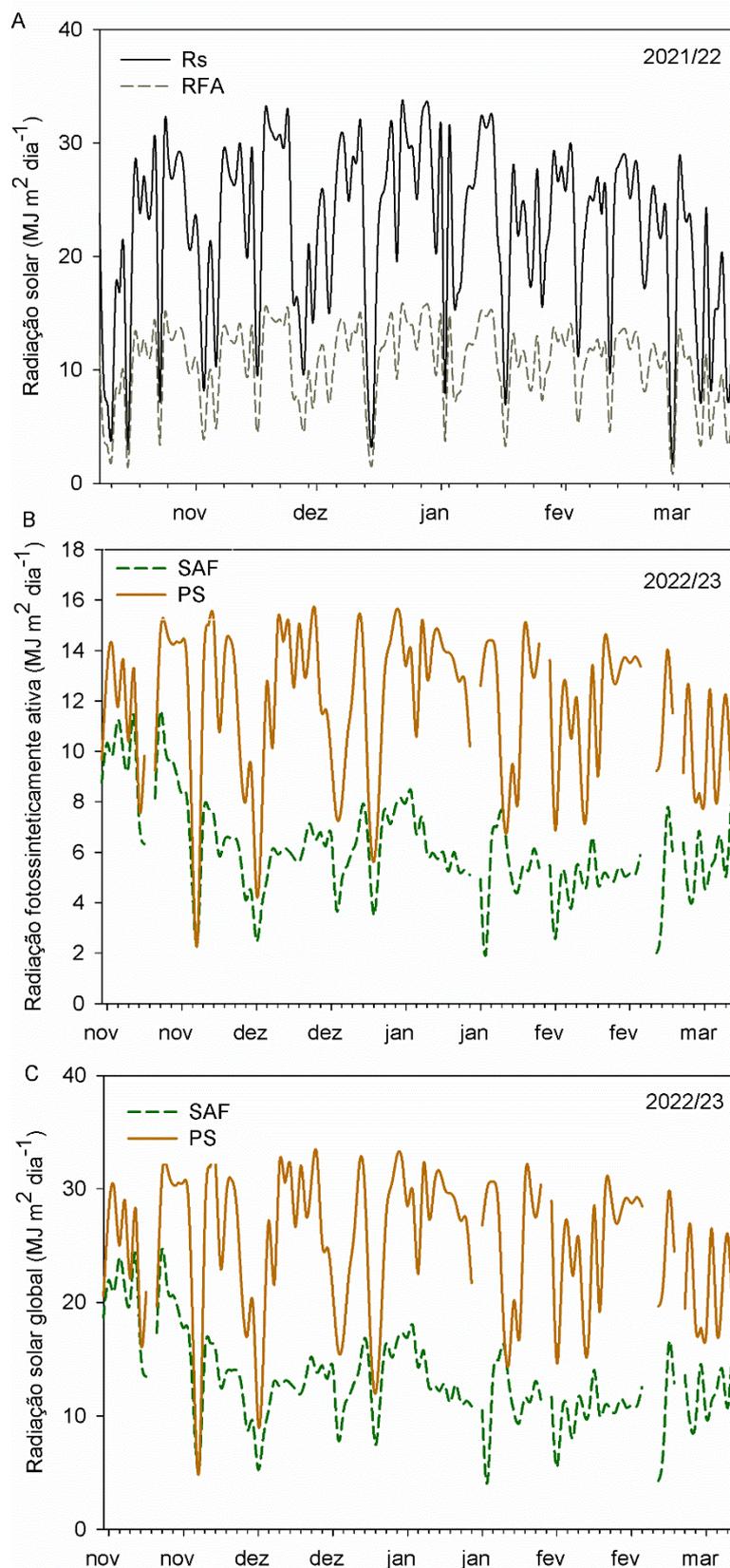
Comparando as temperaturas foliares entre as espécies, apenas em 11/01/2022 (Tabela 6), dia ensolarado, houve maior temperatura foliar para o feijão e menor para a 'BRS 019TL', sendo que a 'BRS 015FB' não diferiu entre os dois. No horário da avaliação (14h às 15h) a temperatura média do ar estava em 31,8 °C, no cultivo a PS e 27,7 °C, no SAF. O feijão, por ser uma planta de metabolismo C3, e o milho, uma planta C4, apresentam tolerâncias distintas a altas temperaturas e intensidade luminosa, o que influencia em sua temperatura interna. Em condições estressantes o feijão, que possui porte mais próximo a superfície, apresenta temperatura foliar mais elevada, com maior dificuldade para dissipar calor do que a cultivar BRS 019TL (159,6 cm e 128,8 cm em 2021/22 e 2022/23, respectivamente), que apresenta maior estatura em comparação a outra cultivar BRS 015FB (139,6 cm e 100,9 cm em 2021/22 e 2022/23, respectivamente).

A identificação da tolerância ao déficit hídrico por meio da temperatura foliar é possível porque sob limitação de oferta de água a planta fecha seus estômatos para evitar a desidratação celular, e assim, cessa sua dissipação de energia, acumulando calor e aumentando a sua temperatura interna (Mendes *et al.*, 2013; Taiz; Zeiger, 2013). Seguindo ainda a análise sobre o dia 11/01/2022, as temperaturas foliares máximas medidas foram de 34,3 °C, 39,9 °C e 40,4 °C, no PS, e de 32,7 °C, 33,3 °C e 36,1 °C, no SAF, para 'BRS 019TL', 'BRS 015FB' e 'BRS Paisano', respectivamente. Importante destacar que o feijão nessa data já estava em maturação dos grãos e o milho em pleno pendoamento. O milho 'BRS 015FB' apresentou a maior diferença entre os ambientes nessa data, de

6,6 °C indicando ser mais responsiva ao ambiente, mesmo que a interação entre os fatores não tenha sido significativa. Altas temperaturas no mesófilo foliar, ocasionam perda da estrutura dimensional das enzimas, prejudicando sua atividade funcional e todo o metabolismo da planta (Taiz; Zeiger, 2013), e o SAF sendo um atenuador de altas temperaturas pode ser uma alternativa para cultivos sensíveis a estresse térmico.

As diferenças térmicas observadas entre os ambientes são derivadas do balanço de radiação sobre a superfície, sendo essa dependente da oferta de radiação solar global (R_s) e das características da superfície. Na safra 2021/22 não foi possível caracterizar os dois ambientes devido a problemas técnicos com o sensor de medição da radiação solar instalado no SAF. Nessa safra, no ambiente a PS, foram obtidas as médias de R_s de $22,4 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ e de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) de $10,5 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$, cuja representação diária estão contidas na Figura 13A. Ao longo da safra 2022/23, os valores de R_s foram maiores a PS do que no SAF, com média de $11,6 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ e $6,1 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ para a RFA (p -valor = 0,00) e de $24,7 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ e $12,9 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ para R_s (p -valor = 0,00), respectivamente (Figura 13B e 13C), ou seja, no SAF houve redução média de 48% da R_s e de 47% da RFA. No SAF as árvores diminuem a transmissividade da radiação solar (R_s), sendo esta diminuição variável conforme as espécies, idade e época do ano. Redução da RFA também foi observada por Ndoli *et al.* (2017) em SAF, variando de 47 a 67% a 1 m de distância e de 14 a 17% a 3 m de distância, portanto, a variabilidade foi devido a diferentes espécies e a distância de avaliação.

Figura 13 - Radiação solar global (Rs) e radiação fotossinteticamente ativa (RFA) para a safra de 2021/22 no cultivo a pleno sol (PS) (A), RFA no PS e no sistema agroflorestal (SAF) em 2022/23 (B) e Rs no PS e SAF em 2022/23 (C). Pelotas, RS.



Fonte: elaborada pela autora.

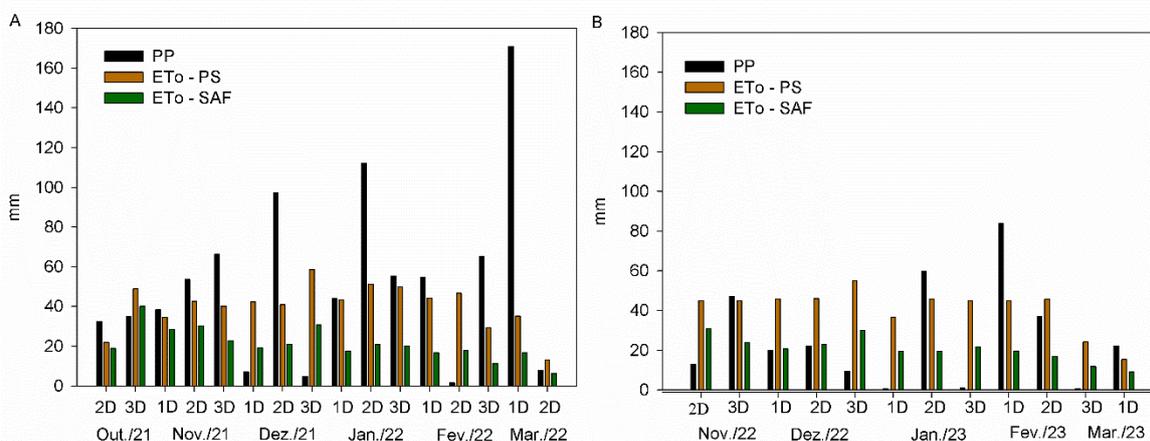
No ambiente a PS, ao longo da safra 2022/23 a incidência de Rs atingiu picos superiores a $30 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ nos meses de novembro, dezembro e janeiro, e mantendo-se acima de $20 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ na maioria dos dias do período experimental, enquanto que no SAF o máximo observado foi de $24,7 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ no dia 15 de novembro, quando a copa das árvores ainda não estavam completamente desenvolvidas, posteriormente atingindo máximo de $17,4 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ em dezembro, $18,0 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ em janeiro, $16,4 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ em fevereiro e $16,8 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ em março. Em alguns dias as diferenças entre os ambientes são maiores em virtudes de serem ensolarados com pouca nebulosidade, assim como observado por Schöffel *et al.* (2022) que, ao compararem cultivo a pleno sol com cultivo sob cobertura plástica, evidenciaram maior proporção de Rs difusa em dias nublados.

A redução média observada nesse estudo de 47% da RFA no SAF em comparação ao PS pode inviabilizar o cultivo de grãos. Os autores Wang *et al.* (2017) analisaram a disponibilidade de radiação solar aos cultivos sob sombreamento de placas solares, e classificaram as plantas conforme a necessidade de radiação solar para florescerem e frutificarem, em classes I (plantas de sombra), II (plantas medianas ou neutras), e III (plantas de sol). Plantas de sol requerem RFA de $5,5$ a $7,2 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$. Sabe-se que o milho apresenta metabolismo C4 e se satura com quase a totalidade de radiação solar global disponível (Reynolds *et al.*, 2007), cujo ponto de saturação é acima de $28,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de radiação solar global ou $13,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de RFA (Larcher, 2000), podendo ser caracterizado como planta de sol (classe III). Analisando os dados da safra de 2022/23 na Figura 13B, ocorreram dias com $< 5,5 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$ em 40% dos dias (45 dias) no SAF e em apenas 2% dos dias (2 dias) no PS. Na mesma Figura 13B é possível observar que o ponto de saturação para o milho, acima de $13,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de RFA (Larcher, 2000) não foi atingido em nenhum dia no SAF e ocorreu em 48% dos dias (66 dias) no PS. Destacando a oferta ineficiente de RFA ao milho no SAF. Por outro lado, o ponto de saturação do feijão está entre $8,8$ e $13,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ de RFA (Larcher, 2000), no SAF 9% dos dias (10 dias) a RFA atingiu valor acima de $8,8$ e no PS, 81% dos dias (91 dias). No SAF os dias que atingiram o ponto de saturação foram no início do cultivo, quando a copa das árvores ainda estavam em processo de brotação e

crescimento, salientando a importância de podas ao longo do cultivo para viabilizar a produção de feijão no SAF.

Além da condição térmica, a disponibilidade hídrica é essencial para a produção de grãos. Durante o período experimental na safra 2021/22 (de 14/10/21 até 15/03/22) a ETo do SAF foi calculada com dados estimados de Rs, pois não houve coleta de dados nesse ambiente. Neste período, foram registrados 846,2 mm de precipitação pluvial, enquanto as estimativas da evapotranspiração potencial (ETo) foram de 642,5 mm, no PS, e 338,2 mm, no SAF (Figura 14A), isso indica que, de modo geral, a demanda hídrica teria sido satisfeita em ambos os ambientes. No entanto, na Figura 14 é possível observar que na escala decendial, nos dois ambientes, a ETo superou a precipitação pluvial no terceiro decêndio de outubro, no primeiro e no terceiro decêndio de dezembro, nos segundos decêndios de fevereiro e de março. Na safra 2021/22 a ETo apresentou uma redução média de 47,4% da ETo do SAF em relação ao PS.

Figura 14 - Precipitação pluvial (PP) e evapotranspiração de referência (ETo) acumulados em cada decêndio (D) em sistemas de produção a pleno sol (PS) e agroflorestal (SAF), na safra 2021/22 (A) e 2022/23 (B). Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

Na safra 2022/23 (de 11/11/22 até 09/03/23) o acumulado de 316,3 mm de precipitação pluvial foi inferior aos 493,9 mm de ETo no PS e superior aos 246,0 mm no SAF. Em 8 dos 12 decêndios, no PS, e em 7 dos 12 decêndios, no SAF, a demanda hídrica superou a precipitação pluvial disponível. Assim como na safra 2021/22, novamente foi possível constatar que ocorreu redução em

torno de 50% da ETo no SAF em comparação ETo no PS. Esses dados corroboram com aqueles obtidos por Kanzler *et al.* (2019), na Alemanha, que em um SAF composto por *Robinia pseudoacacia* L. e o clone 'Max' (*Populus nigra* L. x *P. maximowiczii* Henry), com 6 anos de idade e com 3 a 5 m de estatura, também observaram redução na evapotranspiração do sistema em 24 a 32% em comparação a área externa a pleno sol. Não obstante, deve se considerar que no ambiente multidiverso existe maior número de plantas, inclusive árvores, e talvez o consumo hídrico efetivo supere a ETo.

Avaliando o cultivo solteiro e consorciado de oliveiras com grão de bico, fava e lentilha em anos de seca no Mediterrâneo, Asmae *et al.* (2023) observaram que os benefícios do microclima criado pelo SAF se expressam de forma diferente dependendo do momento que ocorre o déficit hídrico e da fenologia das culturas consorciadas. Os autores destacam que apesar dos benefícios do sombreamento às leguminosas durante a seca, a produção destas foram menores em SAF do que no solteiro a pleno sol, em virtude da competição das espécies por água. Nesse caso, torna-se interessante avaliar a transpiração das plantas, pois Elli *et al.* (2016) observaram, em cana-de-açúcar consorciada com canafístula, que a menor oferta de Rs proporcionou que os estômatos permanecessem abertos por mais tempo, resultando em maior taxa transpiratória. A transpiração pode ser mais elevada em ambiente sombreado devido a menor variação na temperatura e na umidade do ar, pois isso mantém estável o gradiente de pressão de vapor, mantendo os estômatos abertos e permitindo a plena transpiração (Taiz; Zeiger, 2013).

Comparativamente com a safra anterior, a safra 2022/23 apresentou maior temperatura do ar (p -valor = 0,00) (Figura 11), e menor precipitação pluvial, considerando a relação entre os mesmos decêndios das duas safras (p -valor = 0,04), o que gerou uma diferença entre precipitação pluvial e ETo de 177,6 mm de déficit no PS e de 70,3 mm de excesso no SAF (Figura 14). Apesar dessa condição, as plantas cultivadas nesta safra não diferiram para temperatura foliar entre os ambientes (Tabela 6), embora seja importante destacar que as medições foram realizadas somente em alguns dias. Nesse aspecto, o déficit hídrico pode ter proporcionado diminuição nas trocas gasosas, resultando em elevadas temperaturas foliares, o que pode explicar a não diferença significativa entre os ambientes. Sugere-se assim que o SAF pode ser benéfico a dissipação

de calor por transpiração das plantas em períodos com estresse hídrico leve, enquanto em períodos de severa estiagem, o estresse se equivale ao ambiente a PS (Tabela 6).

Desse modo, uma visão holística sobre a dinâmica dos elementos meteorológicos no interior do SAF e seus efeitos sobre as plantas graníferas nas entrelinhas pode ser útil para aumentar a assertividade na escolha das espécies, espaçamento e orientação do plantio durante o planejamento de um novo SAF. A agrofloresta se demonstra como potencial mitigadora de temperaturas extremas e alta intensidade luminosa, entretanto, deve-se atentar a técnicas de manejo cruciais para torná-la viável por tempo superior a 10 anos após a sua implementação, como podas sucessionais para aumentar o teor de matérias orgânica no solo e favorecer maior entrada de luz nas entrelinhas, além de irrigação nos períodos de alta demanda evaporativa da atmosfera.

4.4. Conclusões

O sistema agroflorestal plenamente estabelecido demonstra potencial para mitigação de temperaturas extremas e da alta energia radiante, sendo que a radiação solar que passa pela copa das árvores e chega aos cultivos representa a metade daquela disponível em ambiente aberto, reduzindo, na mesma proporção, a evapotranspiração no interior desse ambiente.

O sistema agroflorestal apresenta condições térmicas mais favoráveis à produção de milho durante o pendoamento ao espigamento, enquanto para o feijão, os dois ambientes de cultivo não apresentaram limitações térmicas para seu cultivo.

5. CAPÍTULO 2 – CRESCIMENTO E PRODUÇÃO DE MILHO E FEIJÃO CULTIVADOS EM SISTEMA AGROFLORESTAL

5.1. Introdução

Com a intensificação do sistema produtivo aumentou a degradação dos agroecossistemas, com geração de riscos à saúde das espécies a partir da poluição ambiental. Recentemente existe uma maior preocupação da sociedade em busca do equilíbrio entre a produção de alimentos e a preservação do meio ambiente. Neste sentido os sistemas agroflorestais (SAF's) se destacam ao usar de forma integrada uma área para a geração de produtos florestais, agrícolas e de pecuária (Schmidt *et al.*, 2017), proporcionando ainda, estabilidade produtiva (Martins *et al.*, 2013).

A produção de milho (*Zea mays* L.), uma planta C4, e de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), uma planta C3, integrados ao SAF parece uma solução completa e complexa na produção de alimentos, pois ambos são importantes fontes para alcançar a segurança alimentar e nutricional, consumidos diariamente pela maioria da população e muito importantes nas propriedades familiares. A consorciação de milho e feijão apresenta maior eficiência na absorção de radiação solar em comparação aos seus monocultivos, resultando em maior produtividade total da área (Mahallati *et al.*, 2015; Nassary *et al.*, 2020), maior disponibilização de nitrogênio pela fixação biológica ao milho na consorciação com uma leguminosa (Nassary *et al.*, 2020) e poder de resiliência ao agricultor na ocorrência de intempéries meteorológicas (Habte *et al.*, 2016).

A biodiversidade produtiva é crucial para a produção futura de alimentos, pois o desequilíbrio ambiental antropológico intensifica o aquecimento global que pode comprometer a produção das espécies cultivadas nos moldes da agricultura moderna. O aquecimento global além de ocasionar o aumento de temperaturas extremas, chuvas intensas, e probabilidade de déficit hídrico em algumas regiões, potencializa a insegurança alimentar, abastecimento de água, e produção de alimentos para subsistência (Masson-Delmotte *et al.*, 2018), principalmente em comunidades camponesas. No Brasil, as propriedades familiares, apesar de representarem 76,8% dos estabelecimentos, abrangem apenas 23,0% da área agrícola (IBGE, 2017), possuindo, portanto, pequenas áreas, e o consórcio de milho e feijão é uma alternativa de intensificação sustentável do sistema produtivo na agricultura familiar (Kermah *et al.*, 2018).

Aliado à questão de otimização de área produtiva, a combinação de consórcios em SAF podem auxiliar ainda mais na diversificação, resiliência e eficiência no uso dos recursos na produção agrícola familiar. Contudo, para o sucesso do SAF na produção de grãos, é essencial que a copa das árvores permita transmitir a radiação solar em quantidade e qualidade suficiente ao longo do ciclo dos cultivos, o qual é extremamente viável para os anos iniciais de implementação. Não obstante, um SAF com dossel consolidado precisa buscar estratégias para contornar essa barreira física de produção e não diminuir a quantidade e qualidade dos produtos por redução de disponibilidade de radiação fotossinteticamente ativa (RFA) para os cultivos anuais (Elli *et al.*, 2016).

Em contrapartida aos inúmeros benefícios ecossistêmicos dos policultivos, plantas sombreadas podem apresentar estiolamento, maior crescimento vegetativo (Elli *et al.*, 2016; Schmidt *et al.*, 2017) e redução da produtividade (Péres-Marin *et al.*, 2007; Habte *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2017). Apesar disso, pesquisas que englobam todos os fatores supracitados são escassas devido a sua complexidade de avaliação e interpretação dos resultados. Dessa forma, a verificação sobre a resposta de crescimento e produção das plantas de milho e feijão sob manejo orgânico, em consórcio e sob sombreamento auxilia no estudo sobre a viabilidade produtiva e na escolha do arranjo de plantas de cultivo. Portanto, o objetivo deste estudo foi determinar os possíveis efeitos da transmitância de radiação solar em um sistema agroflorestal no crescimento e na produção do milho e do feijão em cultivo solteiro e consorciado.

5.2. Material e métodos

Os experimentos com cultivos solteiros e consorciados de milho e feijão foram conduzidos na área experimental da Embrapa Clima Temperado, Estação Experimental Cascata (31°37'S, 52°31'W, 173 m), em dois anos agrícolas 2021/22 e 2022/23. As duas espécies foram cultivadas em sistema orgânico a pleno sol (PS) e em área sob o dossel de um sistema agroflorestal (SAF), as quais se distanciam entre si por aproximadamente 40 m. O SAF, implantado em

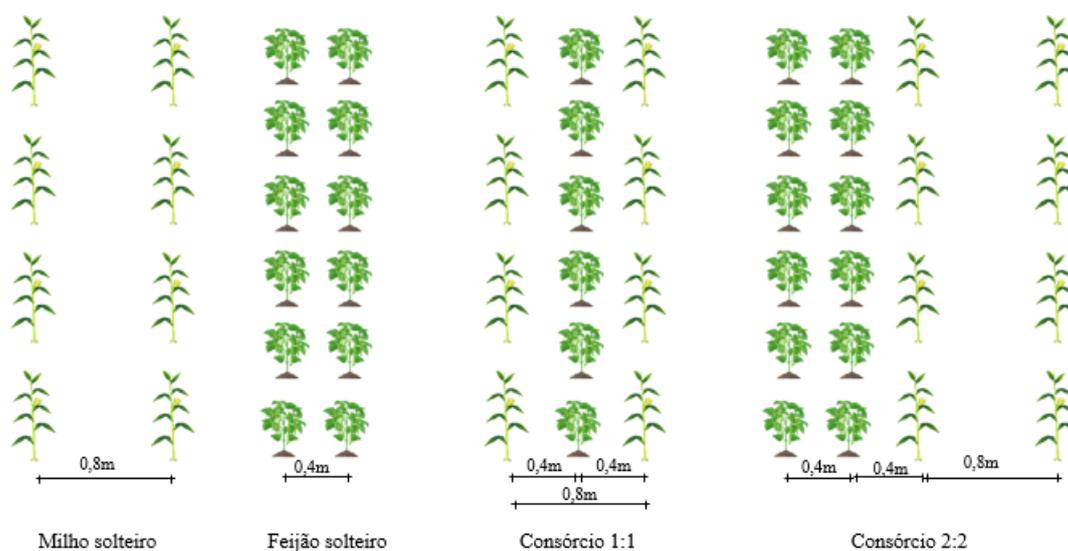
2013, é composto por espécies frutíferas *Carya illinoensis* (noqueira-pecã), *Citrus sinensis* (laranja), *Citrus bergamia* (bergamota), *Diospyros kaki* (caqui) e *Butia* sp. (butiá) e as espécies florestais *Trema micranta* (trema), *Enterolobium contortisiliquum* (timbaúva), *Peltophorum dubium* (canafístula), *Cedrela fissilis* (cedro), *Luehea divaricata* (açoita-cavalo), *Cordia trichotoma* (louro-pardo) e *Patagonula americana* (guajuvira) cultivadas no alinhamento norte-sul e espaçadas a 5 m entre fileiras. No ano agrícola 2021/22 foi realizada uma poda de limpeza, apenas para retirar os galhos do estrato baixo e médio nas entrelinhas (no máximo 2 m de altura), enquanto que em 2022/23 foi realizado uma poda drástica nas florestais a fim de permitir maior entrada de radiação solar para os cultivos anuais.

Ao longo do experimento foram realizadas capinas manuais, para controle de plantas espontâneas, e na safra 2022/23 foi aplicado *Bacillus thuringiensis* para controle da lagarta-do-cartucho no milho. Para adubação, foi colocado esterco de peru peletizado na dose de 800 g linha⁻¹ de base no milho e no feijão, e 800 g linha⁻¹ em cobertura somente no milho conforme a recomendação técnica (CQFS-RS/SC, 2016). As cultivares de milho utilizadas foram a 'BRS 019TL' e a 'BRS 015FB', escolhidas por características quanto a rusticidade, diferentes estaturas, produtividades e propósitos de uso (Schiedeck *et al.*, 2021). Destaca-se que a 'BRS 019TL' possui alto teor de proteína de até 12%, sendo produzida preferencialmente para grão, enquanto que a 'BRS 015FB' apresenta como diferencial o pericarpo branco, utilizada na produção de farinha. A cultivar de feijão utilizada foi a 'BRS Paisano', pertencente ao grupo de grãos pretos, preferencialmente produzido no sul do Brasil (CONAB, 2023).

As espécies foram avaliadas separadamente em cada ambiente. Foram avaliados arranjos de plantas: 'BRS Paisano' solteiro, 'BRS 015FB' solteiro, 'BRS 019TL' solteiro, 'BRS Paisano' consorciado com 'BRS 019TL' no arranjo 1:1, 'BRS Paisano' consorciado 'BRS 015FB' no arranjo 1:1, 'BRS Paisano' consorciado com 'BRS 019 TL' no arranjo 2:2 e 'BRS Paisano' consorciado com 'BRS 015FB' no arranjo 2:2 (Figura 15). Os arranjos 1:1 referem-se a linhas de feijão intercaladas as de milho, enquanto que os arranjos 2:2 referem-se a 2 linhas de milho ao lado de 2 linhas de feijão. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com 3 repetições na safra 2021/22 e 4 repetições na safra 2022/22. O feijão foi avaliado sendo um experimento fatorial 2x6 (2 ambientes e

6 arranjos de plantas) e o milho em fatorial $2 \times 2 \times 5$ (dois ambientes, duas cultivares e 5 arranjos de plantas). Cada unidade experimental mediu 15 m^2 ($3 \times 5 \text{ m}$) no SAF e 20 m^2 ($4 \times 5 \text{ m}$) no ST. O espaçamento dos cultivos foi de $0,8 \text{ m}$ entre linhas e $0,25 \text{ m}$ entre plantas para o milho, totalizando 5 sementes por metro linear, e de $0,4 \text{ m}$ entre linhas e $0,1 \text{ m}$ entre plantas para o feijão, totalizando 10 sementes por metro linear.

Figure 15 - Representação gráfica do espaçamento das entrelinhas dos arranjos solteiros de milho e feijão, e seus consórcios 1:1 e 2:2. Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

As condições meteorológicas foram caracterizadas a partir de dados coletados em uma estação meteorológica automática, localizada a 110 m da área experimental, referentes a radiação solar global (W m^{-2}), temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) e precipitação pluvial (mm). Além disso, foi avaliada, com piranômetro portátil, a radiação solar global (W m^{-2}) incidente nos dois ambientes, nas linhas centrais das parcelas, com distância de $2,1 \text{ m}$ até $2,5 \text{ m}$ das árvores, durante 10 às 14h nos dias $08/12/2021$ e $14/12/2022$ quando as plantas de feijão estavam na floração (Pohlmann *et al.*, 2022a) e nas datas $11/01/2022$ e $19/01/2023$ quando as plantas de milho estavam no pendoamento (Langner *et al.*, 2022), ambos estádios fenológicos escolhidos por serem as fases críticas das culturas, principalmente sobre déficit hídrico. A partir desses dados foi determinada a transmissividade da radiação solar aos cultivos solteiros pela equação:

$$T = \frac{Rs_{saf}}{Rs_{ps}} * 100 \quad (15)$$

onde, T = transmissividade (%); Rs saf= radiação solar global ($W m^{-2}$) dentro do sistema agroflorestal, ao nível do dossel dos cultivos; Rs ps = radiação solar global ($W m^{-2}$) acima do sistema agroflorestal (Sgarbossa *et al.*, 2020).

A partir dos dados meteorológicos calculou-se a evapotranspiração de referência (ET_o) pelo método de Jensen Haise modificado para Pelotas-RS (Hallal *et al.*, 2014) e, a partir desta, foi estimada a evapotranspiração da cultura para a confecção do balanço hídrico para a cultura do milho, que é a mais exigente em água em relação ao feijão. Para o cálculo do balanço hídrico, conforme metodologia de Thornthwaite e Mather (1955), considerou-se a classe de textura média de (23% de argila) (Embrapa, 2018), com CAD variável de 20 $mm m^{-1}$ na emergência, aumentando 5,56 $mm m^{-1}$ a cada 5 dias até atingir 70 $mm m^{-1}$ aos 50 dias após a emergência, considerando que o milho leva em torno de 50 dias para atingir 50 cm de profundidade das raízes (Manfron *et al.*, 2003) que, de acordo com Guan *et al.* (2014), é sua profundidade efetiva. Para a determinação da evapotranspiração do milho, foi considerada a ET_o e o coeficiente de cultivo (Kc) variável para o ciclo do milho (Allen *et al.*, 2006).

Para determinação do crescimento foram realizadas avaliações fenométricas em R6 no feijão (Fernandez; Geptz; Lopes (1986) e VT no milho (Ritchie; Hanway; Benson (1993), referentes à estatura (cm), número de nós, diâmetro da haste (mm) e área foliar ($cm^2 planta^{-1}$), a qual foi determinada por meio do somatório das medidas lineares (comprimento (C) e largura (L)) de todas as folhas do milho, e de todos os folíolos centrais dos trifólios do feijão. A equação utilizada para o milho é a 16 (Montgomery, 1911) e do feijão a 17 (Pohlmann *et al.*, 2021):

$$AF: \sum 0,75 * CL \quad (16)$$

$$AF = \sum 1,092 * C^{1,945} \quad (17)$$

No final do ciclo foram colhidas as duas linhas centrais de cada espécie e analisados os componentes da produção: número de vagens granadas e grãos por planta para o feijão, número de espigas e grãos por espiga para o milho, além da produção por planta e produtividade estimada para ambas as culturas. Para ajustar a área das parcelas a fim de ser possível comparar os arranjos de plantas a partir das 2 linhas centrais como parcela útil, utilizou-se para o feijão solteiro área de 2 m², para o milho solteiro e consórcio 1:1 de 4 m² e o consórcio 2:2 de 5 m², assim o valor estimado refere-se a 250, 125 e 100 mil plantas ha⁻¹ para o feijão solteiro, em consórcio 1:1 e em consórcio 2:2 respectivamente e de 50, 50 e 40 mil plantas ha⁻¹ para o milho solteiro, em consórcio 1:1 e em consórcio 2:2 respectivamente.

Para avaliar a eficiência biológica dos consórcios na área, foram considerados: o uso eficiente da terra (UET) que avalia a participação da produtividade de cada cultura no consórcio (Mead; Willey, 1980):

$$UET = \frac{Y_m}{X_m} + \frac{Y_f}{X_f} \quad (18)$$

em que Y_m e Y_f são as produtividades do milho e feijão, respectivamente, em consórcio, X_m e X_f são as produtividades das culturas em monocultivo. Se $UET > 1$ houve vantagem produtiva, se $UET = 1$ não houve vantagem produtiva, se $UET < 1$ houve desvantagem produtiva.

O coeficiente equivalente de terra (CET) que avalia a interação entre as culturas em consórcio (Adetiloye *et al.*, 1983):

$$CET = UET_m * UET_f \quad (19)$$

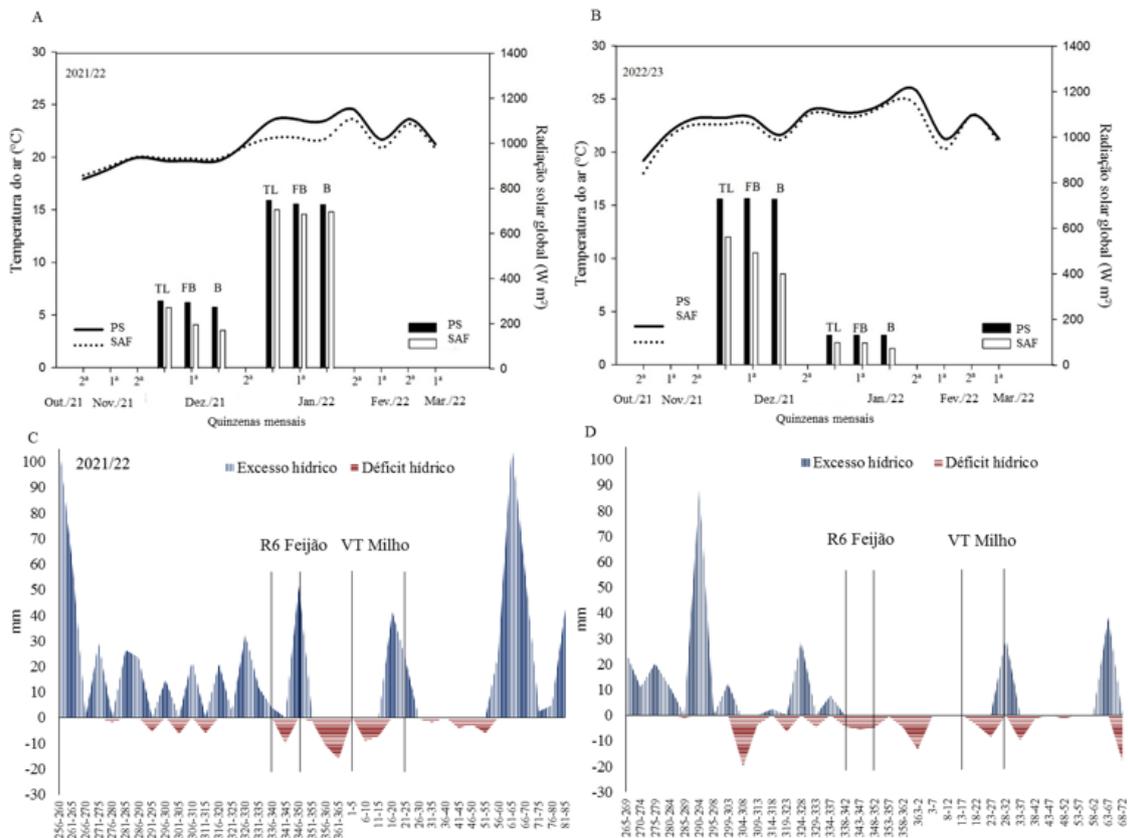
em que UET_m e UET_f representam o uso eficiente de terra parcial do milho e feijão, respectivamente. Em consórcio entre duas cultivares, os autores mencionam que se espera um CET de 0,25 ou 25% para o consórcio ser viável, possuir vantagem de produtividade sobre o monocultivo. Esse valor surge da produtividade teórica de 50:50, onde a competição interespecífica é igual a intraespecífica.

Os dados obtidos foram analisados quanto ao atendimento aos pressupostos do modelo matemático, de normalidade do erro experimental por meio do teste Shapiro Wilk, e de homogeneidade das variâncias por meio do teste Oneillmathews, e na sequência os dados foram analisados pelo teste de variância, e quando significativos, suas médias foram distinguidas pelo teste Tukey a 0,05 de probabilidade do erro por meio do pacote ExpDes.pt (Ferreira *et al.*, 2021) pelo software R (R Core Team, 2020). Fazendo uso do mesmo programa foi realizado o test t para os dados meteorológicos a 0,05 de probabilidade de erro e calculado o desvio padrão. Quando os pressupostos do modelo matemático não foram atendidos, os dados foram transformados por BoxCox por meio do software Action (Action, 2014).

5.3. Resultados e discussão

As temperaturas médias diárias do ar dos dois ambientes foram similares nas duas safras. Para o período de cultivo da safra, as temperaturas médias do ar no SAF e no PS em 2021/22 foram iguais (teste $t=0,26$) de $20,8^{\circ}\text{C}$ ($\pm 3,0^{\circ}\text{C}$) e $21,2^{\circ}\text{C}$ ($\pm 3,3^{\circ}\text{C}$), respectivamente e em 2022/23 a temperatura do SAF foi menor do que em PS (teste $t=0,00$), com média de $22,0^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2,6^{\circ}\text{C}$) e $23,0^{\circ}\text{C}$ ($\pm 2,5^{\circ}\text{C}$), respectivamente (Figura 16A, B). A radiação solar global incidente nas datas avaliadas foi maior no PS em comparação ao SAF, com média de $288,7\text{ W m}^{-2}$ e $212,2\text{ W m}^{-2}$ em 08/12/21, $735,4\text{ W m}^{-2}$ e $695,4\text{ W m}^{-2}$ em 11/01/22, $729,1\text{ W m}^{-2}$ e $485,0\text{ W m}^{-2}$ em 14/12/22 e $130,8\text{ W m}^{-2}$ e $89,2\text{ W m}^{-2}$ em 19/01/23. Assim como verificado com a menor temperatura do ar no SAF, a transmissividade da radiação solar em relação ao PS também foi menor, obtendo valores médios de 73,5% em 08/12/21, 94,6% em 11/01/22, 66,5% em 14/12/22 e 68,2% em 19/01/23.

Figura 16 - Temperatura do ar média e radiação solar global para os ambientes sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) na safra 2021/2022 (A) e 2022/2023 (B) e representação gráfica simplificada do balanço hídrico sequencial para as safras 2021/2022 (C) e 2022/2023 (D). TL: milho 'BRS 019TL', FB: milho 'BRS 015FB', B: feijão 'BRS Paisano'. Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

Nos cultivos solteiros a transmissividade do milho 'BRS 019TL' e 'BRS 015FB' e do feijão 'BRS Paisano' foram, respectivamente de 79,1%, 70,1% e 71,2% em 08/12/21; 96,3%, 95,7% e 92,0% em 11/01/22; 76,9%, 69,7% e 53,0% em 14/12/22; e 75,1%, 73,4% e 56,0% em 19/01/23. As plantas cultivadas sofreram com períodos de déficit hídrico nas duas safras, entretanto, com maior severidade em 2022/23 (Figura 16), tornando a água um fator limitante ao crescimento e a produção do milho e do feijão (Langner *et al.*, 2022; Pohlmann *et al.*, 2022b). Em 2021/22 o déficit hídrico acumulado foi de 83 mm, da emergência a maturação do milho, sendo que durante o pendoamento do milho foram observados 16 mm de déficit (Figura 16C) e durante a floração do feijão a deficiência foi de 10 mm. Em 2022/23 o acumulado de déficit hídrico foi de 111 mm, com 14 mm durante a floração do feijão e 12 mm no pendoamento no milho (Figura 16D).

Na análise estatística dos componentes da produção do milho foi testada a interação tripla dos fatores, porém esta não foi significativa em nenhuma das duas safras (Tabela 7). Na safra 2021/22 os fatores foram avaliados separadamente, podendo-se inferir que tanto os arranjos de plantas quanto as cultivares apresentaram o mesmo comportamento nos dois ambientes. Entretanto, em 2022/23 a interação ambiente x arranjo de plantas (A*AR) significativa demonstra que os arranjos de plantas apresentaram respostas diferentes em cada ambiente para a produtividade, produção por planta, grãos por espiga e diâmetro de haste, enquanto que o fator cultivar apresentou o mesmo comportamento. Para o feijão, em ambas as safras a interação dupla não foi significativa e os fatores foram avaliados separadamente.

Tabela 7 - Valores do teste F obtido na análise de variância para as variáveis de produção e de crescimento e seus coeficientes de variação (C.V., %) para as cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) e do feijão 'BRS Paisano'. Pelotas, RS.

Causa de variação	Milho 2021/22					Feijão 2021/22	
	AXARXC*	AXAR	AXC	AR*C	C.V.	AXAR	C.V.
Produtividade	0,62 ^{ns}	0,49 ^{ns}	0,75 ^{ns}	0,43 ^{ns}	50,74	0,68 ^{ns}	44,62
Produção por planta	0,31 ^{ns}	0,23 ^{ns}	1,42 ^{ns}	0,69 ^{ns}	42,41	0,22 ^{ns}	50,82
Grãos por espiga	0,68 ^{ns}	0,37 ^{ns}	2,99 ^{ns}	1,75 ^{ns}	24,78	-	-
Número de vagens	-	-	-	-	-	0,90 ^{ns}	38,32
Grãos por planta	-	-	-	-	-	0,41 ^{ns}	48,60
Estatura	0,74 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,31 ^{ns}	0,05 ^{ns}	15,30	0,97 ^{ns}	15,92
Diâmetro da haste	0,75 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,30 ^{ns}	1,42 ^{ns}	14,26	0,45 ^{ns}	34,96
Número de nós						0,27 ^{ns}	15,28
Área foliar	0,19 ^{ns}	0,92 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1,10 ^{ns}	22,94	0,71 ^{ns}	42,04
Causa de variação	Milho 2022/23					Feijão 2022/23	
	AXARXC	AXAR	AXC	AR*C	C.V.	AXAR	C.V.
Produtividade	1,00 ^{ns}	6,38*	0,12 ^{ns}	0,75 ^{ns}	33,93	1,72 ^{ns}	68,70
Produção por planta	0,19 ^{ns}	3,69*	1,59 ^{ns}	0,81 ^{ns}	25,14	0,35 ^{ns}	46,11
Grãos por espiga	0,79 ^{ns}	4,79*	4,06 ^{ns}	0,55 ^{ns}	25,09	-	-
Número de vagens granadas	-	-	-	-	-	0,49 ^{ns}	33,89
Grãos por planta	-	-	-	-	-	0,39 ^{ns}	43,46
Estatura	0,27 ^{ns}	0,88 ^{ns}	1,50 ^{ns}	0,55 ^{ns}	13,27	0,19 ^{ns}	25,00
Diâmetro da haste	0,04 ^{ns}	5,28*	0,53 ^{ns}	0,06 ^{ns}	9,76	0,68 ^{ns}	17,81
Número de nós						1,02 ^{ns}	10,66
Área foliar	1,70 ^{ns}	1,77 ^{ns}	2,60 ^{ns}	0,00 ^{ns}	15,17	0,07 ^{ns}	38,51

*A= ambientes, AR= arranjos de plantas e C= cultivares.

Fonte? Elaborado pela autora.

As plantas de milho no SAF apresentaram maiores estaturas na safra 2021/22 em relação ao PS, fato que não se comprovou na safra seguinte (Tabela

8). Nas duas safras, as plantas no SAF apresentaram menor diâmetro da haste em comparação ao PS, e em 2022/23 no PS o solteiro apresentou maior média do que os consórcios (Tabela 8). Para área foliar, a diferença foi significativa apenas em 2022/23, com maiores valores para as plantas do SAF. A comparação entre cultivares de milho demonstra que a cultivar BRS 019TL superou a 'BRS 015FB' em estatura, diâmetro de haste e área foliar (Tabela 8) nas duas safras avaliadas.

Tabela 8 - Componentes fenométricos do milho produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) nas safras 2021/22 e 2022/23 para as cultivares BRS 019TL (TL) e BRS 015FB (FB) consorciado com feijão 'BRS Paisano'. Pelotas, RS.

(continua)

Estatura (cm)								
2021/22								
	SAF		Média	PS		Média	Média	
	TL	FB		TL	FB			
Solteiro	186,9	160	173,5	145,4	127,9	136,7	155,1	NS
1:1	177,1	156,4	166,8	149,6	128,1	138,9	152,8	
2:2	157,9	158,2	158,1	140,8	107,1	123,9	141,0	
Média			166,1	A		133,2	B	
TL	159,6	A						
FB	139,6	B						
Estatura (cm)								
2022/23								
	SAF		Média	PS		Média	Média	
	TL	FB		TL	FB			
Solteiro	137,7	102,4	120,0	128,3	111	119,6	119,8	NS
1:1	140,5	100,4	120,4	122,5	94,3	108,4	114,4	
2:2	129,4	105,0	117,2	114,8	92,8	103,8	110,5	
Média			119,2	NS		110,6		
TL	128,8	A						
FB	100,9	B						
Diâmetro da haste (mm)								
2021/22								
	SAF		Média	PS		Média	Média	
	TL	FB		TL	FB			
Solteiro	19,1	13,9	16,5	24,3	21,7	23,0	20,0	NS
1:1	16,8	15,2	16,0	21,7	22,7	22,2	19,6	
2:2	17,8	16,0	16,9	23,0	19,0	21,0	19,3	
Média			16,0	B		22,0	A	

Tabela 8 - Componentes fenométricos do milho produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) nas safras 2021/22 e 2022/23 para as cultivares BRS 019TL (TL) e BRS 015FB (FB) consorciado com feijão 'BRS Paisano'. Pelotas, RS.

(continuação)

TL	21,2	A							
FB	18,1	B							
Diâmetro da haste (mm)									
2022/23									
	SAF		Média		PS		Média	Média	
	TL	FB			TL	FB			
Solteiro	15,7	12,9	14,3	Ba	26,5	24,8	25,6	Aa	19,9
1:1	15,6	12,5	14,0	Ba	23,3	21,0	22,1	Ab	18,0
2:2	15,5	12,7	14,1	Ba	22,8	20,3	21,5	Ab	17,8
Média			14,2				23,1		
TL	19,9	A							
FB	17,3	B							
Área foliar (cm ² folha ⁻¹)									
2021/22									
	SAF		Média		PS		Média	Média	
	TL	FB			TL	FB			
Solteiro	4396,3	2859	3627,6		4849,9	3054,5	3952,2	3789,9	NS
1:1	4252,8	3339,2	3796,0		3587,2	3153,2	3370,2	3583,1	
2:2	4185,2	3273,3	3729,2		3789,8	2648,2	3219,0	3474,1	
Média			3717,6	NS			3513,8		
TL	4176,9	A							
FB	3054,6	B							
Área foliar (cm ² folha ⁻¹)									
2022/23									
	SAF		Média		PS		Média	Média	
	TL	FB			TL	FB			
Solteiro	3340,8	2200,4	2770,6		2872,5	1781,0	2326,8	2548,7	NS
1:1	3481,1	1931,7	2706,4		2340,3	1678,0	2009,1	2357,8	
2:2	3334,0	2174,1	2754,0		2365,3	1286,0	1825,6	2289,8	
Média			2743,6	A			2053,8	B	
TL	2955,6	A							
FB	1841,8	B							

Interação ambiente x arranjo de plantas= letras maiúsculas na linha diferem para cada ambiente em cada arranjo e letras minúsculas na coluna diferem para cada arranjo dentro de cada ambiente. Letras maiúsculas diferentes nas médias dos fatores diferem entre si. Ns: não significativo a probabilidade de 0,05 de erro.

Fonte: Elaborada pela autora.

A maior estatura das plantas de milho no SAF na safra 2021/22 em relação ao PS, é possivelmente estimulada pela competição por luz, as plantas de milho no SAF aumentam em estatura e diminuem em diâmetro da haste (Tabela 8), resultando em plantas mais frágeis e suscetíveis ao acamamento, com maior possibilidade de quebra do colmo. Isso corrobora com o observado por Tibolla *et al.* (2019) com o cultivo de soja, cujas plantas sombreadas tendem a incrementar seu alongamento celular, resultando em maior estatura e menor diâmetro do caule. Sob intenso déficit hídrico em 2022/23 (Figura 16D), essa característica de menor diâmetro da haste foi destacada em todos os arranjos de plantas onde o milho no SAF apresentou menores valores em comparação ao cultivo a PS. Independente da cultivar de milho utilizada, o consórcio com o feijão não influenciou o comportamento do milho quanto aos parâmetros de crescimento, o que é corroborado por Habte *et al.* (2016), os quais também não observaram diferença na estatura e área foliar do milho consorciado com feijão.

O crescimento feijão também apresentou diferença entre os ambientes de cultivo, com maior estatura no SAF na safra de 2021/22 e área foliar nas safras 2021/22 e 2022/23 em relação ao PS, provavelmente o crescimento em estatura em 2022/23 foi igual nos dois ambientes em virtude do intenso déficit hídrico verificado nessa safra (Tabela 9, Figura 16D), o qual foi agravado pela competição por água com as arbóreas do SAF. Uma das respostas morfológicas adaptativas a baixa luminosidades da planta é o aumento da área de captação de energia, com o alongamento celular, apresentando valores médios de comprimento da folha de 7,6 cm e 7,9 cm no feijão e 57,4 cm e 62,1 cm no milho para o PS e o SAF, respectivamente. O alongamento celular acaba resultando em aumento da área foliar do milho e do feijão sob restrição solar de 50% (Lacerda *et al.*, 2010) e em soja com sombreamento de 30% (Tibolla *et al.*, 2019). Em condições de menor déficit hídrico verificada na safra 2021/22 (Figura 16C), o diâmetro da haste do feijão foi maior no cultivo PS sem sombreamento, assim como observado por Tibolla *et al.* (2019) em soja. O consórcio com o milho não influenciou no crescimento do feijão, resultado similar ao observado por Habte *et al.* (2016) que também não observaram diferença estatística para estatura e área foliar do feijão consorciado ao milho.

Tabela 9 - Componentes fenométricos do feijão 'BRS Paisano' produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) em diferentes arranjos de plantas com as cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.

Estatura (cm)								
2021/22				2022/23				
	SAF	PS	Média		SAF	PS	Média	
Solteiro	34,3	26,7	30,5	NS	28,6	26,5	27,5	NS
1:1 TL	25,6	22,7	24,1		24,3	26,8	25,5	
1:1 FB	24,1	23,9	24,0		25,6	25,5	25,5	
2:2 TL	34,8	27,8	31,3		27,8	25,3	26,5	
2:2 FB	30,8	23,7	27,3		26,5	27,3	26,8	
Média	29,9	A	24,9	B	26,5	NS	26,2	

Número de nós								
2021/22				2022/23				
	SAF	PS	Média		SAF	PS	Média	
Solteiro	7,5	7,3	7,4	NS	4,5	6,3	5,3	NS
1:1 TL	5,9	6,2	6,0		3,9	7,0	5,4	
1:1 FB	6,6	6,1	6,3		3,9	6,5	5,2	
2:2 TL	7,5	7,5	7,5		4,3	7,0	5,6	
2:2 FB	7,1	6,3	6,7		4,1	6,3	5,2	
Média	6,9	NS	6,7		4,1	B	6,6	A

Diâmetro da haste (mm)								
2021/22				2022/23				
	SAF	PS	Média		SAF	PS	Média	
Solteiro	4,6	4,9	4,8	NS	6,9	6,8	6,8	NS
1:1 TL	2,5	5,1	3,8		6,4	6,8	6,5	
1:1 FB	3,9	4,7	4,3		6,6	6,5	6,5	
2:2 TL	3,9	5,2	4,6		6,4	6,0	6,2	
2:2 FB	3,9	5,5	4,9		6,4	7,3	6,8	
Média	3,9	B	5,0	A	6,5	NS	6,6	

Área foliar (cm ² folha ⁻¹)								
2021/22				2022/23				
	SAF	PS	Média		SAF	PS	Média	
Solteiro	1107,9	1039,5	1073,7	NS	742,9	1027,8	885,3	NS
1:1 TL	1234,3	746,6	990,4		619,0	1015,5	817,2	
1:1 FB	882,5	472,5	677,5		618,2	862,3	740,2	
2:2 TL	895,1	1080,8	987,9		644,7	969,3	807,0	
2:2 FB	1051,4	875,2	963,3		682,3	1019,3	850,8	
Média	1034,2	A	842,9	B	661,4	B	978,8	A

Letras diferentes nas médias na coluna diferem para os arranjos de plantas, e na linha para os ambientes. Ns: não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade de erro pelo teste Tukey.

Fonte: Elaborada pela autora.

A transmissividade da radiação solar no SAF apresentou variação de uma safra para outra, com valor médio de 84% na safra 2021/22, e de 64% na safra 2022/23 na qual foi verificado menores excedentes hídricos e maiores deficiências de água pelo Balanço Hídrico sequencial (Figura 16). Possivelmente essas condições hídricas e a poda drástica que as plantas do SAF haviam recebido previamente, proporcionaram diferentes estímulos ao crescimento das brotações das arbóreas, as quais aumentaram a cobertura do dossel do SAF e, conseqüentemente, diminuíram a transmissividade para a radiação solar. Essa menor transmissividade da radiação solar pelo SAF combinada com o longo período de déficit hídrico (Figura 16) verificado na safra 2022/23, explica a menor área foliar do milho (Tabela 8) e do feijão (Tabela 9) obtidos nesse ambiente em relação a safra anterior. Considerando a estatura dessas espécies, nota-se atenuação da transmissividade de radiação solar a medida que se avança o perfil do SAF, do topo ao solo, com maiores valores observados para 'BRS 019TL' nas duas safras por apresentar maior estatura em comparação a 'BRS 015FB' (Tabela 8), seguido por o feijão 'BRS Paisano' (Tabela 9). Esse resultado pode ser explicado por meio da lei de Beer, pois a medida que a radiação solar atravessa o dossel, vai progressivamente se extinguindo, considerando um SAF biodiverso com plantas de distintas estaturas e áreas foliares, explica-se a atenuação ao longo do seu perfil (Bergamaschi; Bergonci, 2017).

O maior crescimento em estatura das plantas de milho e feijão no SAF em um ano sem déficit hídrico severo (2021/22) discorda do que foi observado em milho consorciado com pau-branco (*Cordia oncocalyx*) por Mendes *et al.* (2013) onde verificaram que a estatura da granífera aumenta com o distanciamento das arbóreas e também com o feijão consorciado com pessegueiros avaliados por Thakur *et al.* (2019), que observaram que a altura máxima do feijão ocorreu em campo aberto e o menor sob sombreamento das árvores. Entretanto, corrobora com o observado em outras culturas, como em soja cujo o sombreamento de 50% resultou em maior estatura das plantas (Tibolla *et al.*, 2019), da mesma forma que variedades de feijão caupi apresentaram crescimento linear em altura com o incremento do sombreamento de 30, 50 e 70%, conforme relatado por Coelho *et al.* (2014). De acordo com Taiz; Zeiger (2013), plantas desenvolvidas para serem cultivadas a pleno sol quando submetidas ao sombreamento alocam

a maior parte dos recursos para o crescimento em altura, com o fitocromo atuando na percepção da sombra.

Nos componentes de rendimento do milho na comparação dos ambientes é possível verificar na Tabela 10 que os componentes de produção no PS superaram aqueles obtidos no SAF. Em 2021/22 a produção por planta e número de grãos por espiga apresentaram maiores médias no PS do que no SAF. Na safra 2022/23 houve interação significativa entre os fatores ambiente e arranjos de plantas para as variáveis produtividade, produção por planta e grãos por espiga no milho (Tabela 10) o PS apresentou maiores valores de produção em comparação ao SAF, e entre os arranjos não houve distinção no SAF, enquanto no PS o cultivo em solteiro apresentou melhor desempenho. Em ambas as safras a cultivar BRS 019TL se demonstrou mais produtiva, entretanto, deve-se destacar que o propósito desta cultivar é a produção de grãos, enquanto que a 'BRS 015FB', a produção de farinha. Entre os arranjos de plantas, em 2021/22 não houve diferença significativa, e dessa forma, o consórcio com feijão pode ser utilizado sem perdas expressivas dos componentes de rendimento, ofertando uma produção extra de feijão.

Tabela 10 - Produtividade e componentes de rendimento do milho produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) com as cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) consorciadas com o feijão 'BRS Paisano' nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.

(continua)

Produtividade (Kg ha ⁻¹)										
2021/22										
	SAF			Média	PS			Média	Média	
	TL	FB			TL	FB				
Solteiro	1354,3	581,7		968,0	2251,1	1819,1		2035,1	1501,5	NS
1:1	670,5	962,8		816,7	2646,7	2089,3		2368,0	1592,3	
2:2	768,6	535,0		651,8	2166,7	1193,7		1680,2	1166,0	
Média				812,1				2027,8		A
TL	1643,0									NS
FB	1196,9									
Produtividade (Kg ha ⁻¹)										
2022/23										
	SAF			Média	PS			Média	Média	
	TL	FB			TL	FB				
Solteiro	860,3	342,3		601,2	2433,3	1831,5		2132,4	Aa	1366,8

Tabela 10 - Produtividade e componentes de rendimento do milho produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) com as cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) consorciadas com o feijão 'BRS Paisano' nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.

(continuação)

1:1	711,8	595,3	653,5	Ba	1699,0	1377,5	1538,2	Ab	1095,8
2:2	1059,3	399,3	729,2	Ba	1352,3	1220,3	1286,2	Ab	1007,7
Média			661,4				1652,3		
TL	1352,6	A							
FB	961,0	B							
Produção por planta (g)									
2021/22									
	SAF		Média		PS		Média		Média
	TL	FB			TL	FB			
Solteiro	42,0	23,7	32,8		68,0	48,3	58,2	45,5	NS
1:1	24,3	32,3	28,3		71,7	55,0	63,3	45,8	
2:2	32,3	21,0	26,7		76,0	45,2	60,6	43,6	
Média			29,3	B			60,7	A	
TL	52,4	A							
FB	37,6	B							
Produção por planta (g)									
2022/23									
	SAF		Média		PS		Média		Média
	TL	FB			TL	FB			
Solteiro	19,0	8,4	13,7	Ba	55,0	42,8	48,9	Aa	31,3
1:1	16,4	15,1	15,8	Ba	44,0	35,3	39,6	Ab	27,7
2:2	19,0	15,7	17,4	Ba	44,8	34,5	39,6	Ab	28,5
Média			15,6				42,7		
TL	33,0	A							
FB	25,3	B							
Grãos por espiga									
2021/22									
	SAF		Média		PS		Média		Média
	TL	FB			TL	FB			
Solteiro	183,3	132,0	157,7		267,8	200,7	234,3	196,0	NS
1:1	121,2	156,3	138,8		245,0	213,3	229,2	184,0	
2:2	137,2	128,1	132,7		298,4	184,8	241,6	187,1	
Média			143,0	B			235,0	A	
TL	208,8	A							
FB	169,2	B							
Grãos por espiga									
2022/23									

Tabela 10 - Produtividade e componentes de rendimento do milho produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) com as cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) consorciadas com o feijão 'BRS Paisano' nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.

(continuação)

	SAF		Média		PS		Média		Média
	TL	FB			TL	FB			
Solteiro	29,5	12,0	20,7	Ba	296,0	251,0	273,5	Aa	147,1
1:1	26,5	21,8	24,1	Ba	270,5	194,5	232,5	Ab	128,3
2:2	31,0	22,8	26,9	Ba	220,5	196,3	208,4	Ab	117,6
Média			23,9				238,1		
TL	145,7	A							
FB	116,4	B							

Interação ambiente x arranjo de plantas = letras maiúsculas na linha diferem para cada ambiente em cada arranjo e letras minúsculas na coluna diferem para cada arranjo dentro de cada ambiente. Letras maiúsculas diferentes nas médias dos fatores diferem entre si. Ns: não significativo a probabilidade de 0,05 de erro.

Fonte: Elabora pela autora.

Conforme pode ser consultado na Tabela 11, o feijão cultivado no ambiente PS apresentou maiores médias para produtividade, produção por planta, grãos por planta e número de vagem. Para o feijão, não somente o sombreamento das árvores resultou em menor produção, mas o sombreamento causado pelo milho, resultado corroborado por outros trabalhos com soja, por Tibolla *et al.* (2019) que obteve maior produtividade sob cultivo sem sombreamento por outras espécies e por Liu *et al.* (2017) para soja consorciada com milho, onde a maior produtividade também ocorreu no cultivo solteiro devido ao maior número de grãos, seguido por consórcio 2:2 e 1:1 (Liu *et al.*, 2017).

A produtividade no SAF foi menor do que no PS para ambas as culturas, conforme pode ser observado nas Tabelas 10, 11. Na safra 2021/22 para o milho a redução foi de 59,9%, com média de 812,2 kg ha⁻¹ ($\pm 306,1$ kg ha⁻¹) no SAF e de 2027,8 kg ha⁻¹ ($\pm 488,9$ kg ha⁻¹) no PS (Tabela 10). Na mesma safra para o feijão a redução foi de 49,7%, com média de 705,4 kg ha⁻¹ ($\pm 644,9$ kg ha⁻¹) no SAF e de 1403,5 kg ha⁻¹ ($\pm 891,0$ kg ha⁻¹) no PS (Tabela 11). Na safra 2022/23, a redução da produtividade entre os ambientes foi acentuada pelo déficit hídrico, com redução do SAF em relação ao PS, para o milho em 60,0% e para o feijão em 63,4%. Nessa safra, a média para o milho foi de 661,3 kg ha⁻¹ ($\pm 274,0$ kg ha⁻¹) no SAF e de 1652,3 kg ha⁻¹ ($\pm 446,4$ kg ha⁻¹) no PS (Tabela 10), e para o feijão, de 265,8 kg ha⁻¹ ($\pm 217,3$ kg ha⁻¹) no SAF e de 725,8 kg ha⁻¹ ($\pm 532,1$ kg ha⁻¹) no PS (Tabela 11).

Tabela 11 - Produtividade e componentes de rendimento do feijão 'BRS Paisano' produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) em diferentes arranjos de plantas com as cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.

Produtividade (Kg ha ⁻¹)								
2021/22					2022/23			
	SAF	PS	Média		SAF	PS	Média	
Solteiro	1841,3	2978,6	2409,9	A	652,1	1667,6	1159,8	A
1:1 TL	277,9	824,6	551,2	B	187,9	550,5	387,6	B
1:1 FB	430,4	1075,6	753,0	B	196,2	579,0	369,2	B
2:2 TL	385,8	1189,2	787,5	B	135,0	442,2	288,6	B
2:2 FB	591,5	949,3	770,4	B	158,0	389,7	273,8	B
Média	705,4	B	1403,5	A	265,8	B	725,8	A

Produção por planta (g)								
2021/22					2022/23			
	SAF	PS	Média		SAF	PS	Média	
Solteiro	11,4	19,1	15,2	NS	3,1	9,5	6,3	NS
1:1 TL	3,6	15,2	9,4		2,2	6,4	4,3	
1:1 FB	5,1	17,2	11,2		2,8	7,0	4,9	
2:2 TL	8,1	21,4	14,7		2,0	7,5	4,7	
2:2 FB	10,1	18,1	14,1		2,3	8,1	5,2	
Média	7,6	B	18,2	A	2,5	B	7,7	A

Grãos por planta								
2021/22					2022/23			
	SAF	PS	Média		SAF	PS	Média	
Solteiro	70,2	94,6	82,4	NS	20,8	51,6	36,2	NS
1:1 TL	16,5	80,6	48,5		15,0	36,0	25,5	
1:1 FB	23,8	84,2	54,0		16,9	37,0	26,9	
2:2 TL	42,0	90,7	66,3		12,2	43,2	27,7	
2:2 FB	46,7	86,4	66,6		15,0	45,2	30,1	
Média	39,8	B	87,3	A	16,0	B	42,6	A

Número de vagens								
2021/22					2022/23			
	SAF	PS	Média		SAF	PS	Média	
Solteiro	13,2	18,8	16,0	NS	5,4	12,6	9,0	NS
1:1 TL	3,6	16,3	9,9		4,0	9,2	6,6	
1:1 FB	5,0	17,6	11,3		4,5	9,6	7,0	
2:2 TL	8,1	18,9	13,5		3,2	10,7	6,9	
2:2 FB	9,1	14,2	11,6		4,1	11,8	7,9	
Média	7,8	B	17,2	A	4,2	B	10,8	A

Letras minúsculas nas médias na coluna diferem para os arranjos de plantas e na linha para os ambientes. Ns: não significativo pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade.

Fonte: Elaborada pela autora.

Em ambas safras a redução do milho produzido em SAF foi de 60%, valor concomitante ao encontrado por Pezzopane *et al.* (2019) avaliando o milho consorciado a eucalipto. Para o feijão, a redução média considerando as duas safras foi de 56,5%, valor próximo ao encontrado por Sgarbossa *et al.* (2020) de 58,5%. A redução de até 33% na oferta de radiação solar aos cultivos de milho e feijão pode comprometer a produção de grãos. Em milho, segundo Yang *et al.* (2021b), uma redução de 30,0% da radiação solar acarretou na diminuição da produtividade de 8,9 para 5,8 t ha⁻¹. Em outro estudo com milho, Pezzopane *et al.* (2019) observaram que a redução a partir de 15% da radiação fotossinteticamente ativa causa menor produtividade. Em soja o consórcio com árvores é possível se o componente arbóreo interceptar menos de 30% da oferta de radiação solar (Tibolla *et al.*, 2019). Essas referências indicam que a menor disponibilidade de radiação para o milho e para o feijão no SAF, obtidos neste trabalho, são limitantes à produtividade dessas espécies.

A redução da produtividade no SAF em relação ao PS é presumida pois as diversas espécies competem por água, nutrientes e luz (Péres-Marin *et al.*, 2007). Em feijão consorciado com milho, a restrição luminosa pode causar uma redução na produtividade de 70 a 80% em comparação ao cultivo solteiro, pois mesmo sendo uma planta C3, com saturação de radiação solar reduzida, a radiação fotossinteticamente ativa (RFA) disponibilizada ao feijão sob consórcio com milho é inferior à sua necessidade (Costa; Silva, 2008). Da mesma maneira, maior produtividade do feijão solteiro do que em consórcio com milho também foi observado em experimento realizado na Etiópia (Habte *et al.*, 2016).

Em estudo com milho consorciado com gliricídia, Péres-Marin *et al.* (2007) observaram reduções nos grãos e palhada, pois as árvores com 7 anos de idade exerciam competição. Entretanto, em outro estudo conduzido por Martins *et al.* (2013) houve pouca diferença na produção de biomassa no primeiro ano, talvez em virtude do pequeno tamanho das mudas das espécies arbóreas, que ainda não competiam com as anuais, além do alto acúmulo de precipitação pluvial que não evidenciou a competição das plantas por água. Desse modo, a produção de grãos no SAF parece ser promissora nos primeiros anos de implantação do mesmo, e para o sucesso na perpetuação na produção de grãos nas entrelinhas dos SAF's é necessário se atentar a oferta de radiação

solar ao longo do envelhecimento das árvores e as condições meteorológicas do local.

Vale destacar que pode haver benefícios associados ao longo do tempo de cultivo, inclusive com aumento da produtividade no SAF se houver a incorporação de biomassa das árvores no local (Péres-Marin *et al.*, 2007) e isso pode gerar produção cumulativa ao longo dos anos (Kermah *et al.*, 2018). Ainda que a produtividade individual da espécie seja menor em comparação a áreas sem árvores, considerando que ainda pode ser extraído e contabilizado madeira e frutas do local, o potencial do SAF não pode ser subestimado. Além disso, a redução na produtividade média dos arranjos consorciados de plantas da safra 2022/23 em relação à anterior foi de 150,7 kg ha⁻¹ no SAF e de 375,5 kg ha⁻¹ no PS para o milho, e de 439,6 kg ha⁻¹ no SAF e de 677,6 kg ha⁻¹ no PS para o feijão. Nota-se que a redução de produtividade no SAF em um ano com intenso déficit hídrico (111 mm, safra 2022/23) foi menor do que no PS, podendo indicar estabilidade de produção. O agricultor pode estar interessado em uma produtividade estável ao invés de uma oscilação produtiva (Nassary *et al.*, 2020). Ainda, o aumento nas variações de disponibilidade hídrica em virtude das alterações climáticas (Masson-Delmotte *et al.*, 2018) pode indicar o uso de agroecossistemas mais complexos como as agroflorestas em busca de atenuar as flutuações. No entanto, quando é considerado apenas o cultivo solteiro dentro e fora do SAF a produtividade do milho sofreu redução de 37,9% (366,8 kg ha⁻¹) no SAF e 4,8% (97,3 kg ha⁻¹) no PS e o feijão de 64,6% (1189,2 kg ha⁻¹) no SAF e 44,0% (1311,0 kg ha⁻¹) no PS, portanto, em cultivo solteiro a estabilidade produtiva pode ser maior no PS em um ano de intenso déficit hídrico em virtude ao menor nível de competição de espécies por água.

O milho solteiro nos dois ambientes em 2021/22 apresentou produtividade inferior à média do estado do Rio Grande do Sul (RS), que foi de 3520 kg ha⁻¹ (CONAB, 2023), possivelmente em virtude do déficit hídrico na safra, inclusive durante ao pendoamento do milho (Figura 16C) que é a fase crítica da planta, diminuindo sua produção e limitando a formação da espiga (Silva *et al.*, 2021). A restrição hídrica local foi ainda mais intensificada na safra 2022/23 reduzindo ainda mais a produtividade do milho solteiro no SAF em comparação a média de 4962 kg ha⁻¹ estimados para o estado (CONAB, 2023). Assim, mesmo considerando essas adversidades, a produção de milho nas

linhas centrais da entrelinha das árvores nesse SAF consolidado não se demonstrou profícua. Não obstante, ao se analisar o valor da produtividade das plantas de feijão cultivadas em arranjo de plantas solteiro, em 2021/22 o SAF apresentou a média de 1841,2 kg ha⁻¹, valor superior à média do RS na mesma safra que foi de 1079,0 kg ha⁻¹ (CONAB, 2023) para feijão preto de 1ª safra, demonstrando a capacidade de um SAF de 10 anos em produzir grãos sob sistema solteiro nas linhas centrais da entrelinha das árvores. Além disso, ressalta-se a produtividade de 2978,6 kg ha⁻¹ no PS em cultivo solteiro e orgânico, superior à média do estado, destacando o potencial produtivo dessa cultivar no sistema orgânico. Em 2022/23 a média estimada para o estado foi de 958 kg ha⁻¹ (CONAB, 2023), valor superior ao obtido com o feijão solteiro no SAF (652,1 kg ha⁻¹), porém, inferior ao solteiro do PS (1667,6 kg ha⁻¹), reafirmando o potencial produtivo da cultivar BRS Paisano sob sistema orgânico, mesmo sob intenso déficit hídrico.

Outro resultado a se destacar foi que a média da produtividade do feijão solteiro no SAF alcançou valor de 82,4% maior em 2021/22 e 33,0% em 2022/23, em comparação ao valor médio do feijão consorciado com milho no PS. Esses resultados podem sugerir que a espécie consegue competir melhor por água, nutrientes e luz com as árvores do que com o milho. Embora, dados da literatura apontam que exista competição das raízes das florestais com os cultivos anuais, e que a capacidade competitiva da florestal é muito maior, variando conforme a idade e densidade de plantio (Duan *et al.*, 2017; Zhang *et al.*, 2019). Outra possível hipótese é de que o feijão sombreado apresenta menores perdas energéticas por fotorrespiração (Taiz; Zeiger, 2013; Sgarbossa *et al.*, 2020), e por isso o solteiro no SAF pode ter superado o consórcio no PS.

As avaliações da eficiência biológica dos arranjos de plantas nos ambientes, referentes ao uso eficiente da terra (UET) demonstraram que em 2021/22 no PS houve ganho de produtividade em todos os consórcios, com ganhos de 4% a 123% em relação ao monocultivo (Tabela 12), enquanto que no SAF ocorreu ganho de 38% a 97% nos consórcios 2:2 'BRS 015FB' e 1:1 'BRS 015FB' em relação ao cultivo solteiro. Em 2022/23 sob intenso déficit hídrico, apenas o 1:1 'BRS 015FB' apresentou ganho de 12% no PS, enquanto que no SAF todos os arranjos de plantas apresentaram vantagens, de 31 a 174%.

Tabela 12 - Uso eficiente da terra (UET) e coeficiente equivalente da terra (CET) quatro arranjos de plantas de milho e feijão cultivados a pleno sol e em sistema agroflorestal por duas safras consecutivas, 2021/2022 e 2022/2023, em Pelotas, RS.

Arranjos	UET	UET Parcial		CET	UE T	UET Parcial		CET
		Milho	Feijão			Milho	Feijão	
		2021/2022				2022/2023		
Pleno Sol								
1:1 TL	1,90	1,63	0,28	0,39	0,99	0,68	0,31	0,22
1:1 FB	2,06	1,7	0,37	0,5	1,12	0,73	0,39	0,29
2:2 TL	2,23	1,79	0,44	1,15	0,83	0,53	0,29	0,14
2:2 FB	1,04	0,73	0,31	0,23	0,91	0,65	0,26	0,17
Média	1,81	1,46	0,35	0,57	0,96	0,65	0,31	0,20
Sistema Agroflorestal								
1:1 TL	0,65	0,5	0,15	0,07	1,31	0,92	0,38	0,37
1:1 FB	1,97	1,73	0,24	0,4	2,74	2,44	0,31	0,75
2:2 TL	0,79	0,56	0,23	0,13	1,7	1,42	0,28	0,51
2:2 FB	1,38	1,04	0,34	0,31	2,13	1,81	0,32	0,91
Média	1,20	0,96	0,24	0,23	1,97	1,65	0,32	0,64

Fonte: Elaborada pela autora.

Em concomitância aos dados de crescimento e de produção o UET demonstrou que os consórcios apresentam maior produção com menor área em comparação ao monocultivo para os dois ambientes, SAF e PS. Essa vantagem foi mais evidente no PS em 2021/22, enquanto que em 2022/23 sob intenso déficit hídrico, foi mais evidente no SAF, sugerindo que sob condições de forte restrição hídrica, o uso de consórcios de grãos no SAF pode apresentar uso mais eficiente da terra. Além disso, na análise dos dados apresentados na Tabela 12, destaca-se que a vantagem do consórcio em termos de UET ocorre em função do ganho proporcionado pelo milho, pois o feijão não apresentou ganho nos consórcios, assim como observado por Nassary *et al.* (2020), destacando novamente que a alta produtividade do feijão é obtida sob cultivo solteiro, devido ao menor potencial competitivo da espécie contra o milho. Isso também foi observado na mamona em comparação ao seu consórcio com gergelim, algodão, milho e feijão caupi (Pinto *et al.*, 2011). Importante ressaltar que independente da safra, os valores de UET ultrapassaram aos encontrados na literatura. Os autores Mahallati *et al.* (2015) ao estudarem o consórcio milho e feijão obtiveram valores de UET de 1,39 e 1,37, ou seja, mesmo que os monocultivos produzam mais, a produtividade total da terra foi melhorada, pois

39% e 37% a mais de terra seriam necessários para que o monocultivo apresentasse o mesmo rendimento do consórcio. Na Tanzânia, Nassary *et al.* (2020) encontraram valores de 1,48 e 1,55. Na China Duan *et al.* (2017) avaliando consórcio de uma noqueira (*Juglans regia* L.) com trigo obtiveram valor de 1,62. Avaliando a consorciação de jujubas (*Ziziphus jujuba*) com algodão Zhang *et al.* (2019) obtiveram valor máximo de 1,36.

Assim como observado pelo UET, os dados do índice CET indicam que a recomendação de cultivo depende da intensidade do déficit hídrico previsto para a safra. Na safra 2021/222 no PS os consórcios 1:1 'BRS 019TL', 1:1 'BRS 015FB' e 2:2 'BRS 019TL', e no SAF os consórcios 1:1 'BRS 015FB' e 2:2 'BRS 015FB' apresentaram complementariedade competitiva entre as espécies, pois o CET foi superior a 0,25, enquanto que na safra 2022/23 todos os arranjos de plantas apresentaram complementariedade competitiva no SAF e no PS apenas o 1:1 'BRS 015FB'. Em 2021/22 a maioria dos consórcios foram viáveis no PS, enquanto que no SAF, apenas os consórcios com a cultivar BRS 015FB. Em 2022/23 no PS, apenas o consórcio 1:1 'BRS 015FB' foi viável, e no SAF todos os consórcios apresentam vantagens competitivas com qualquer uma das cultivares de milho. Em termos gerais a cultivar BRS 015FB se mostrou mais vantajosa do que a 'BRS 019TL' para o SAF. Além disso, em anos com estiagens severas o consórcio de milho e feijão é aconselhável no SAF, desde que o objetivo seja na produção de milho, pois não havendo diferença significativa entre os arranjos (Tabela 10), há uma produção extra de feijão. Entretanto, se o objetivo for produzir feijão, a recomendação é o cultivo em solteiro, pois com base nos valores obtidos pelo UET (Tabela 12), independente da safra e seu déficit hídrico, do arranjo de plantas e do sistema de cultivo, o cultivo do feijão é mais eficiente quando cultivado solteiro. De acordo com Coelho *et al.* (2014), o feijão caupi consegue um crescimento efetivo quando a RFA está em torno de 50 e 30% da radiação solar plena, proporcionando maior eficiência quântica e química no processo fotossintético.

Importante salientar a necessidade de manejo em um SAF consolidado, com o uso do manejo de poda, ou até mesmo, exclusão de algumas linhas de árvores para possibilitar a maior entrada e radiação solar, e assim, a permanência na produção de grãos nas entrelinhas. Em estudo em SAF para produção de cana de açúcar, Elli *et al.* (2016) observaram que o sistema em

faixas espaçadas a 12 m das linhas das árvores apresentou maiores valores para as variáveis produtivas em comparação ao espaçamento de 6 m das linhas arbóreas. Os autores destacam que a proximidade das plantas cultivadas com as árvores pode intensificar a competição e prejudicar as mesmas. No presente estudo as linhas das árvores possuem distância de 5 m, o que pode ter sido fator limitante ao crescimento e produção das graníferas.

Aliado ao manejo do SAF, a escolha correta das plantas a serem cultivadas também é crucial. Vários estudos apontaram maior crescimento vegetativo das plantas sombreadas no SAF como azevém por Schmidt *et al.* (2017), cana de açúcar por Elli *et al.* (2016), e na atual pesquisa isso também foi observado no milho e no feijão. Isso pode sugerir que o ambiente sombreado pode ser propício a produção de espécies em que se deseja crescimento vegetativo ao invés de reprodutivo, como no caso de pastagens, chás e hortaliças folhosas, podendo ser um nicho de pesquisa. A pesquisa buscou fornecer alternativas sustentáveis de intensificação da área produtiva, em concomitância ao aumento da biodiversidade aliada a preservação dos agroecossistemas.

5.4. Conclusões

Nas condições experimentais consideradas, um sistema agroflorestal consolidado atenua em até 33% da radiação solar no seu interior, sendo que essa menor transmissividade de radiação solar no sistema agroflorestal resulta em plantas de milho e de feijão maiores em estatura e área foliar e com produtividades inferiores em comparação ao cultivo a pleno sol. Em cultivo a pleno sol e em sistema agroflorestal a produtividade do milho não é reduzida sob consórcio com o feijão, embora a competição com o milho reduz a produção do feijão. Sob restrição hídrica os consórcios de milho e de feijão apresentam uso mais eficiente da terra no sistema agroflorestal do que a pleno sol. A cultivar de milho 'BRS 019TL' apresenta maior produção de grãos do que a 'BRS 015FB'

6. CAPÍTULO 3 – MILHO E FEIJÃO EM SISTEMA AGROFLORESTAL: CRESCIMENTO, PRODUÇÃO E EFICIÊNCIA DA INTERCEPTAÇÃO DA RADIAÇÃO SOLAR

6.1. Introdução

O equilíbrio entre produzir alimento aliado a preservação dos agroecossistemas é um desafio, e entre as técnicas de manejo disponíveis, se destaca o uso de sistemas agroflorestais (SAF's) (Duffy *et al.*, 2021). Nos SAF's o uso da terra é consorciado entre culturas e/ou animais em conjunto às árvores, em diversas possibilidades de arranjos no espaço e no tempo. Nesse sistema a técnica de manejo referente a transição agroflorestal utilizada vai ao encontro do nível tecnológico e objetivo do agricultor (Ollinah; Kröger, 2021).

O uso intensivo da área de forma sustentável é interessante principalmente a agricultores familiares, detentores de pouca área de terra, e nesse setor, os consórcios apresentam maior eficiência no uso da terra com maior produção em menor área em comparação ao monocultivo (Nassary *et al.*, 2020). Entre as práticas agrícolas, a agrofloresta é uma opção inteligente para alcançar a segurança alimentar e mitigar as consequências das mudanças climáticas (Duffy *et al.*, 2021). Nesse caso, a inserção de grãos é uma estratégia interessante para alcançar a soberania e segurança alimentar e nutricional da população. Entre as graníferas, se destacam o milho e o feijão, ambos com grande variabilidade de adaptação a diversas condições de cultivos, sendo o milho uma excelente fonte energética para alimentação humana e animal, com teor de carboidrato de até 75% (Santos *et al.*, 2018), e o feijão com até 25% de proteína vegetal, além de minerais (Celmeli *et al.*, 2018).

O cultivo de milho e de feijão em SAF é relatado em diversos países tropicais (Yang *et al.*, 2016; Smethursta *et al.*, 2017; Magalhaes *et al.* 2019; Nassary *et al.*, 2020; Sgarbossa *et al.*, 2020; Baier *et al.*, 2023; Casanova-Lugo *et al.*, 2023). Pressupõe-se interações dinâmicas e mudanças ao longo do tempo em uma agrofloresta, principalmente em virtude das espécies arbóreas, seus

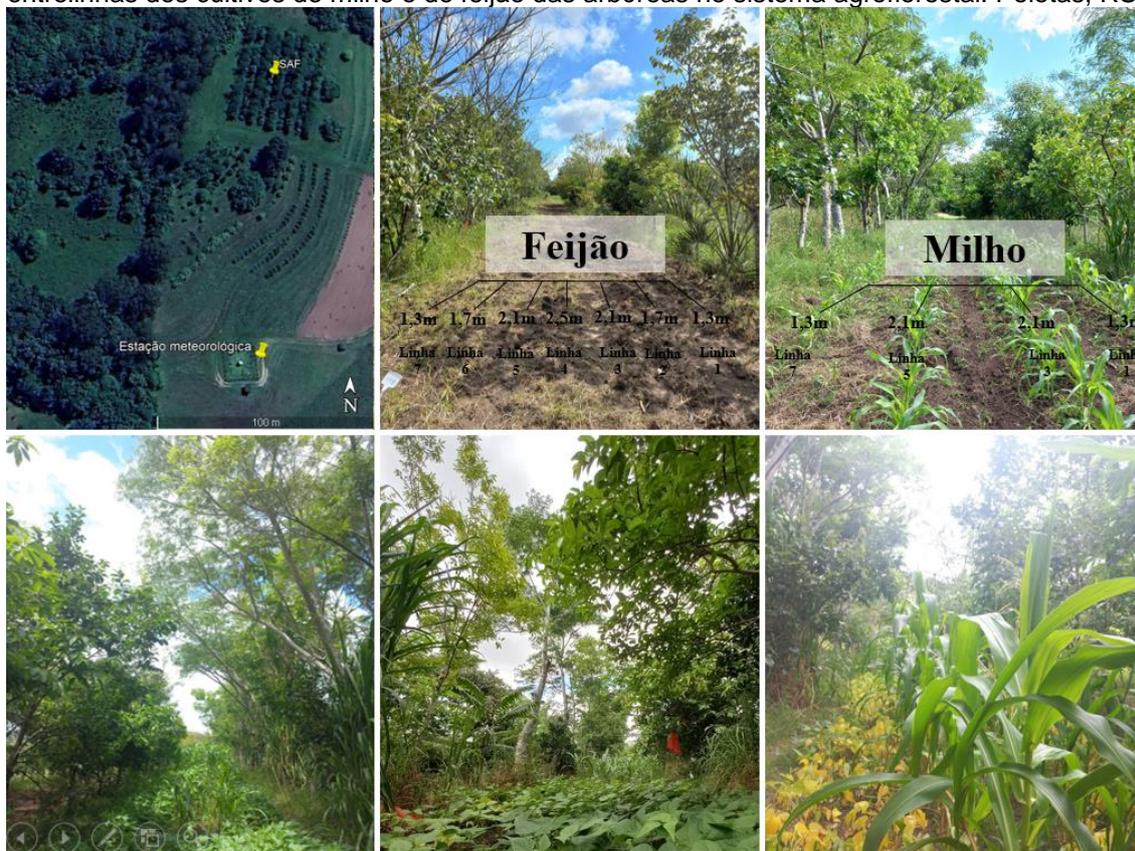
hábitos caducifólios ou perenes, crescimento em altura e emissão de ramos laterais. Para o sucesso da produção de grãos nesse sistema produtivo é necessária oferta de radiação solar em quantidade e qualidade suficiente, pois sua oferta limitada é relacionada a menor produção (Yang *et al.*, 2021b). Para isso, a poda é uma técnica que visa aumentar a permeabilidade de radiação solar no sub-bosque e ciclagem de nutrientes, fornecendo maior potencial produtivo para as culturas (Baier *et al.*, 2023), além de madeira se esta não for incorporada ao solo.

A falta de conhecimento técnico e científico pode ser um dos fatores limitantes para o avanço desse sistema integrado. Produção de grãos em SAF's nos seus anos iniciais é viável e já foi comprovado pela literatura (Dartora *et al.*, 2022). Entretanto, o limite de idade em que as entrelinhas de uma agrofloresta ainda são produtivas são dados escassos. O sombreamento excessivo causado pelas copas das arbóreas e a competição por água e nutrientes podem impedir a viabilidade da produção de grãos nas entrelinhas a longo prazo (Pezzopane *et al.*, 2020). Buscando contribuir para o preenchimento dessa lacuna de conhecimento, esse trabalho buscou responder sobre a viabilidade de produção de grãos de verão em um SAF consolidado na região sob clima subtropical. Dessa forma, os objetivos dessa pesquisa foram (i) determinar a disponibilidade de radiação solar, coeficiente de extinção e eficiência da interceptação da radiação solar do milho e do feijão; (ii) quantificar o déficit de precipitação pluvial das duas safras e (iii) determinar o crescimento e produção de milho e de feijão sob níveis de sombreamento na entrelinha de um sistema agroflorestal. As hipóteses da pesquisa foram de que (i) nas linhas centrais do SAF haveria maior disponibilidade de radiação solar, resultando em maior produção das plantas, (ii) nas linhas próximas as arbóreas haveria menor disponibilidade de radiação solar resultando em maior crescimento e menor produção das plantas, (iii) o feijão apresenta maior coeficiente de extinção do que o milho e de que (iv) o milho possui maior eficiência da interceptação da radiação solar do que o feijão.

6.2. Material e métodos

Cultivos com milho e feijão foram conduzidos em área sob sistema agroflorestal (SAF), localizada na Estação Experimental Cascata (31°37'S, 52°31'W, 173 m) da Embrapa Clima Temperado, em dois anos agrícolas 2021/22 e 2022/23. O sistema agroflorestal (SAF), implantado no ano de 2013, é composto por 6 espécies frutíferas intercaladas com 8 espécies florestais na mesma linha, cultivadas no alinhamento NNE-SSO e espaçadas a 5 m entre fileiras (Figura 17). As linhas de cultivo de distanciamento variaram de 1,3 m, 1,7 m, 2,1 m e 2,5 m em relação a cada linha arbórea, assim as linhas de cultivo foram denominadas de 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7 para o feijão solteiro e de 1, 3, 5 e 7 para o milho solteiro. Importante destacar que a projeção da copa foi desuniforme por não haver a condução ao longo do crescimento das árvores por meio de podas regulares, gerando plantas que cresceram livremente e por consequência, as projeções das copas se sobrepõem com ampla expansão sobre as entre linhas.

Figura 17 - Imagens da localização do experimento e representação do distanciamento das entrelinhas dos cultivos de milho e de feijão das arbóreas no sistema agroflorestal. Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

As estaturas das espécies em 2022/23 foram de 6,0 m na noqueira pecã (*Carya illinoensis* (Wangenh.) K. Koch), 3,2 m no caqui (*Diospyros kaki* L.), 2,5 m na tangerina (*Citrus bergamia* R.), 3,4 m na laranja (*Citrus sinensis* L.), 4,3 m na goiaba (*Psidium guajava* L.), 2,1 m no butiá (*Butia* sp), 5,4 m na trema (*Trema micrantha* (L.) Blum), 5,4 m no pêssgo do mato (*Prunus myrtifolia* L.), 9,1 m na timbaúva (*Enterolobium contortisiliquum* (Vell.) Morong), 4,9 m na guajuvira (*Patagonula americana* L.), 5,5 m no açoita cavalo (*Luehea divaricata* Mart.), 5,4 m no louro pardo (*Cordia trichotoma* (Vellozo) Arrabida ex Steudel), 4,9 m no cedro (*Cedrela fissilis* Vell.) e 8,2 m na canafístula (*Peltophorum dubium* (Sprengel) Taubert). As espécies do lado da linha 1 são combinadas entre frutíferas e espécies de maior estatura, como noqueira-pecã, timbaúva e canafístula, resultando em maiores projeções de copa, enquanto que do lado da linha 7, além de frutíferas havia a intercalação com florestais de menor estatura, como louro pardo, guajuvira e açoita cavalo, com menor projeção de copa.

No manejo do SAF, em 2021/22, foi realizada uma poda de limpeza, apenas para retirar os galhos em extrato baixo e médio nas entrelinhas, enquanto que em 2022/23 foi realizado uma poda drástica afim de permitir maior entrada de radiação solar para os cultivos anuais. Para o controle de plantas espontâneas, foram realizadas capinas manuais, e na safra 2022/23 foi aplicado *Bacillus thuringiensis* para controle da lagarta do cartucho no milho. Para adubação, foi colocado esterco de peru peletizado na dose de 800 g linha⁻¹ de base no feijão e no milho, e 800 g linha⁻¹ em cobertura sementeira a somente no milho conforme a recomendação técnica (CQFS-RS/SC, 2016).

As sementeiras ocorreram em 08/10/2021 e 14/10/2022, com ressemeadura para obter o estande planejado de plantas, e as emergências, consideradas quando houve mais de 50% das plântulas do estande emergidas, ocorreram em 23/10/21 e 24/10/22, respectivamente. As colheitas foram realizadas no primeiro experimento nas datas 13/01/22 e 17/03/22, totalizando um ciclo da emergência a colheita de 82 e 145 para o feijão e milho, respectivamente, e no último experimento, colhidas nas datas 23/01/23 e 15/03/23, totalizando um ciclo de 91 e 142 dias para o feijão e milho respectivamente. Foram utilizadas as cultivares de milho BRS 019TL e a BRS 015FB, escolhidas por apresentarem características distintas quanto a rusticidade, diferentes estatura e propósitos de uso (Schiedeck *et al.*, 2021),

sendo a 'BRS 019TL' produzida preferencialmente para grão e a 'BRS 015FB' utilizada na produção de farinha, pois possui pericarpo branco. A cultivar de feijão utilizada foi a cultivar BRS Paisano, pertencente ao grupo de grãos pretos, preferencialmente produzido no sul do Brasil (CONAB, 2023).

Os experimentos foram conduzidos em delineamento de blocos ao acaso com 3 repetições em 2021/22 e 4 repetições em 2022/23. O feijão foi avaliado sendo um experimento monofatorial (7 distâncias das árvores: 1,3 m; 1,7 m; 2,1 m; 2,5 m central; 2,1m; 1,7m e 1,3 m, correspondentes as linhas de cultivo 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7) e o milho em fatorial 2x4 (duas cultivares e 4 distâncias das árvores: 1,3 m; 2,1 m; 2,1m e 1,3 m, correspondentes as linhas de cultivo 1, 3, 5 e 7) (Figura 17). Cada unidade experimental mediu 15 m² (3 x 5 m). O espaçamento dos cultivos foi de 0,8 m entre linhas e 0,25 m entre plantas para o milho, totalizando 5 sementes por metro linear, e de 0,4 m entre linhas e 0,1 m entre plantas para o feijão, totalizando 10 sementes por metro linear.

As condições meteorológicas foram caracterizadas a partir de dados coletados em duas estações meteorológicas automáticas (EMA). Na EMA₁, localizada a 110 m da área experimental, foram coletados dados referentes a radiação solar global e precipitação pluvial. Na EMA₂, instalada no interior do SAF, foram obtidos dados de temperatura do ar (°C) e radiação fotossinteticamente ativa (MJ m² dia⁻¹). A radiação solar no SAF em 2021/22 foi estimada a partir de coeficientes mensais determinados por meio da relação de radiação solar no SAF e externa em 2022/23. A evapotranspiração de referência (ET_o) foi calculada pelo método de Jensen Haise modificado para Pelotas-RS (Hallal *et al.*, 2014), agregando-se os valores diários para um intervalo de cinco dias e, a partir desta, a evapotranspiração da cultura (ET_c), com valores de coeficiente de cultivo (K_c) variável para o milho e para o feijão (Allen *et al.*, 2006). A partir da diferença entre precipitação pluvial e ET_c, obteve-se o déficit de precipitação em cada período de cinco dias.

A radiação solar global (R_s, em W m⁻²) foi medida nas diferentes distâncias de cultivo das arbóreas do SAF, com 3 repetições, com um piranômetro portátil (Li-Cor, modelo LI-185B). Também foi coletada a R_s em área próxima para obter a quantidade de R_s que atinge o SAF. A medição da R_s foi realizada próximo a passagem meridiana do Sol, ao meio-dia, quando o ângulo horário (h) é de 0°, e o intervalo entre 11 horas (h = -15°) e 13 horas (h = 15°),

nos dias 08/12/2021 e 14/12/2022, quando as plantas de feijão estavam na floração (R6), e nos dias 11/01/2022 e 19/01/2023, quando as plantas de milho estavam no pendoamento (VT). Esses estádios fenológicos foram escolhidos por serem as fases críticas à produção de grãos das culturas, comumente estudada na literatura (Pias *et al.*, 2017; Pohlmann *et al.*, 2022a) e também porque no início da fase reprodutiva, o crescimento e a área foliar da planta estão estabelecidas. As datas 11/01/22 e 14/12/22 foram dias ensolaradas, enquanto que os dias 8/12/21 e 19/1/23 dias nublados.

A radiação solar global foi convertida para radiação fotossinteticamente ativa (RFA, em $W\ m^{-2}$), considerando o índice de conversão de 45% (Assis; Mendez, 1989), e esses valores foram utilizados para calcular o coeficiente de extinção (k) nos dias do florescimento para cada espécie, 11/01/2022 e 19/01/23 para o milho e 08/12/21 e 14/12/22 para o feijão, conforme equação de Cunha; Volpe (2010):

$$k = -\frac{\ln\left(\frac{RFAt}{RFAI}\right)}{IAF} \quad (20)$$

onde RFAt e RFAI são valores de radiação fotossinteticamente ativa transmitida abaixo do dossel da planta de milho e de feijão e a incidente acima do dossel, respectivamente. IAF é o índice de área foliar, obtido com a divisão entre a área foliar da planta ($m^2\ planta^{-1}$) e a área ocupada pela planta (m^2),

A eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa ($\epsilon\ int$) foi calculada conforme descrito por Bergamaschi; Bergonci (2017):

$$\epsilon\ int = \frac{RFA\ int}{RFA\ i} \quad (21)$$

$$RFint = \frac{RFAplanta}{RFAso\ lo} \quad (22)$$

onde RFAint é a radiação fotossinteticamente ativa interceptada pelo milho ou pelo feijão (RFA planta) e a que é transmitida por estas, medidas ao nível do solo (RFA solo); e RFAi a incidente acima do dossel.

Para determinação do crescimento foram realizadas avaliações fenométricas, com 3 repetições por distância das árvores, durante as fases R6 do feijão (Fernandez; Geptz; Lopes, 1986) e VT do milho (Ritchie; Hanway; Benson, 1993), referentes a estatura (cm), número de nós, diâmetro do colmo do milho e da haste do feijão (mm) e área foliar ($\text{cm}^2 \text{ planta}^{-1}$). A área foliar foi determinada a partir do somatório do produto das medidas lineares (comprimento (C) e largura (L)) de todas as folhas do milho, e de todos os comprimentos dos folíolos centrais dos trifólios do feijão, conforme a equação utilizada para o milho, número 23 (Montgomery, 1911) e do feijão a de número 24 (Pohlmann *et al.*, 2021):

$$AF: \sum_{n^{\circ}\text{folhas}} 0,75 CL \quad (23)$$

$$AF = \sum_{n^{\circ}\text{folíolos centrais}} 1,092 C^{1,945} \quad (24)$$

No final do ciclo foram colhidas todas as plantas de cada linha de cultivo para a determinação individual da produtividade e, ainda, em cinco plantas de cada linha foram avaliados os componentes de rendimento. Os componentes de rendimento avaliados foram: número de vagens granadas, grãos por vagem e grãos por planta para o feijão, grãos por espiga, comprimento e diâmetro das espigas para o milho, além da produção por planta e produtividade estimada para ambas as culturas. O peso da produção de grãos foi ajustado para 13% de umidade, conforme umidade medida em cada unidade experimental com auxílio de um analisador de umidade (Gehaka Agri/ G650).

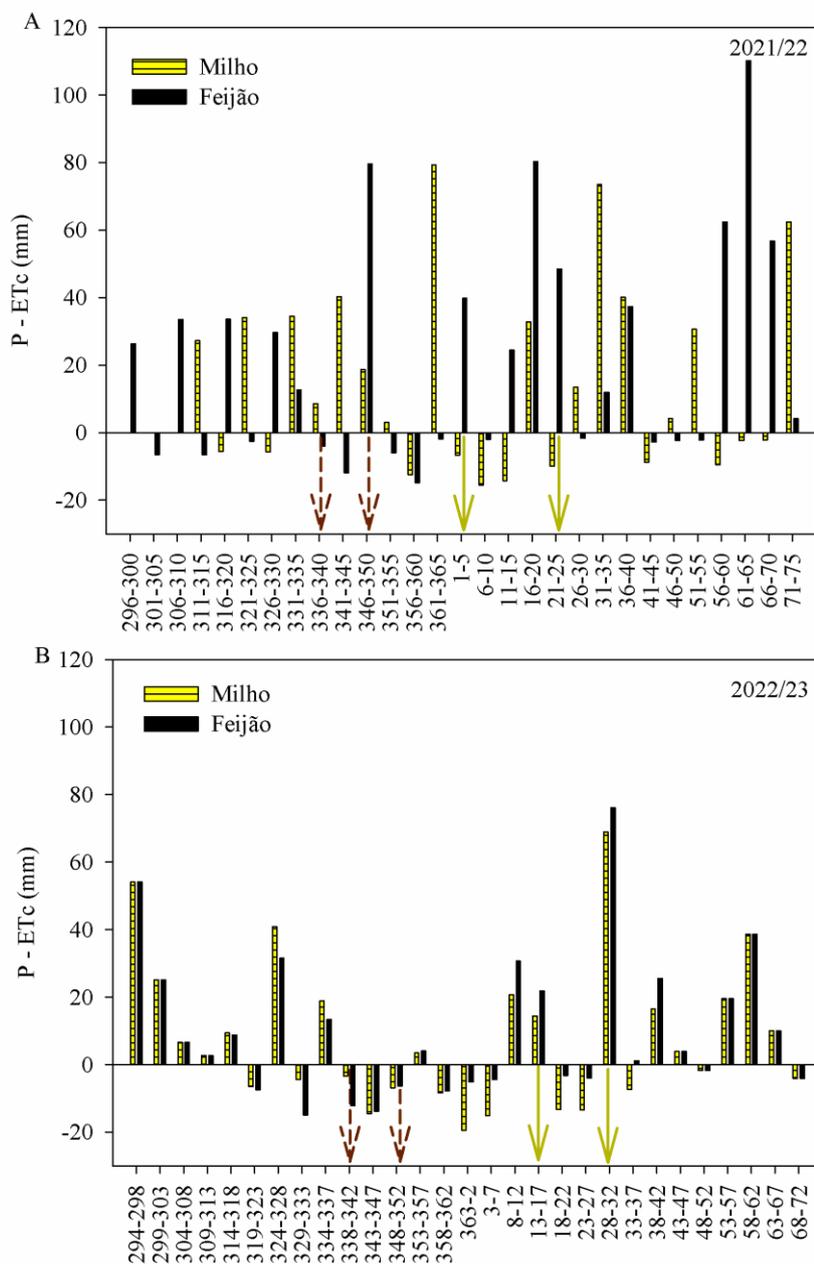
Os dados obtidos foram analisados quanto ao atendimento aos pressupostos do modelo matemático, de normalidade do erro experimental por meio do teste Shapiro Wilk, e de homogeneidade das variâncias com o teste Oneillmathews. Quando não atendidos, os dados foram transformados por BoxCox por meio do software Action. Os dados foram analisados pelo teste de variância, e quando significativos, suas médias foram distinguidas pelo teste Tukey a 0,05 de probabilidade do erro pelo software R (R Core Team, 2020).

6.3. Resultados e discussão

Nas duas safras de condução da pesquisa ocorreram períodos de estiagens (Figura 18). Na safra 2021/22, no período de 82 dias do ciclo de desenvolvimento do feijão foi verificado déficit de precipitação (diferença entre a precipitação pluvial e evapotranspiração do cultivo) de 65 mm (Figura 18A) enquanto nos 145 dias do ciclo do milho ocorreu déficit de precipitação de 93 mm (Figura 18A). Na safra 2022/23 durante o ciclo de desenvolvimento do feijão (91 dias) e do milho (142 dias) foram observados déficit de precipitação de 85 mm (Figura 18B) e de 118 mm (Figura 18C), respectivamente.

Assim, o déficit de precipitação foi mais severo na safra de 2022/23, com acumulado de 32 mm durante a floração do feijão superando os 16 mm observados na safra 2021/22, e essa fase é considerada como crítica para o feijão por comprometer a produtividade (Miorini; Saad; Menegale, 2011; Jacinto Junior; Lucena, 2022; Pohlmann *et al.* 2022a). O mesmo ocorreu com o milho durante a fase crítica de pendoamento, VT, quando foi observado déficit de precipitação acumulado de 27 mm na safra 2022/23 e 10 mm em 2021/22. Além disso, como é possível verificar na Figura 18B, na safra 2022/23 o milho sofreu com a estiagem desde o estágio V3, que compreende a 3 folhas totalmente expandidas, até o enchimento de grãos, fases críticas ao desenvolvimento e produção de grãos (Pias *et al.*, 2017), e por isso pode ser considerado um ano agrícola de estiagem prolongada, já que por um longo período não houve reposição de água pela chuva.

Figura 18 - Diferença entre a precipitação pluvial e evapotranspiração de cultivo (P-ETc) para o milho e feijão na safra 2021/2022 (A) e safra 2022/2023 (B) cultivados em Sistema Agroflorestal. Pelotas, RS.



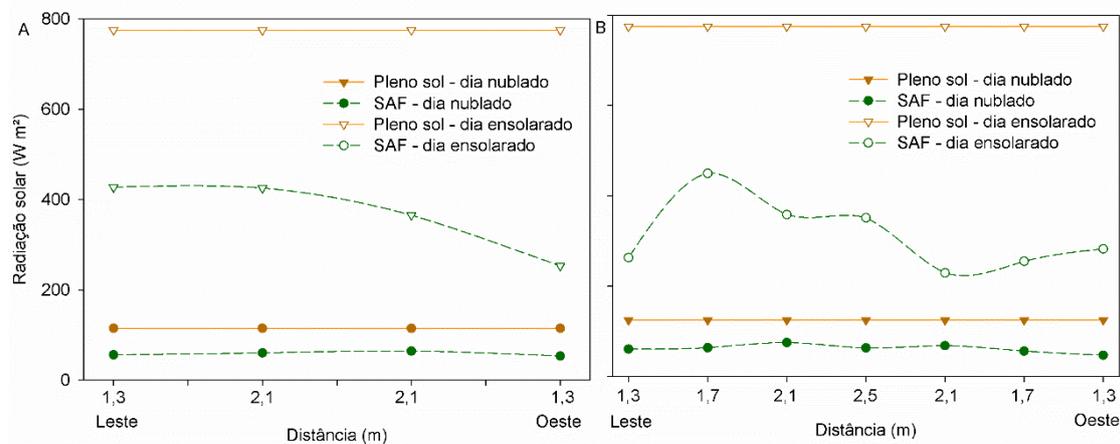
Setas sólidas indicam pendoamento (VT) do milho e pontilhadas indicam a floração (R6) do feijão.

Fonte: Elaborada pela autora.

A comparação dos valores instantâneos de radiação solar global (R_s) em áreas do SAF e a pleno sol (externo ao SAF), demonstra uma grande redução da R_s disponível no interior do SAF ao nível do dossel dos cultivos (Figura 19), na ordem de 50,7% para o milho e 54,9% para o feijão, isto em

momentos do dia com menor ângulo zenital ($Z < 20^\circ$). Na Figura 19 é possível observar que para o milho a redução da R_s foi de 44 a 53%, em dia nublado, e de 45 a 67%, em dia ensolarado (Figura 19A). Para o feijão a redução da R_s foi de 40 a 62%, em dia nublado, e de 54 a 70%, em dia ensolarado (Figura 19B). Ainda, percebe-se que no interior do SAF a R_s variou entre as distâncias de cultivos e com a proximidade das arbóreas. As maiores reduções na oferta da radiação solar ocorreram nas linhas 7 devido a sobreposição de sombras das plantas da linha 7 conjuntamente ao sombreamento adjacente da linha 1 que possui a presença das espécies de maior estatura, noqueira-pecã, timbaúva e canafístula, isso ocasiona aumento na densidade de sombreamento sobre a linha 7. Além da diferença entre as espécies perenes, entre as anuais cultivadas foi observada maior variabilidade da R_s sobre o feijão por este estar em extrato ainda mais baixo em relação ao SAF, assim, a fração difusa da R_s poderá sofrer maior espalhamento.

Figura 19 - Radiação solar global em cultivos agroflorestal (SAF) e área a pleno sol em condições de dias nublados e ensolarados no pendoamento do milho (A) e na floração do feijão (B). Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

Com dados horários da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), Paciullo *et al.* (2011) observaram que as árvores causaram atenuação da radiação solar até 15 m de distância das mesmas, principalmente no início da manhã (até 9 h) e final da tarde (a partir das 15 h), em virtude do aumento do ângulo zenital solar (Z). Os autores destacam que a transmissividade do SAF para a radiação solar também depende das condições meteorológicas, sendo

maior em épocas de estresse por déficit hídrico no solo. Em outra pesquisa sobre esse tema, realizada por Nicodemo *et al.* (2016), medindo a radiação solar às distâncias em relação ao SAF de 2,1 m até 23,1 m, com intervalo de 3 m, os autores verificaram que apenas na menor distância (2,1 m) houve redução na disponibilidade da radiação solar, e que independente da distância, os maiores valores foram observados as 11h45min e 12h50min, instantes do dia em que o ângulo zenital é menor. É importante destacar que, na pesquisa conduzida por Nicodemo *et al.* (2016), as árvores de angico-branco (*Anadenanthera colubrina*), canafístula (*Peltophorum dubium*), ipê-felpudo (*Zeyheria tuberculosa*), jequitibá-branco (*Cariniana estrellensis*), e pau-jacaré (*Piptadenia gonoacantha*), mutambo (*Guazuma ulmifolia*) e capixingui (*Croton floribundus*) possuíam apenas três anos de idade, as arbóreas desta pesquisa não são jovens e mesmo assim foi detectada variabilidade no sombreamento na entrelinha, apesar da avaliação ser realizada quando o ângulo horário (h) estava entre -15° e 15° e com baixo valor de Z. Além disso, o crescimento livre proporcionou o prolongamento da copa em direção as entrelinhas, ampliando e sobrepondo o sombreamento causado pela copa das arbóreas. Não obstante, destaca-se a necessidade de serem realizadas medições horárias para o melhor entendimento sobre a oferta energética no interior do SAF. Além disso, o plantio das árvores no sentido leste-oeste permite maior entrada de radiação solar na entrelinha e pode ser favorável para o cultivo de grãos, ao contrário da atual orientação deste SAF no sentido NNE-SSO que resulta em sombreamento de uma linha arbórea sobre outra.

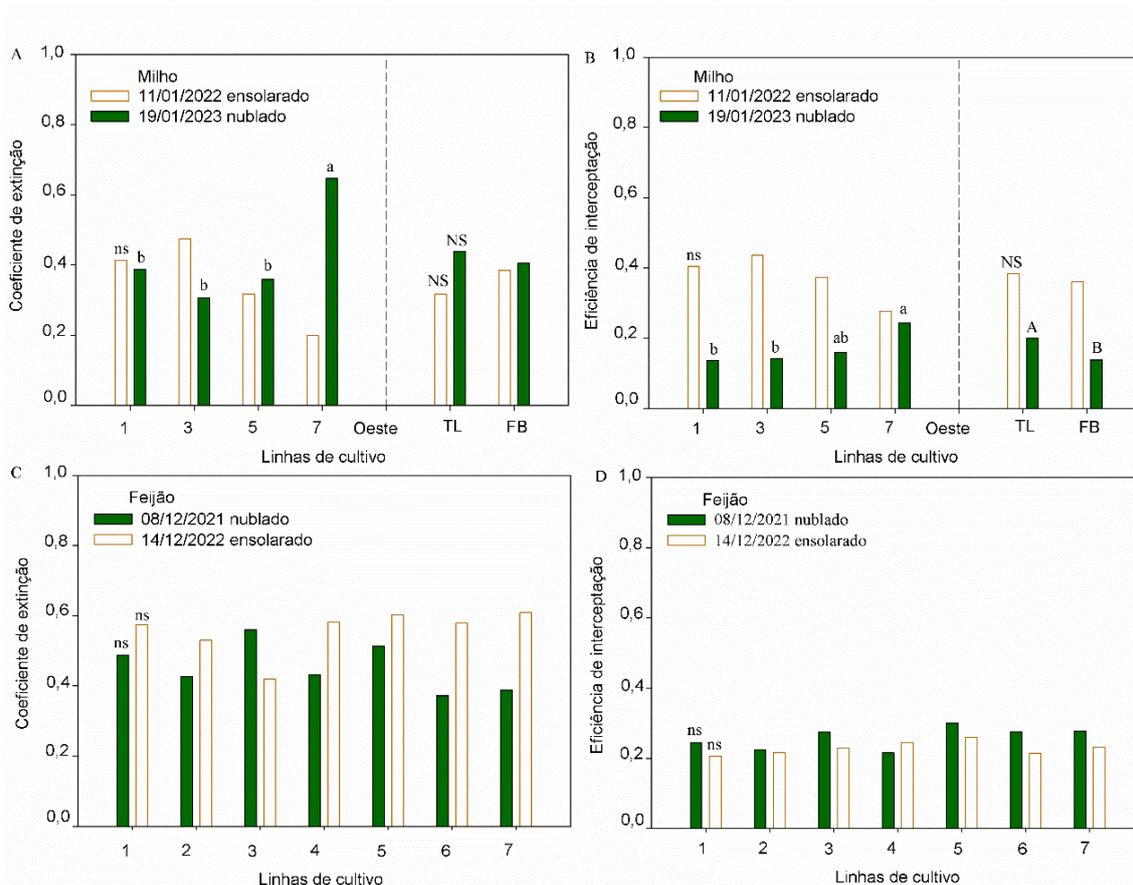
O feijão possui melhor adaptação a ambientes com reduzida disponibilidade de R_s , como em dias nublados ou no interior do SAF, por possuir folhas planófilas, enquanto que o milho, planta com folhas erectófilas, é mais prejudicado (Bergamaschi; Bergonci, 2017). Assim, o feijão pode apresentar vantagens adaptativas em comparação ao milho sob sombreamento. O coeficiente de extinção (k) é um parâmetro da Lei de Beer e indica que quanto maior seu valor, maior a redução exponencial da quantidade de R_s que atravessa cada extrato vegetal do consórcio, podendo variar conforme o índice de área foliar, o qual é afetado pelo déficit hídrico, pois reduz a divisão e expansão celular, resultando em diminuição de tamanho e do número das folhas

(Taiz; Zeiger, 2013), assim como observado para feijão por Pohlmann *et al.* (2022b) e em milho por Langner *et al.* (2022) e por Kunz *et al.* (2007).

Na Figura 20A pode-se observar que o k do milho na fase de pendoamento, cultivado no interior do SAF, não apresentou diferença entre cultivares e entre linhas de cultivo em dia ensolarado (11/01/2022), com k médio de 0,35. Em dia nublado (19/01/23) o valor de k foi maior na linha 7 (0,6), nesse caso, é possível que a poda drástica efetuada nesta safra de 2022/23 tenha contribuído para a variabilidade do k . Esse k de 0,6 para o milho no SAF, encontrado na linha 7, com 1,3 m de distância das árvores, se assemelha ao 0,6 reportado por Ferreira Júnior *et al.* (2014) para cultivos de milho a pleno sol e sem déficit hídrico. Além do sombreamento, o déficit hídrico pode ter influenciado nessa discrepância do k alcançar 0,35, pois de acordo com Müller; Bergamaschi (2005), em plantas não irrigadas de milho não foi possível obter um valor médio para k do milho devido a variabilidade dos dados, atribuída ao enrolamento das folhas durante o déficit hídrico, ocasionando a diminuição da área foliar exposta e aumentando a transmissividade da radiação solar pelo dossel da cultura, enquanto que em plantas irrigadas obteve-se o valor de 0,7. Essa hipótese pode ser confirmada a partir do trabalho de Farré; Facci (2006) que obteve k de 0,37 em milho com déficit hídrico oriundo do enrolamento das folhas e da sua modificação em relação a orientação solar.

O k para o feijão na fase de floração não diferiu entre as linhas de cultivo, sendo possível adotar o valor médio de 0,45 em condições de dias nublados e 0,56 em dias ensolarados (Figura 20C). Isso ocorreu devido a semelhança de área foliar dos feijões cultivados em diferentes espaçamentos (Tabela 14), pois o valor de k , baseado na Lei de Beer, modela a transmissão de fótons pelo dossel, a partir de uma espessura óptica quantificada pela área foliar da planta e sua arquitetura foliar (Bergamaschi; Bergonci, 2017; Shabanov; Gastellu-Etchegorry, 2018). Esses valores são próximos ao observado por Procópio *et al.* (2003) para o feijão 'Pérola' os quais obtiveram valores de k de 0,31 antes do florescimento e 0,59 depois do florescimento. Entretanto, são inferiores aos encontrados para as cultivares 'Pérola' e 'BRS Radiante' de 0,76 por Teixeira; Stone; Heinemann (2015).

Figura 20 - Coeficiente de extinção do milho (A) e do feijão (C) e eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa do milho (B) e do feijão (D) em diferentes linhas de cultivo, correspondentes a distâncias das linhas arbóreas no sistema agroflorestal para dia nublado e dia ensolarado. Cultivares de milho BRS 019TL (TL) e BRS 015FB (FB). Letras minúsculas diferem as distâncias das linhas arbóreas e maiúsculas entre cultivares de milho por Tukey ($p < 0,05$). Ns: não significativo. Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

Em dia ensolarado obteve-se o valor de ϵ_{int} próximo de 0,37 para as duas cultivares de milho, e em dia nublado, a cultivar BRS 019TL apresentou maior eficiência (0,20) do que a cultivar BRS 015FB (0,14) (Figura 20B), possivelmente a maior estatura da 'BRS 019TL' (151,6 cm) e área foliar (3615,6 cm²) tenham contribuído para captar mais radiação difusa presente no SAF em um dia nublado do que a 'BRS 015FB' (Tabela 13). Em dia nublado as menores ϵ_{int} ocorreram nas linhas 1 e 3 com média de 0,14, e o maior na linha 7, de 0,20, enquanto que para dias ensolarados as linhas de cultivo não evidenciaram efeito. Portanto, os valores de milho variaram de 0,14 a 0,37. A amplitude e os valores dos dados foram baixos em comparação aos do estudo conduzido a pleno sol por Kunz *et al.* (2007) com plantas de milho conduzidas sob cultivo convencional,

sem irrigação e com 80 cm de distância entrelinhas, obtendo valores aproximados de ϵ_{int} de 0,18 a 0,78. Os autores estimaram a ϵ_{int} a partir dos dados de índice da área foliar das plantas, o que pode ter gerado maior variabilidade nos dados coletados e assim, alta amplitude de ϵ_{int} observado, diferentemente do trabalho atual que obteve os dados a partir da RFA transmitida pelo dossel. Além disso, a variabilidade do SAF é derivada do seu meio heterogêneo causado pela composição de multi-espécies, enquanto a Lei de Beer, de acordo com Shabanov; Gastellu-Etcheberry (2018) é adequado para meios isotrópicos.

Nas duas safras avaliadas não houve diferença significativa da ϵ_{int} do feijão entre as distâncias em relação ao SAF, sendo possível adotar o valor médio de 0,26 em dias nublados e de 0,24 em dias ensolarados (Figura 20D). Portanto, apesar do feijão apresentar maior k médio de 0,5 (Figura 20C) em relação ao milho com 0,36 (Figura 20A), o feijão apresenta menor ϵ_{int} média (0,2) (Figura 20D) em comparação ao milho (0,3) (Figura 20B). Isso pode ser explicado por que quanto maior a área foliar da planta, maior será a interceptação da radiação solar (Bergamaschi; Bergonci, 2017), e neste caso o milho apresentou área foliar 75,4% acima do feijão (Tabelas 13, 14). O mesmo acontece em ambiente sombreado, onde o IAF precisar ser maior para resultar na mesma ϵ_{int} de um ambiente a pleno sol, como observado em tomates cultivados em área externa e em casa de vegetação por Radin (2002).

A maior ϵ_{int} do milho (planta C4) possibilita maior eficiência fotossintética, principalmente em virtude da evolução do seu metabolismo com maior capacidade de fixação de carbono do que as plantas C3 que os perdem por fotorrespiração, frequente em condições meteorológicas de alta temperatura e déficit hídrico (Taiz; Zeiger, 2013). Entretanto, para o pleno funcionamento enzimático nas plantas do metabolismo C4, a energia solar é crucial, por exemplo, a NADP-malato desidrogenada é ativada na presença da energia solar nas folhas e inativada no sombreamento, a radiação solar promove maior captação do CO_2 no ambiente pela PEPCase (Taiz; Zeiger, 2013). Importante destacar que a menor oferta de radiação solar próximo a linha 7 (Figura 19) contribuiu para o maior k (Figura 20A) e maior ϵ_{int} (Figura 20B) no milho, demonstrado uma possível tentativa de adaptação ao ambiente.

Apesar da menor oferta de Rs nas linhas de cultivo 7 (Figura 19) durante o horário das 12h, as distâncias do milho e do feijão em relação às árvores não afetaram a estatura das plantas, o diâmetro de colmos/hastes, número de nós, a altura de inserção de espigas e a área foliar nas duas safras (Tabelas 13, 14), possivelmente pela maior ϵ_{int} da RFA das plantas cultivadas no lado das árvores na linha 7 (Figura 20), o que pode ser caracterizado como um mecanismo de compensação ou adaptação das plantas ao sombreamento (Taiz; Zeiger, 2013).

Tabela 13 - Estatura, diâmetro do colmo, área foliar e altura da inserção da espiga das cultivares de milho 'BRS 019TL' e 'BRS 015FB' cultivadas em sistema agroflorestal em diferentes linhas de cultivos nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.

Fatores	Estatura (m)		Diâmetro do colmo (cm)		Área foliar (cm ² planta ⁻¹)		Altura da inserção da espiga (m)	
'BRS 019TL'	151,6	A	16,1	A	3615,6	A	96,2	A
'BRS 015FB'	122,9	B	13,1	B	2542,2	B	72,2	B
2021/22	164,0	A	15,8	A	3687,7	A	92,0	A
2022/23	117,2	B	13,7	B	2622,3	B	78,3	B
1	129,0	ns	14,6	ns	2950,4	ns	79,4	ns
3	139,7		14,9		3039,5		84,6	
5	139,8		14,5		3346,4		85,8	
7	140,7		14,3		2979,4		86,9	
C.V. (%)	13,7		14,6		19,9		14,9	

Letras diferentes nas médias diferem para linha de cultivo e cultivar. Ns: não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade de erro pelo teste Tukey.

Fonte: Elaborada pela autora.

Diferentemente do observado nesta pesquisa existem resultados da literatura que apontam maior crescimento do milho com o distanciamento das árvores do SAF, com maior estatura e maior matéria seca no milho por Mendes *et al.* (2013) e maiores estatura e altura da inserção da espiga relatados por Pezzopane *et al.* (2020). As diferenças nos resultados entre os estudos podem derivar dos distintos espaçamentos entre as fileiras das arbóreas que causaram insuficiente variação na oferta de radiação solar (Figura 19). Mendes *et al.* (2013) observaram diferença a partir de 3,0 m e Pezzopane *et al.* (2020) a partir de 3,7 m, enquanto que no atual estudo as linhas de cultivo estiveram mais próximas ao SAF, sendo que a máxima distância possível avaliada foi de 2,1 m. Além

disso, diferenças no tamanho de copa em virtude das distintas espécies arbóreas também podem influenciar esse resultado (Mendes *et al.*, 2013).

Tabela 14 - Estatura, diâmetro da haste, número de nós e área foliar do feijão 'BRS Paisano' cultivado em sistema agroflorestal em diferentes linhas de cultivos nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.

Fatores	Estatura (cm)		Diâmetro da haste (cm)		Número de nós		Área foliar (cm ² planta ⁻¹)	
2021/22	31,4	A	4,5	NS	7,3	A	979,7	A
2022/23	26,6	B	4,1		6,5	B	589,1	B
1	32,0	NS	4,5	NS	7,0	NS	726,7	NS
2	27,1		4,5		6,6		774,9	
3	31,4		4,3		7,2		859,0	
4	24,9		3,9		6,3		639,3	
5	29,4		4,3		6,9		817,2	
6	28,3		4,4		7,0		744,9	
7	28,6		3,9		6,9		733,6	
C.V. (%)	18,5		14,6		12,6		34,9	

Letras diferentes nas médias diferem para linhas de cultivo. Ns: não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade de erro pelo teste Tukey.

Fonte: Elaborada pela autora.

Reduções na estatura, diâmetro da haste, número de nós e área foliar das plantas de feijão com a proximidade das árvores do SAF são frequentemente relatados na literatura, como observado por Zahoor *et al.* (2021) que constataram maior número de ramos no feijão ao distanciamento de 1 m para 2 m das arbóreas de macieira de 11 anos. Os autores destacam que os consórcios com culturas de inverno demonstraram maior potencial em virtude da macieira ser caducifólia e perder suas folhas na dormência, assim, no inverno a disponibilidade de energia radiante e competição por água e nutriente não é um problema limitante, ao contrário dos cultivos de verão. Por outro lado, no Sul do Brasil é improvável o cultivo de milho ou de feijão na estação fria em virtude das baixas temperaturas e geadas. Entretanto, os dados de feijão da pesquisa estão de acordo com observado por Behling *et al.* (2023) com a cultura da soja sob consórcio com eucalipto (plantas com 8 anos e podadas em 5 m de altura aos 69 meses), os quais não constataram diferença quanto às características foliares para as distâncias de 3 a 15 m.

Os maiores valores de estatura, diâmetro do colmo e área foliar para o milho e estatura, número de nós e área foliar do feijão foram obtidos na safra 2021/22 (Tabelas 13, 14), pois o longo período de déficit de precipitação ocorrido

na safra 2022/23 (Figura 18) acarretou menor crescimento das plantas. A altura da inserção da espiga apresentou interação significativa entre os fatores cultivar e safra, sendo a 'BRS 019TL' com maiores valores nas duas safras, enquanto que a 'BRS 015FB' apresentou valor ainda mais reduzido na safra 2022/23, sugerindo ser mais sensível a severos períodos de déficit hídrico no SAF. No entanto, importante destacar que é característica da 'BRS 015FB' apresentar menor estatura, sendo considerada de porte baixo (Eicholz *et al.*, 2021), enquanto que a 'BRS 019TL' é considerada de porte alto (Schiedeck *et al.*, 2021).

Em concomitância aos dados de crescimento do milho, as distâncias das árvores do SAF também não influenciaram significativamente a produção por planta, grãos por espiga, comprimento e diâmetro das espigas (Tabela 15). Avaliando distâncias de 0 a 3 m das árvores, Marin *et al.* (2006) também não constataram diferença na produtividade do milho no primeiro ano de estudo, mas no segundo, houve menor produção na maior distância das árvores. Os autores atribuem essa variação a baixa fertilidade do solo por falta da incorporação no solo da poda para que ocorresse ciclagem de nutrientes, e ao longo do experimento, com o incremento da adubação pode ter resultado em melhor qualidade do solo e proporcionado maior produtividade próxima as árvores no segundo ano.

A literatura aponta maior produção do milho quanto maior for a distância das árvores, na África o consórcio de milho com gliricídia, com maior produtividade a 8 m de distância (Smethurst *et al.*, 2017), e na China uma redução de 35,2% na produtividade do milho a 3,5 m de distância da jujuba, devido a menor umidade do solo e disponibilidade de nutrientes (Yang *et al.*, 2016). Entretanto, os autores destacam que mesmo com menor produção, o consórcio é mais vantajoso se for considerado a rentabilidade das duas espécies.

Tabela 15 - Componentes de rendimento do milho 'BRS 019TL' e 'BRS 015FB' semeado em diferentes linhas de cultivo em sistema agroflorestal nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.

Fatores	Produção por planta (g planta ⁻¹)		Grãos por espiga		Diâmetro da espiga (cm)		Comprimento da espiga (cm)	
'BRS 019TL'	16,9	A	133,5	A	33,7	A	9,2	A
'BRS 015FB'	10,4	B	90,8	B	27,5	B	7,7	B
2021/22	14,4	NS	141,0	A	32,2	A	9,9	A
2022/23	13,1		90,5	B	29,3	B	7,4	B
1	13,3	ns	103,8	ns	30,1	ns	8,3	ns
3	13,2		110,0		30,5		8,4	
5	14,6		119,5		31,1		8,8	
7	13,6		115,3		30,4		8,5	
C.V. (%)	29,4		24,9		13,9		25,2	

Letras diferentes nas médias diferem para linhas de cultivo. Ns: não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade de erro pelo teste Tukey.

Fonte: Elaborada pela autora.

O número de vagens e de grãos por vagens de feijão não evidenciaram efeitos da distância em relação ao SAF, mas essas duas variáveis apresentaram menores desempenhos na safra 2022/23 (Tabela 16). Para produção por planta e número de grãos por planta de feijão houve interação significativa entre os fatores, com superioridade da safra 2021/22 em comparação à 2022/23. Os maiores valores de produção por planta ocorreram da linha 2 até a linha 5, e o menor na linha 7, enquanto que o número de grãos por planta foi maior da linha 3 até a linha 5, e menor nas linhas 1 e 7. Portanto, os maiores valores foram encontrados nas linhas centrais e os menores próximo as árvores.

Outros autores também observaram redução da produção próximo as arbóreas. Em feijão Righi; Bernardes (2008) observaram redução próxima as árvores adultas de seringueiras, entretanto, a menor distância avaliada foi de 3,2 m. O mesmo foi observado por Zahoor *et al.* (2021) em consorciação com macieiras de 11 anos, com menores valores para os componentes de rendimento a 1 m das árvores em relação a 2 m de distância. Para cana-de-açúcar, as características produtivas também foram menores próximos as árvores, devido a menor oferta de radiação fotossinteticamente ativa e possivelmente pela competição dos sistemas radiculares (Elli *et al.*, 2016). Em soja a redução na linha mais próxima de 3 m com eucalipto foi de 33,5% na face norte e 26,1% na face sul (Behling *et al.*, 2023).

Tabela 16 - Componentes da produção do feijão 'BRS Paisano' em diferentes linhas de cultivo em sistema agroflorestal nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.

Distâncias (m)	Número de vagens			Grãos por vagem				
	2021/22	2022/23	Média	2021/22	2022/23	Média		
1	10,5	2,5	5,9 ns	5,4	3,0	4,0 ns		
2	8,9	4,8	6,5	5,1	3,5	4,2		
3	8,1	4,8	6,2	5,4	3,8	4,5		
4	12,1	5,3	7,5	5,9	3,8	4,5		
5	9,7	5,8	7,5	5,1	3,8	4,3		
6	9,3	4,3	6,8	5,2	3,3	4,3		
7	12,5	2,0	6,5	5,8	3,0	4,2		
Média	10,1	A	4,2	B	5,4	A	3,4	B
C.V. (%)	34,3			17,6				

Distâncias (m)	Produção por planta (g planta ⁻¹)			Grãos por planta						
	2021/22	2022/23	Média	2021/22	2022/23	Média				
1	9,9	A a	1,3	B ab	5,6	59,6	A a	7,0	B b	33,3
2	9,7	A a	3,0	B a	6,3	45,5	A a	17,0	B ab	31,3
3	9,7	A a	3,0	B a	6,4	45,7	A a	19,0	B a	32,4
4	14,5	A a	3,0	B a	8,8	114,9	A a	20,3	B a	67,6
5	11,7	A a	4,0	B a	7,8	85,6	A a	21,5	B a	53,6
6	9,3	A a	2,7	B ab	6,0	47,7	A a	16,0	B ab	31,8
7	11,4	A a	1,0	B b	6,2	55,0	A a	7,5	B b	31,3
Média	10,9		2,6			64,9		15,5		
C.V. (%)	32,9			13,2						

Letras diferentes nas médias diferem para linha de cultivo e cultivar. Na interação, letra maiúscula na coluna difere para cultivar dentro de cada safra e minúscula na linha difere para safra dentro de cada cultivar. Ns: não significativo ao nível de 0,05 de probabilidade de erro pelo teste Tukey.

Fonte: Elaborada pela autora.

A maior produtividade do milho ocorreu na safra 2021/22, independente das distâncias das arbóreas (Tabela 17), seguindo o desempenho obtido pelos demais componentes do rendimento (Tabela 15). Entre as cultivares de milho, a cultivar BRS 019TL demonstrou melhor adaptação, superando a 'BRS 015FB'

quanto a estatura de plantas, altura da inserção da espiga, diâmetro do colmo e área foliar (Tabela 13) e em diâmetro e comprimento de espiga, grãos por espiga e produção por planta (Tabela 15) sendo que estes últimos contribuíram para sua maior produtividade (Tabela 17). Os resultados das cultivares são corroborados por Schiedeck *et al.* (2021), onde, em condições de cultivo a pleno sol, a 'BRS 019TL' apresentou maior estatura, em torno de 3 m e produtividade de 7.500 kg ha⁻¹, enquanto que a 'BRS 015FB' possuiu estatura média de 2 m e produtividade de 5.500 kg ha⁻¹. Isso ocorre porque a 'BRS 019TL' foi selecionada para produção de grãos, enquanto que a 'BRS 015FB' possui o pericarpo branco e apresenta valor agregado na produção de farinha. Do mesmo modo, Coelho *et al.* (2018) comparou milho dentado e farináceos, e também concluiu que o farináceo branco apresentou menor peso de 1000 grão em comparação ao farináceo amarelo, preto e o milho dentado. Destaca-se que a produtividade das duas cultivares no SAF foi ínfima em comparação aos seus potenciais produtivos o que indica a sua inadequação para cultivo no interior de SAF consolidado.

O cultivo próximo a linha arbórea pode ser prejudicial devido a competição por nutrientes e água e, nesse mesmo sentido, Marin *et al.* (2006) observaram redução da umidade do solo de 0 a 1 m da linha com *Gliricidia sepium*, com significativo aumento da umidade do solo a 3 m de distância. Em suporte a esses resultados, Behling *et al.* (2023) observaram menor produtividade da soja próximo as árvores de eucalipto, e Nicodemo *et al.* (2016) observaram redução da produção da aveia nas linhas próximas as árvores, os autores atribuem isso a diminuição da radiação solar, mas também a intensificação do estresse hídrico pelas raízes das arbóreas. Mesmo que não tenha apresentado diferença significativa na profundidade de 0-20 cm, destacam que é possível que o conteúdo de água tenha mudado em maiores profundidades, e a absorção de água pelas árvores pode ter contribuído para o aumento do estresse da aveia durante a safra. Da mesma forma, os autores Pezzopane *et al.* (2020) observaram menor disponibilidade de água com a proximidade das árvores de eucalipto, a 1,9 m, durante o período mais seco do experimento, em virtude do consumo pelas raízes arbóreas, e Zahoor *et al.* (2021), observaram maior produção no consórcio de inverno porque as macieiras entram em dormência, e assim há maior oferta de radiação solar, e também menor competição por água e nutrientes.

Tabela 17 - Produtividade, em kg ha⁻¹, das cultivares de milho 'BRS 019TL' e 'BRS 015FB' e do feijão 'BRS paisano' semeadas em diferentes linhas de cultivo no sistema agroflorestal para as safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.

Fatores	2021/22		2022/23		Média
Milho ('BRS 019TL' e 'BRS 015FB')					
BRS 019TL'	1311,6		426,1		805,6 A
BRS 015FB'	561,4		147,1		324,6 B
1	1041,7		233,9		580,1 NS
3	921,4		235,7		529,6
5	904,6		367,8		597,9
7	878,1		308,9		552,9
Média	936,5	A	286,6	B	
C.V. (%)	25,6				
Feijão ('BRS Paisano')					
1	1740,3		395,0		971,6 A
2	1996,0		436,3		1104,7 A
3	2021,7		487,3		1144,9 A
4	1755,0		709,3		1057,8 A
5	1597,3		654,5		1058,6 A
6	1572,3		480,7		1026,5 A
7	1616,0		188,8		800,4 B
Média	1757,0	A	478,8	B	
C.V. (%)	11,9				

Letras diferentes nas médias diferem para as linhas de cultivo ao nível de 0,05 de probabilidade de erro pelo teste Tukey.

Fonte: Elaborada pela autora.

Na linha de cultivo número 1, 16 plantas não foram colhidas porque não apresentaram vagens, considerando-as improdutivas por estresse competitivo do ambiente, com possível maior restrição hídrica e energética com a proximidade às árvores do SAF, enquanto que na linha 7 isso ocorreu em 7 plantas. Assim, na linha 7 havia maior número de plantas com vagens, porém em menor número/peso de grãos, resultando em menor produção do feijão na linha 7 (Tabela 17) ($p < 0,05$) na safra 2022/23. Isso pode ser confirmado nos dados da produção por planta e número de grãos por planta (Tabela 16), pois as linhas 1 e 7 apresentaram os menores valores para essas variáveis respostas. Nicodemo *et al.* (2016) em aveia também observaram menor produção perto das árvores em virtude ao menor número de plantas estabelecidas, causada pela competição interespecífica. No presente estudo no lado das árvores na linha 1 havia predominantemente espécies nativas florestais e de noqueira pecã em produção, intensificando a competição por água e nutrientes. De acordo com

Duan *et al.* (2019) a noqueira pecã consorciada com trigo causa maior competição radicular entre as espécies em 40 cm, e nesse aspecto, as árvores podem competir na mesma profundidade por água com o milho e o feijão.

A produção de milho no SAF se demonstrou improfícua, com produtividade 73,4% inferior à média do estado na safra 2021/22 (3520 kg ha⁻¹) e 94,2% inferior à média do estado na safra 2022/23 (4962,0 kg ha⁻¹) (CONAB, 2023). Não obstante, o feijão em 2021/22 no SAF apresentou acréscimo 38,6% de produtividade em relação à média do estado (1757,0 kg ha⁻¹ e 1079,0 kg ha⁻¹, respectivamente), mas a proeza não se repetiu em 2022/23, provavelmente devido ao prolongado déficit de precipitação (Figura 18), ocasionando redução em 50% (478,9 kg ha⁻¹ e 958 kg ha⁻¹, respectivamente) (CONAB, 2023). O sombreamento proporcionado no SAF é o responsável por essa redução na produtividade, assim como observado em milho por Raai *et al.* (2020), em que o sombreamento de 54 a 60% é considerado severo e torna inviável a produção, independente da condição hídrica. Para o feijão, é possível produzi-lo em um ano que não ocorra déficit hídrico intenso, como na safra 2021/22.

Entre as variáveis que afetam o sombreamento no SAF, se destaca o distanciamento entre as árvores. Ao estudar feijão e soja em uma agroflorestal com 10 anos, Sgarbossa *et al.* (2020) concluíram que é viável a produção de feijão no consórcio com as linhas arbóreas espaçadas a 12 m pois não ocorreu diminuição na sua produção em comparação ao cultivo a pleno sol. Os trabalhos conduzidos por Magalhães *et al.* (2019) que observaram influência negativa na produtividade a partir do quarto ano para a soja e do terceiro ano para o milho nas entrelinhas de eucaliptos e no estudo de Nicodemo *et al.* (2016) com árvores nativas, em que foi relatada que a competição com aveia preta se tornou prejudicial próximo as árvores espaçadas a 17 m após 2 anos e 11 meses, e que a poda não foi suficiente para manter a produtividade da cultura agrícola, destacam a importância de se realizar podas para diminuir a densidade das árvores e possibilitar o cultivo de grãos nas entrelinhas.

Dessa forma, no planejamento e implantação de um SAF no qual há intenção de consórcio com plantas anuais, há necessidade de utilizar maior espaçamento entre as arbóreas do que utilizado pelo SAF deste trabalho e assim, diminuir a densidade de árvores (Pezzopane *et al.*, 2020) ou o cultivo de plantas tolerantes ao sombreamento de pelo menos 54 a 60%. Entre as opções

referenciadas, se destaca o feijão alado que, segundo Raai *et al.* (2020) demonstrou ser tolerante ao sombreamento moderado de 30%, sem redução no teor de proteína nos grãos, apresentando maior produção de 30% de sombreamento em comparação a 60% de sombreamento e a pleno sol. Outra possibilidade é o uso de plantas alimentícias não convencionais no SAF, como folhas da hortaliça begônia, conhecida como azedinha do brejo que com 50% de sombreamento ocorre a maior produção, seguido por 75%, 30% e a pleno sol (Lima *et al.*, 2021).

Além da competição com as árvores por radiação solar, o déficit de precipitação colaborou para que as produtividades do milho e do feijão sofressem reduções significativas de 69,4%, para o milho, e de 72,8%, para o feijão, da safra 2021/22 para a safra 2022/23 (Tabela 17). A redução está de acordo com o referenciado na literatura, pois o déficit hídrico causa fechamento estomático para diminuir a transpiração e assim, buscar manter a hidratação celular (Taiz; Zeiger, 2013). A resposta celular à escassez hídrica varia conforme a cultivar, Pohlmann *et al.* (2022b) observaram redução média de 38,8% para três cultivares de feijão. Em milho sob déficit hídrico a redução pode variar também dependendo do nível de adubação utilizada, de 44,8% a 84,8% (Pias *et al.*, 2017).

Assim, destaca-se a necessidade de elencar alternativas de manejo no SAF para consolidar sua produção ao longo do tempo. Como visto nessa pesquisa, uma única poda por safra pode não ser suficiente para manter a produção no sub-bosque. Em consorciação de soja com eucalipto, a redução na produtividade foi menor em um desbaste sistemático do que seletivo, entretanto, a redução permaneceu ao longo das safras em virtude da rápida regeneração das arbóreas (Behling *et al.*, 2023). Especialmente o milho aumenta a produção com podas frequentes e em alturas baixas, menores de 2 m e principalmente menores de 0,5 m (Baier *et al.*, 2023). Se a produção de grãos for o objetivo, é fundamental o conhecimento sobre o momento de desbaste da florestal para evitar a competição interespecífica. Por exemplo, do eucalipto o momento adequado ocorre três anos após o plantio das árvores (Tonini; Magalhaes; Faria Neto, 2019). Entretanto, em um SAF multidiverso com espécies frutíferas e nativas torna-se ainda mais complexa essa decisão.

Além da poda, diminuir o número de plantas no sub-bosque para diminuir a competição intra-específica, ou o cultivo de grãos somente no centro da entrelinha do SAF deve ser considerado. Contudo, se destaca não somente o potencial produtivo do feijão no SAF, mas também que este aumenta a biodiversidade do local desde os anos iniciais (Dartora *et al.*, 2022), contribuindo para o equilíbrio do ecossistema local, gerando maior ganho econômico total ao agricultor em comparação ao cultivo solteiro tradicional (Zahoor *et al.*, 2021). Ainda, a produção de frutas e de madeira (Behling *et al.*, 2023) deve ser considerado ao avaliar a viabilidade de uma agrofloresta, pois auxilia na diversificação da propriedade e confere poder de resiliência ao agricultor.

6.4. Conclusões

Próximo ao meio-dia a redução da radiação solar disponível no interior do sistema agroflorestal atinge 50,7% ao nível do dossel do milho e 54,9% para o feijão.

O coeficiente de extinção do milho cultivares BRS 019TL e BRS 015FB é de 0,35 para dias ensolarados, enquanto que em dias nublados sofre influência da distância da linha arbórea. O coeficiente de extinção do feijão de 0,45, em dias nublados, e de 0,56, em dias ensolarados.

A eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa do milho apresenta valor de 0,37 para dia nublado e em dia ensolarado a cultivar BRS 019TL (0,20) mostra-se mais eficiente do que a cultivar BRS 015FB (0,14). Para o feijão ocorre valores de 0,26 em dia nublado e de 0,24 em dia ensolarado.

O déficit de precipitação foi mais severo na safra de 2022/23, com acumulado de 85 mm no ciclo do feijão e de 118 mm no milho.

Entre cultivares de milho, a 'BRS 019TL' apresenta maiores valores para estatura, diâmetro do colmo, área foliar e altura da inserção da espiga em comparação com a 'BRS 015FB'.

Para o Sistema Agroflorestal adulto cultivado em fileiras espaçadas a 5 m, os componentes de produção e produtividade do milho não são afetados pelas distâncias das árvores. A cultivar BRS 019TL apresenta maiores valores

de produção por planta, grãos por espiga, diâmetro e comprimento da espiga e produtividade em comparação a 'BRS 015FB'. A maior produção por planta, grãos por planta e produtividade do feijão ocorre nas linhas centrais da entrelinha das arbóreas.

7. CAPÍTULO 4 – IMPACTO DO SISTEMA AGROFLORESTAL E DO CULTIVO CONSORCIADO NO CRESCIMENTO, PRODUÇÃO E QUALIDADE DAS SEMENTES DE MILHO E FEIJÃO

7.1. Introdução

O Brasil é o segundo maior produtor de feijão e o terceiro maior produtor de milho do mundo, grãos que são importantes para a economia do país e para a soberania alimentar de seu povo (FAOSTAT, 2022). No âmbito da agricultura familiar, dados do censo agropecuário brasileiro de 2017 indicam que este setor é responsável por 42% da produção de feijão e 23% da produção de milho (IBGE, 2017). A continuidade do cultivo no futuro próximo requer práticas de conservacionistas, buscando uma produção aliada à mitigação das mudanças climáticas e à preservação dos ecossistemas naturais. Os sistemas agroflorestais (SAFs) são práticas de manejo que visam um ambiente mais equitável, consistindo na produção de alimentos em conjunto com espécies arbóreas com ou sem a integração de animais, que vêm aumentando em número e área, inclusive na Amazônia Legal brasileira (Sabino *et al.*, 2022). Por outro lado, apesar dos inúmeros benefícios desse sistema de produção, para algumas espécies graníferas, o sombreamento proporcionado pelo crescimento das árvores ou de outras espécies consorciadas de maior estatura pode ser um fator limitante para a produção, como no caso do milho (Pezzopane *et al.*, 2019) e do feijão (Sgarbossa *et al.*, 2020). Para alcançar altas produções, um dos principais insumos é a oferta de radiação solar, fundamentalmente utilizada nos processos fotossintéticos para produção de carboidratos (Taiz; Zeiger, 2013). Além disso,

a capacidade de produção e armazenamento de fotoassimilados durante o ciclo da planta está relacionada ao acúmulo de reservas na semente produzida pela planta-mãe (Cigel *et al.*, 2023).

Embora o sombreamento reduza a produtividade de milho e feijão (Pezzopane *et al.*, 2019; Sgarbossa *et al.*, 2020), em soja foi observado maior qualidade da semente produzida sob essa condição, com uma porcentagem de germinação mais alta quando o sombreamento foi imposto a partir do estágio R4 (Cigel *et al.*, 2023) e germinação inicial mais rápida quando produzida em consórcio ao milho devido a alterações na biossíntese de pró-antocianidinas, ácidos graxos e fito-hormônios (Chen *et al.*, 2020). Outro estudo também indica que o sombreamento pode estimular a germinação de sementes de soja, conforme observado por Bellaloui *et al.* (2012), no entanto, diminui o peso da semente dependendo da quantidade de assimilados disponíveis durante o período de enchimento de suas sementes.

Entender o vigor e a germinação do lote de sementes é crucial para alcançar um estabelecimento rápido e uniforme do estande de plantas, além de indicar competitividade por recursos hídricos, luminosos e nutricionais contra plantas espontâneas (Dias; Mondo; Cicero, 2010; Padilha; Coelho; Andrade, 2020; Kandasamy *et al.*, 2020). Neste aspecto, compreender a viabilidade de um SAF consolidado para produzir sementes orgânicas com qualidade fisiológica representa uma lacuna científica. Assim, os objetivos deste estudo foram (i) avaliar o crescimento e a produção de grãos de cultivares de milho e feijão produzidos em um sistema agroflorestal e em pleno sol, em cultivo solteiro e consorciado, e (ii) determinar a qualidade das sementes produzidas sob sombreamento do sistema agroflorestal e do consórcio entre milho e feijão em comparação com o ambiente de pleno sol e o cultivo solo das espécies. As hipóteses da pesquisa foram que (i) as plantas no sistema agroflorestal apresentam maior crescimento e menor produção de grãos, e (ii) as sementes produzidas sob a sombra das árvores do sistema agroflorestal ou do consórcio de milho e feijão apresentam maior germinação.

7.2. Material e métodos

Os experimentos foram conduzidos na área experimental da Embrapa Clima Temperado, Estação Experimental Cascata (31°37'S, 52°31'W, 173 m), nas safras agrícolas de 2021/22 e 2022/23. Os cultivos de milho e de feijão foram conduzidos em área a pleno sol (PS) e em área sob o dossel de um sistema agroflorestal (SAF), ambas áreas manejadas no sistema orgânico. O SAF, implantado em 2013, é composto por espécies frutíferas *Carya illinoensis* (nogueira-pecã), *Citrus sinensis* (laranja), *Citrus bergamia* (bergamota), *Diospyros kaki* (caqui) e *Butia* sp. (butiá) e as espécies florestais *Trema micranta* (trema), *Enterolobium contortisiliquum* (timbaúva), *Peltophorum dubium* (canafístula), *Cedrela fissilis* (cedro), *Luehea divaricata* (açoita-cavalo), *Cordia trichotoma* (louro-pardo) e *Patagonula americana* (guajuvira) cultivadas no alinhamento NNE-SSW e espaçadas a 5 m entre fileiras. No ano agrícola 2021/22 foi realizada uma poda de limpeza, apenas para retirar os galhos do estrato baixo e médio nas entrelinhas (no máximo 2 m de altura), enquanto que em 2022/23 foi realizado uma poda drástica nas florestais a fim de permitir maior entrada de radiação solar para os cultivos anuais.

Ao longo do experimento foram realizadas capinas manuais, para controle de plantas espontâneas, e na safra 2022/23 foi aplicado *Bacillus thuringiensis* para controle da lagarta-do-cartucho no milho. Para adubação, foi colocado esterco de peru peletizado na dose de 800 g linha⁻¹ de base no milho e no feijão, e 800 g linha⁻¹ em cobertura somente no milho conforme a recomendação técnica (CQFS-RS/SC, 2016). As cultivares de milho utilizadas foram a 'BRS 019TL' e a 'BRS 015FB', escolhidas por características quanto a rusticidade, diferentes estaturas, produtividades e propósitos de uso (Schiedeck *et al.*, 2021). A cultivar de feijão utilizada foi a 'BRS Paisano', pertencente ao grupo de grãos pretos, preferencialmente produzido no sul do Brasil (CONAB, 2023).

As espécies foram avaliadas separadamente em cada ambiente. Foram avaliados arranjos de plantas: 'BRS Paisano' solteiro, 'BRS 015FB' solteiro, 'BRS 019TL' solteiro, 'BRS Paisano' consorciado com 'BRS 019TL' no arranjo 1:1, 'BRS Paisano' consorciado 'BRS 015FB' no arranjo 1:1, 'BRS Paisano' consorciado com 'BRS 019 TL' no arranjo 2:2 e 'BRS Paisano' consorciado com 'BRS 015FB' no arranjo 2:2. Os arranjos 1:1 referem-se a linhas de feijão

intercaladas as de milho, enquanto que os arranjos 2:2 referem-se a 2 linhas de milho ao lado de 2 linhas de feijão. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com três repetições na safra 2021/22 e 4 repetições na safra 2022/22. Cada unidade experimental mediu 15 m² (3 x 5 m) no SAF e 20 m² (4 x 5 m) no PS. O espaçamento dos cultivos foi de 0,8 m entre linhas e 0,25 m entre plantas para o milho, totalizando 5 sementes por metro linear, e de 0,4 m entre linhas e 0,1 m entre plantas para o feijão, totalizando 10 sementes por metro linear.

Durante o pendoamento (VT) do milho (Ritchie; Hanway; Benson (1993) e florescimento (R6) do feijão (Fernandez; Geptz; Lopes (1986) realizou-se medições de crescimento referentes a estatura (cm), número de nós, diâmetro da haste (mm) e área foliar (cm² planta⁻¹). A área foliar foi determinada por meio do somatório das medidas lineares (comprimento (C) e largura (L)) de todas as folhas do milho, e de todos os folíolos centrais dos trifólios do feijão. A equação utilizada para o milho é a 16 (Montgomery, 1911) e do feijão a 17 (Pohlmann *et al.*, 2021):

$$AF: \sum 0,75 * CL \quad (25)$$

$$AF = \sum 1,092 * C^{1,945} \quad (26)$$

No final do ciclo foram colhidas as duas linhas centrais de cada espécie e analisados os componentes da produção: número de vagens granadas, grãos por vagem, grãos por planta, produção por planta e produtividade para o feijão, grãos por espiga, diâmetro e comprimento da espiga, produção por planta e produtividade para o milho. Para ajustar a área das parcelas a fim de ser possível comparar os arranjos de plantas a partir das 2 linhas centrais como parcela útil, utilizou-se para o feijão solteiro área de 2 m², para o milho solteiro e consórcio 1:1 de 4 m² e o consórcio 2:2 de 5 m², assim o valor estimado refere-se a 250, 125 e 100 mil plantas ha⁻¹ para o feijão solteiro, em consórcio 1:1 e em consórcio 2:2 respectivamente e de 50, 50 e 40 mil plantas ha⁻¹ para o milho solteiro, em consórcio 1:1 e em consórcio 2:2 respectivamente.

As sementes colhidas foram secas ao sol até atingirem aproximadamente umidade de 13% medida com auxílio de um analisador de

umidade (Gehaka Agri/ G650). Todas as sementes de cada repetição foram misturadas e obtidas uma amostra única, e destas, retiradas 4 repetições. Para o teste de germinação, realizou-se 4 repetições de 100 sementes, totalizando 400 sementes por tratamento, distribuídas entre folhas de papel germinador pré-umedecidas com água destilada equivalente a 2,5 vezes a sua massa, enroladas, levadas ao germinador à temperatura média do ar de 25° C, e avaliados no quarto e sétimo dia para o milho e quinto e nono dia para o feijão. A contagem ao quarto e quinto dia foi denominada como primeira contagem do teste de (PCG) e a segunda, como teste de germinação (TG). Os resultados foram expressos em porcentagem de germinação de plântulas normais (Brasil, 2009). Também foi obtido o peso de 1000 sementes (Brasil, 2009).

Ao longo do experimento os ambientes também foram caracterizados quanto a temperatura do ar a partir de dados coletados em uma estação meteorológica automática localizada no interior do SAF (EMA1) e em outra localizada a 110 m da área experimental (EMA2). A radiação solar ($W m^{-2}$) foi caracterizada entre os ambientes por meio de um piranômetro portátil, dados coletados nas linhas centrais das parcelas, durante 10 às 14h nos dias 08/12/2021 e 14/12/2022 quando as plantas de feijão estavam em R6 e nas datas 11/01/2022 e 19/01/2023 quando as plantas de milho estavam em VT.

A análise dos dados de crescimento, de produção, de temperatura média do ar e de radiação solar foram analisados com o método de análise dos componentes principais (ACP) com auxílio dos pacotes FactoMineR (Sebastien; Josse; Husson, 2008), ggpubr (Kassambara, 2023), ggplot2 (Wickham, 2016), factoextra (Kassambara; Mundtt, 2020) e patchwork (Pedersen, 2022). Os dados de germinação foram analisados quanto ao atendimento aos pressupostos do modelo matemático, de normalidade do erro experimental por meio do teste Shapiro Wilk, e de homogeneidade das variâncias pelo teste Oneillmathews, e na sequência os dados foram analisados pelo teste de variância, e quando significativos, suas médias foram distinguidas pelo teste Tukey a 0,05 de probabilidade do erro com o pacote ExpDes.pt (Ferreira *et al.*, 2021). O peso de 1000 sementes foi avaliado por test t ($p < 0,05$). Todas as análises foram realizadas no software R (R Core Team, 2020).

7.3. Resultados e discussão

A análise dos dados de milho revela que o componente principal 1 (Dim1) explicou 62,4% e 64,1% em 2021/22 e 2022/23, respectivamente, sendo principalmente composto por componentes de rendimento (produtividade, produção por planta, grãos por espiga, comprimento da espiga e temperatura do ar média em 2021/22; e produtividade, produção por planta, grãos por espiga, diâmetro e comprimento da espiga, diâmetro do caule e temperatura do ar em 2022/23) (Tabela 18, Figura 21A, B). O componente principal 2 (Dim2) explicou 24,9% em 2021/22 e 26,9% em 2022/23, sendo predominantemente composto por variáveis de crescimento (altura, área foliar e altura de inserção da espiga em ambas as safras). Na Figura 21A, B, pode-se observar que os dados de PS predominantemente apareceram no quadrante positivo relacionado aos componentes de produção, enquanto os dados do SAF apareceram no quadrante dos parâmetros de crescimento. Pode-se inferir que há uma maior produção de grãos em PS e um maior crescimento no SAF. Entre as cultivares, é observável que em ambos os ambientes, a 'BRS 015FB' permaneceu no quadrante negativo de Dim2, e a 'BRS 019TL' no lado positivo, indicando que as menores estatura, área foliar e altura de inserção da espiga ocorreram em 'BRS 015FB'. Esses resultados também são verificados na Figura 22, com espigas menores em SAF em comparação com PS, e entre as cultivares, a 'BRS 019TL' se destaca com maior produção.

Na análise dos dados de feijão, o componente principal 1 (Dim1) explicou 51,2% e 69,2% em 2021/22 e 2022/23, respectivamente, sendo principalmente composto por componentes de rendimento (produção por planta, número de vagens e grãos por planta em 2021/22; e produção por planta, número de vagens, grãos por planta, juntamente com área foliar, temperatura do ar e radiação solar em 2022/23) (Tabela 18, Figura 21C, D). O componente principal 2 (Dim2) explicou 28,0% em 2021/22 e 15,4% em 2022/23, sendo predominantemente composto por variáveis de crescimento (altura e número de nós em 2021/22; e altura, diâmetro do caule em 2022/23). Assim como no milho, houve também uma tendência para os dados de PS aparecerem predominantemente no quadrante positivo relacionado aos componentes de

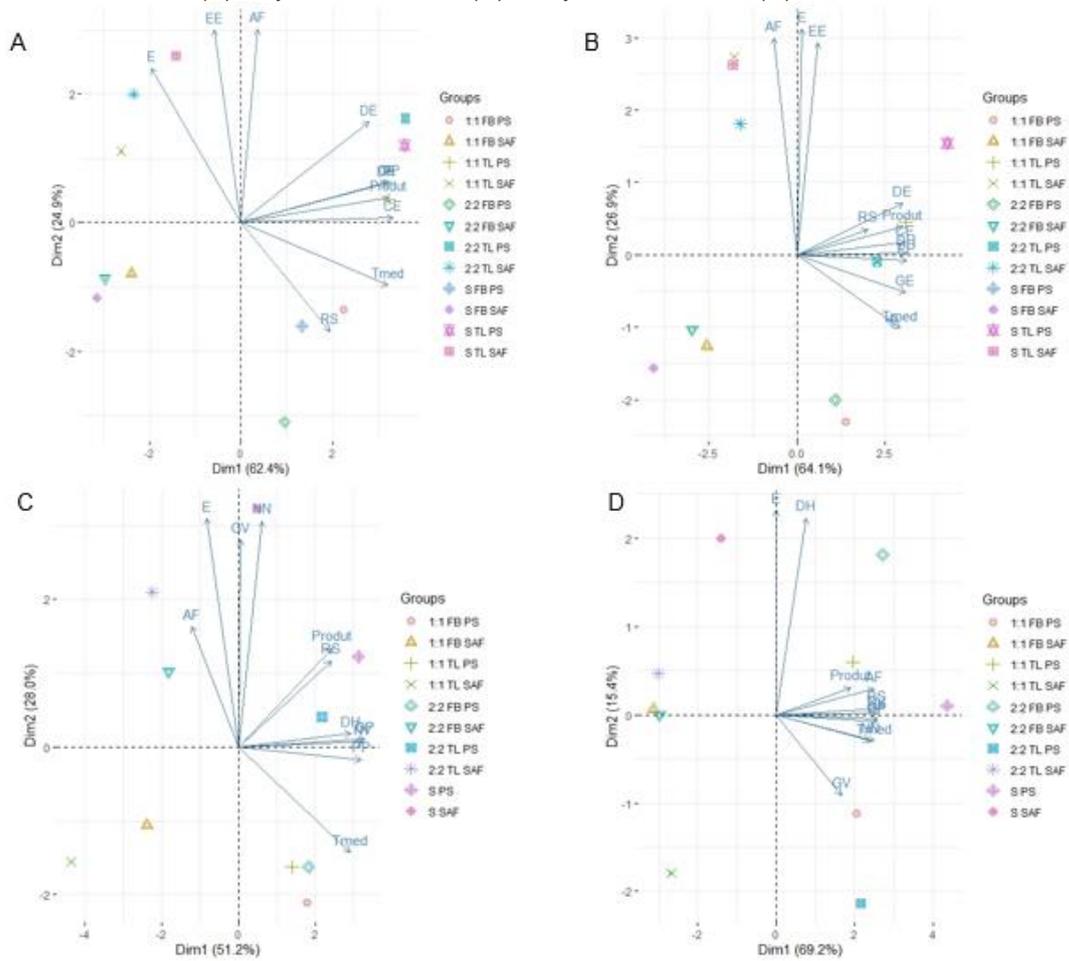
produção e do SAF no quadrante dos parâmetros de crescimento. Portanto, há uma maior produção de feijão em PS em comparação com o SAF como observado na Figura 22, onde as plantas em PS apresentaram mais vagens e sementes de maior tamanho. Além disso, o arranjo de plantas 1:1 permaneceu predominantemente no quadrante negativo de Dim2, sugerindo que foi o arranjo de plantas que mais prejudicou o crescimento das plantas de feijão.

Tabela 18 - Qualidade de representação das variáveis (cos2) do estudo para o milho e o feijão nas safras 2021/22 e 2022/23 para os componentes principais 1 (Dim 1) e 2 (Dim 2). Pelotas, RS.

		Milho			
		2021/22		2022/23	
		Dim.1	Dim.2	Dim.1	Dim.2
Produtividade	kg ha ⁻¹	0,91	0,01	0,91	0,01
Produção por Planta	g planta ⁻¹	0,94	0,03	0,98	0,00
Grãos por espiga	unidade	0,90	0,03	0,96	0,02
Diâmetro da espiga	cm	0,68	0,21	0,91	0,05
Comprimento da espiga	cm	0,96	0,00	0,96	0,00
Estatura	cm	0,34	0,50	0,00	0,98
Diâmetro da haste	cm	0,88	0,03	0,97	0,00
Área foliar	cm ² planta ⁻¹	0,01	0,79	0,04	0,90
Altura da inserção da espiga	cm	0,03	0,78	0,03	0,86
Temperatura média do ar	°C	0,90	0,08	0,87	0,10
Radiação solar	W m ²	0,33	0,25	0,41	0,01
		Feijão			
		2021/22		2022/23	
		Dim.1	Dim.2	Dim.1	Dim.2
Produtividade	kg ha ⁻¹	0,53	0,16	0,53	0,01
Produção por Planta	g planta ⁻¹	0,91	0,00	0,98	0,00
Número de vagens	unidade	0,94	0,00	0,97	0,00
Grãos por vagem	unidade	0,00	0,70	0,41	0,12
Grãos por planta	unidade	0,97	0,00	0,97	0,00
Estatura	cm	0,06	0,85	0,00	0,78
Número de nós	unidade	0,04	0,83	0,84	0,01
Diâmetro da haste	cm	0,77	0,00	0,09	0,73
Área foliar	cm ² planta ⁻¹	0,13	0,23	0,93	0,01
Temperatura média do ar	°C	0,76	0,18	0,92	0,01
Radiação solar	W m ²	0,52	0,12	0,97	0,00

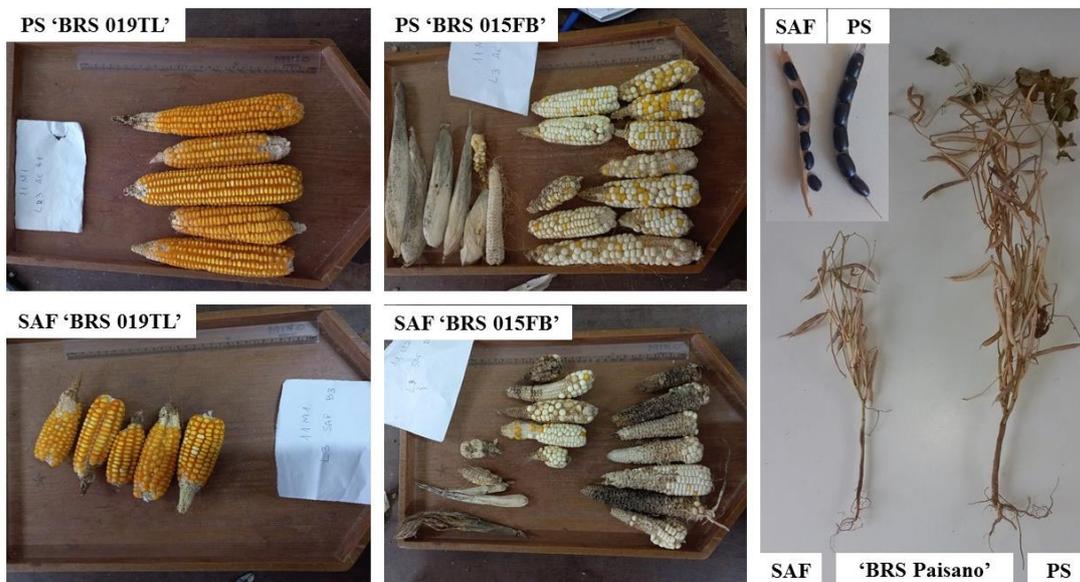
Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 21 - Gráfico das variáveis na análise de componentes principais no milho em 2021/22 (A), milho em 2022/23 (B), feijão em 2021/22 (C) e feijão em 2022/23 (D). Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 22 - Espigas das cultivares BRS 019TL e BRS 015FB, e plantas e vagens da cultivar BRS Paisano colhidas no ambiente a pleno sol (PS) e sistema agroflorestal (SAF). Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

O resultado do SAF predominantemente estar relacionado às variáveis de crescimento, indicando maior crescimento das plantas nesse ambiente (Tabela 18, Figura 21) é baseado no estiolamento das plantas causada pelo sombreamento, onde as plantas tendem a modificar sua estrutura e arquitetura em busca de radiação solar, alongando o caule e aumentando seu crescimento (Taiz; Zeiger, 2013). Discordando dos resultados desta pesquisa, Pezzopane *et al.* (2019), também com análise de componentes principais para milho, observaram maior produção de matéria seca associada à maior disponibilidade de radiação solar. No entanto, nos feijões, Sgarbossa *et al.* (2020) corroboram o resultado de que o sombreamento promoveu maior produção de folhas e que as variáveis de produção estavam associadas à maior disponibilidade de luz.

As plantas estioladas resultaram em menor produtividade no SAF do que no PS, com uma redução média de 59,9% e 60,0% para milho e 49,7% e 63,4% para feijão, tanto para as temporadas 2021/22 quanto 2022/23, respectivamente. Esse resultado é corroborado por Pezzopane *et al.* (2019) ao avaliar o milho e por Sgarbossa *et al.* (2020) ao avaliar feijões, ambos em consórcios com árvores. Essa redução é esperada devido à menor disponibilidade de radiação solar no SAF, o que reduz a taxa fotossintética, resultando em menor produção de carboidratos nas plantas (Taiz; Zeiger, 2013). O SAF no presente estudo reduziu a radiação solar disponível em 33,5% (Pohlmann *et al.*, 2024), um limite crítico já observado em outras pesquisas para milho por Yang *et al.* (2021b), relatando uma diminuição de 34,8% na produtividade com 33% de restrição de luz, e para soja por Tibolla *et al.* (2019), onde a produtividade não foi comprometida até que 30% da radiação solar fosse interceptada pelas árvores.

No milho, os dados do SAF formam um agrupamento (Figura 21), pois são pontos próximos no gráfico, indicando que têm semelhança entre si, sendo, neste caso, mais homogêneos. No entanto, nos feijões, a posição dos grupos no gráfico não ajuda a identificar possíveis padrões ou agrupamentos nos dados em relação a cada dimensão, pois os dados estão espalhados e, portanto, caracterizados como heterogêneos. Essas informações são úteis para entender como as variáveis originais contribuem para a estrutura dos dados e para identificar possíveis padrões de resposta das plantas de milho e feijão sob sombreamento. O milho, sendo uma planta de metabolismo C4 e apresentar

maior eficiência fotossintética do que plantas C3, como o feijão, apresentam redução na proporção de biomassa foliar quando sombreado (Colbach *et al.*, 2020), o que poderia indicar uma resposta adaptativa a condições adversas.

Apesar do SAF apresentar menor produção de milho em comparação com o PS, ele tem potencial para a produção de sementes. O teste de germinação (TG) em 2021/22 não foi significativo para nenhum tratamento (Tabela 19), enquanto em 2022/23, ocorreu uma interação tripla. Nesta safra para as duas cultivares de milho no arranjo solteiro, o TG foi maior no SAF em comparação ao PS, enquanto os consórcios não diferiram significativamente. Para os arranjos em SAF não houve diferença significativa para 'BRS 019TL', no entanto, para 'BRS 015FB, o maior TG ocorreu no consórcio 2:2 e o menor no cultivo solteiro. Em PS, para ambas as cultivares, o menor TG ocorreu no cultivo solteiro e o maior nos consórcios. Para as cultivares, ocorreu uma diferença significativa apenas para o consórcio 2:2 em SAF e no cultivo solteiro em PS, e em ambos, o maior TG foi para a cultivar BRS 015FB.

Tabela 19 - Teste de germinação e primeira contagem do teste de germinação total das cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) em diferentes arranjos de plantas com a cultivar de feijão 'BRS Paisano' nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.

(continua)

Teste de germinação											
2021/22											
Arranjos	'BRS 019TL'			'BRS 015FB'							
	SAF	PS	Média TL	SAF	PS	Média FB	Média Arranjos				
Solteiro	95,7	88,7	92,2	94,7	90,3	92,5	92,3	NS			
1:1	97,0	90,7	93,9	98,0	96,3	97,2	95,5				
2:2	93,3	90,0	91,7	96,0	92,3	94,2	92,9				
Média Cultivar			92,6	NS		94,6					
SAF	95,8	NS									
PS	91,4										
C.V. (%)	7,2										
Teste de germinação											
2022/23											
Arranjos	'BRS 019TL'			'BRS 015FB'							
	SAF	PS	Média TL	SAF	PS	Média FB	Média Arranjos				
Solteiro	97,8	A a A	89,5	B b B	93,6	96,0	A b A	93,3	B b A	94,6	94,1
1:1	97,5	A a A	96,8	A a A	97,1	98,8	A ab A	97,8	A a A	98,3	97,7
2:2	96,3	A a B	96,3	A a A	96,3	99,0	A a A	99,5	A a A	99,3	97,8
Média Cultivar			95,7			97,4					

Tabela 19 - Teste de germinação e primeira contagem do teste de germinação total das cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) em diferentes arranjos de plantas com a cultivar de feijão 'BRS Paisano' nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.

(continuação)

SAF	97,5										
PS	95,5										
C.V. (%)			1,8								
Primeira contagem do teste de germinação											
2021/22											
Arranjos	'BRS 019TL'					'BRS 015FB'					
	SAF	PS	Média TL			SAF	PS	Média FB		Média Arranjos	
Solteiro	67,0	51,0	59,0	B b		80,3	66,3	73,3	B a	66,2	
1:1	79,3	66,7	73,0	A b		93,0	81,3	87,2	A a	80,1	
2:2	85,3	76,0	80,7	A a		84,7	70,3	77,5	AB a	79,1	
Média Cultivar			70,9			79,3					
SAF	81,6	A									
PS	68,6	B									
C.V. (%)			12,2								
Primeira contagem do teste de germinação											
2022/23											
Arranjos	'BRS 019TL'					'BRS 015FB'					
	SAF	PS	Média TL			SAF	PS	Média FB		Média Arranjos	
Solteiro	67,5	A a A	21,3	B a B	44,4	73,0	A a A	62,3	A a A	67,6	56,0
1:1	73,0	A a A	37,3	B a B	55,1	52,8	B b B	68,8	A a A	60,8	57,9
2:2	68,3	A a B	35,5	B a A	51,9	82,3	A a A	17,5	B b B	49,9	50,9
Média Cultivar			50,5			59,4					

Tabela 19 - Teste de germinação e primeira contagem do teste de germinação total das cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) em diferentes arranjos de plantas com a cultivar de feijão 'BRS Paisano' nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.

(continuação)

SAF	69,5	
PS	40,4	
C.V. (%)		18,6

Interação ambiente x arranjo de plantas x cultivar= letras maiúsculas na linha diferem para cada ambiente em cada arranjo e cultivar, letras minúsculas na coluna diferem para cada arranjo dentro de cada ambiente e cultivar, e letras maiúsculas na linha diferem para cada cultivar dentro de cada ambiente e arranjo. Interação arranjos de plantas x cultivar= letras maiúsculas na coluna diferem para cada arranjo dentro de cada cultivar e letras minúsculas na linha diferem para cada cultivar dentro de cada arranjo. Letras maiúsculas diferentes nas médias dos fatores diferem entre si. Ns: não significativo a probabilidade de 0,05 de erro.

Na safra 2021/22, a primeira contagem do teste de germinação (PCG) em SAF foi 15,9% maior do que em PS. Além disso, houve uma interação dupla significativa entre cultivar e arranjo, com o menor PCG ocorrendo no arranjo solteiro para ambas as cultivares, enquanto os maiores foram observados em ambos os consórcios para 'BRS 019TL' e no 1:1 para 'BRS 015FB'. Entre as cultivares, a 'BRS 015FB' apresentou um valor de PCG mais alto no cultivo solteiro e no consórcio 1:1, enquanto no 2:2 não diferiu.

Na safra 2022/23 para milho, houve uma interação tripla entre os fatores (Tabela 19). Para a primeira contagem do teste de germinação (PCG), entre os ambientes, a cultivar BRS 019TL apresentou uma média mais alta para todos os tratamentos (solteiro e consórcios) no SAF em comparação com PS, enquanto 'BRS 015FB' mostrou o maior valor de PCG no consórcio 2:2 no SAF e no consórcio 1:1 em PS, e o cultivo solteiro não diferiu entre os ambientes. Entre os arranjos, 'BRS 019TL' não diferiu nos dois ambientes, no entanto, 'BRS 015FB' mostrou PCGs mais altos no cultivo solteiro e no consórcio 2:2 no SAF, e no cultivo solteiro e no consórcio 1:1 em PS. Para as cultivares, em SAF, o maior valor de PCG ocorreu para a cultivar BRS 019TL no consórcio 1:1 e para 'BRS 015FB' no consórcio 2:2, enquanto o cultivo solteiro não diferiu. Em PS, o maior PCG para 'BRS 019TL' foi observado no consórcio 2:2, e para 'BRS 015FB' no consórcio 1:1 e solteiro.

O sombreamento proporcionado pelo SAF aumentou o PCG no milho em 15,9% e 41,9% em 2021/22 e 2022/23, respectivamente, em comparação com o PS. No entanto, no TG, os ambientes não diferiram, sugerindo que há maior vigor nas sementes produzidas no SAF, mas indiferença na germinação final do lote. A avaliação do PCG é um indicador fisiológico de vigor de sementes (Krzyzanowski, França Neto, 2001). Alto vigor é importante para referenciar o desenvolvimento de plântulas vigorosas e sua capacidade competitiva no campo com plantas espontâneas, além de influenciar na produtividade (Padilha; Coelho; Andrade, 2020; Kandasamy *et al.*, 2020). O sombreamento em plantas parentais altera o conteúdo de tipos de lipídios relacionados ao processo germinativo, como observado em soja por Chen *et al.* (2020). Os autores observaram uma diminuição nas concentrações de ácido oleico e linolênico em sementes provenientes de sombreamento e um aumento no ácido linoleico, caracterizando uma germinação mais rápida. Da mesma forma, Bellaloui *et al.* (2012) também

observaram um aumento na germinação na maioria dos genótipos de sementes de soja produzidos sob 50% de sombreamento ao longo do ciclo da cultura, referindo-se ao efeito benéfico de uma redução de 10% na temperatura. No trabalho atual, o SAF resultou em uma diminuição de temperatura de 0,3°C em 2021/22 e 0,4°C em 2022/23, o que corresponde a -1,4% e -1,8%, respectivamente, da temperatura do ar.

Os consórcios mostraram médias de PCG mais altas do que o cultivo solteiro no milho, exceto para o consórcio 2:2 com a cultivar BRS 015FB, que exibiu comportamento diferente em 2022/23 com um PCG de apenas 17,5%, embora tenha se recuperado na germinação total, atingindo 99,5%. Um resultado semelhante foi observado em soja por Chen *et al.* (2020), cujas sementes de soja que foram intercaladas com milho germinaram mais rapidamente do que aquelas conduzidas sob monocultura devido a uma redução na concentração de ácido abscísico e um aumento de giberelina.

O intenso déficit hídrico observado em 2022/23 devido ao La Niña (NOAA, 2024) não reduziu o TG do milho em comparação com 2021/22; no entanto, afetou o vigor das sementes, pela PCG, reduzindo-o em uma média de 20,2% para ambas as cultivares. O déficit hídrico na planta mãe pode ter consequências transgeracionais, pois interfere na quantidade e qualidade das reservas de sementes (Wijewardana *et al.*, 2019). Em soja, foi descoberto que o estresse hídrico na planta mãe é transmitido para a geração F1 e reduz o vigor e a germinação das sementes (Wijewardana *et al.*, 2019). Os autores mencionam que o déficit hídrico não apenas reduz o número de sementes, mas também compromete sua qualidade, produzindo sementes menores e enrugadas.

Os feijões não foram influenciados pelos arranjos e ambientes para o TG (teste de germinação) e PCG (primeira contagem do teste de germinação) nas duas safras analisadas (Tabela 20), tornando sua produção de sementes viável em qualquer uma das circunstâncias testadas. Além disso, eles demonstraram resiliência ao déficit hídrico, não apresentando redução de 2021/22 para 2022/23.

Tabela 20 - Teste de germinação e primeira contagem do teste de germinação da cultivar de feijão 'BRS Paisano' produzido em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) em diferentes arranjos de plantas com as cultivares de milho cultivares de milho 'BRS 019TL' (TL) e 'BRS 015FB' (FB) nas safras 2021/22 e 2022/23. Pelotas, RS.

Teste de germinação									
2021/22					2022/23				
Arranjos	SAF	PS	Média		Arranjos	SAF	PS	Média	
Solteiro	98,7	98,3	98,5	ns	Solteiro	91,0	93,8	92,4	ns
1:1 TL	97,5	96,7	97,1		1:1 TL	91,8	91,5	91,6	
1:1 FB	94,5	97,3	96,2		1:1 FB	93,8	93,0	93,4	
2:2 TL	99,3	97,3	98,3		2:2 TL	90,8	90,8	90,8	
2:2 FB	98,0	97,3	97,7		2:2 FB	89,0	96,8	92,9	
Média	97,8	ns 97,4			Média	91,3	ns 93,2		
C.V. (%)	2,7				C.V. (%)	3,4			
Primeira contagem do teste de germinação									
2021/22					2022/23				
Arranjos	SAF	PS	Média		Arranjos	SAF	PS	Média	
Solteiro	98,0	98,3	98,2	ns	Solteiro	90,3	89,8	90,0	ns
1:1 TL	97,3	93,0	95,4		1:1 TL	85,8	83,8	84,8	
1:1 FB	94,0	92,7	93,2		1:1 FB	90,8	90,3	90,5	
2:2 TL	95,3	96,7	96,0		2:2 TL	88,3	85,5	86,9	
2:2 FB	97,7	91,3	94,5		2:2 FB	86,0	91,5	88,8	
Média	96,7	ns 94,4			Média	88,2	ns 88,2		
C.V. (%)	4,5				C.V. (%)	5,0			

Ns: não significativo a 0,05 de probabilidade de erro.

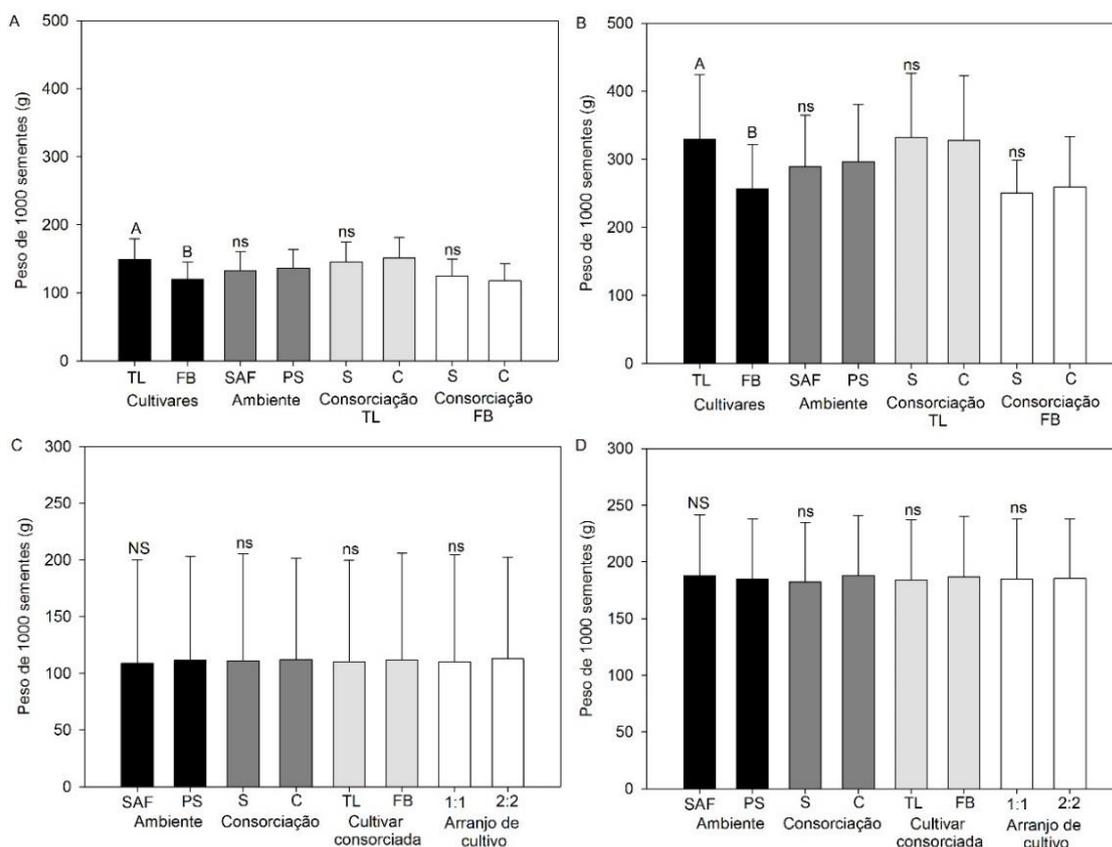
Fonte: Elaborada pela autora.

As discrepâncias entre os ambientes e arranjos observadas no milho não se repetiram no feijão. As sementes de 'BRS Paisano' não mostraram influência do nível de sombreamento sob o qual foram produzidas, com PCG, TG e peso de 1000 sementes semelhantes em todos os ambientes e arranjos de cultivo. É possível que, como as espécies C3 reduzem menos a proporção de biomassa foliar quando sombreadas em comparação com as plantas C4, devido à falta de alta eficiência fotossintética, elas se tornem mais resilientes (Colbach *et al.*, 2020). Essa hipótese é coerente ao considerar o ponto de saturação de luz no aparato fotossintético de plantas com diferentes metabolismos, onde plantas C3 saturam em aproximadamente 50% da oferta global de Rs, enquanto as plantas C4 requerem quase toda a Rs disponível (Reynolds *et al.*, 2007).

O peso de 1000 sementes detectou uma distinção apenas entre as cultivares de milho, com valores mais altos para 'BRS 019TL', sem diferença por

ambiente e consórcio (Figura 23 A, B). Para os feijões, nenhum tratamento influenciou significativamente o peso das sementes (Figura 23 C, D).

Figura 23 - Peso de 1000 sementes das cultivares de milho BRS 019TL (TL) e BRS 015FB (FB) conduzidos em sistema agroflorestal (SAF) e a pleno sol (PS) em cultivo solteiro (S) ou consorciação com o feijão 'BRS Paisano' (C) na safra 2021/22 (A) e 2022/23 (B) e peso de 1000 sementes do feijão para os ambientes, consorciação e arranjos de cultivo 1:1 e 2:2 na safra 2021/22 (C) e 2022/23 (D). Pelotas, RS.



Fonte: Elaborada pela autora.

Entre as cultivares de milho em ambos os ambientes, 'BRS 015FB' mostrou menor estatura, área foliar e altura de inserção de espiga. Esta cultivar foi selecionada geneticamente para ser de baixa estatura (Eicholz *et al.*, 2021), enquanto 'BRS 019TL' é considerada alta (Schiedeck *et al.*, 2021). Além disso, 'BRS 015FB' possui propósito de uso diferenciado, para farinha branca. Apesar do menor crescimento, foram observados valores mais altos de PCG (Tabela 20), quase 9% em ambas as temporadas, mesmo que a cultivar tenha mostrado um peso menor de 100 sementes ($p=1.08 \times 10^{-29}$), conforme avaliado na temporada 2022/23, com uma média de 25,1 g para BRS 015FB e 32,9 g para BRS 019TL. Isso indica um diferencial da cultivar a ser investigado, pois, de

acordo com a literatura, para alto PCG ou alto vigor, uma reserva de energia na semente é fundamental, relacionada ao seu tamanho e peso, conforme relatado por Kandasamy *et al.* (2020). Esses autores observaram que os índices de vigor de sementes pequenas de milho são significativamente mais baixos do que os das sementes maiores do mesmo lote, o oposto do que foi observado para as cultivares neste estudo. Possivelmente, a heterogeneidade de luz disponível proporcionou uma resposta diferente entre as duas cultivares testadas, como observado por Sun *et al.* (2020) ao testar duas cultivares de milho, onde foi possível identificar respostas distintas entre cultivares associadas à capacidade de assimilação de carbono e na exportação de carboidratos em níveis anatômicos e fisiológicos, em que quando ocorreu um aumento na concentração de carboidratos na folha de uma cultivar, a fotossíntese foi interrompida.

A literatura menciona um comportamento controverso em relação ao peso das sementes produzidas sob sombreamento. Em soja, Cigel *et al.* (2023) observaram um possível mecanismo compensatório em plantas sombreadas, produzindo menos sementes com maior massa. Por outro lado, também em soja, Bianculli *et al.* (2016) observaram uma redução de 60 e 40 mg no peso das sementes sombreadas em comparação com o tratamento a pleno sol. No presente estudo, o peso de 100 sementes obtido em 2022/23 não foi detectado diferença significativa entre os ambientes para milho ($p=0,15$) e para feijão ($p=0,31$). No entanto, as plantas foram conduzidas sob o sombreamento do SAF durante todo o ciclo da cultura, enquanto Cigel *et al.* (2023) conduziram seu estudo a partir de V6 e Bianculli *et al.* (2016) a partir do estágio de enchimento de sementes, o que pode afetar a adaptabilidade fenotípica da planta às condições microambientais

O ambiente sombreado proporcionado pelo SAF é viável para a produção de sementes orgânicas, assim como a área em PS. Em todos os tratamentos testados, a germinação dessas sementes mostrou percentuais de germinação acima do padrão mínimo exigido pela legislação para comercialização de sementes, que é de 80% para feijão e 85% para milho (Brasil, 2013). Os resultados deste trabalho destacam o potencial de um SAF consolidado de 10 anos para a produção de sementes, no entanto, com a ressalva de menor produção de grãos devido à diminuição da disponibilidade de radiação solar.

Embora a produtividade no SAF tenha sido menor devido a redução na disponibilidade de radiação solar, o estudo ressalta o potencial de certas configurações de cultivo consorciado para mitigar esse efeito. Uma descoberta significativa do estudo é a melhoria na qualidade das sementes, especialmente na primeira contagem do teste de germinação, para sementes produzidas em condições de agrofloresta e cultivo consorciado no milho. Esse aprimoramento na germinação das sementes e no vigor indica um efeito positivo das condições microambientais criadas pelo SAF e pelo cultivo consorciado na qualidade fisiológica das sementes. Esses resultados sugerem que, além do SAF demonstrar maior estabilidade produtiva, as práticas de SAF e cultivo consorciado têm um potencial substancial para melhorar a qualidade das sementes de milho, o que é crucial para a resiliência e sustentabilidade da cultura. Ao aprimorar a capacidade do ecossistema de resistir a desafios ambientais, essas práticas oferecem uma abordagem promissora para manter a estabilidade produtividade e a sustentabilidade em um clima em constante mudança.

7.4. Conclusões

O sistema agroflorestal produz plantas de milho e de feijão com maiores estaturas, diâmetro da haste e área foliar em comparação ao cultivo a pleno sol.

A menor produtividade do milho e do feijão ocorre sob o sombreamento do sistema agroflorestal.

Entre as cultivares de milho a 'BRS 015FB' possui menor crescimento e produção em comparação a 'BRS 019TL' no sistema agroflorestal e no cultivo a pleno sol.

O sombreamento proporcionado pela agrofloresta e o cultivo consorciado entre milho e feijão aumenta a primeira contagem do teste de germinação do milho.

O teste de germinação do milho não é influenciado pelo sombreamento proporcionado pelo sistema agroflorestal e arranjos de cultivo.

A qualidade fisiológica das sementes de 'BRS Paisano' não é alterada pelo sombreamento e arranjos de cultivo.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Ao longo da história, a agricultura baseou-se na integração de culturas herbáceas, arbóreas e na criação de animais, resultando em paisagens ricas e diversas. No entanto, desde a Revolução Industrial, essas paisagens complexas têm sido gradativamente substituídas por monoculturas simplificadas, caracterizadas pela baixa biodiversidade e por práticas de manejo repetitivas e uniformes. Esse modelo agrícola, inicialmente denominado "moderno", tornou-se amplamente dependente de insumos e de energia externos à propriedade. Embora tenha proporcionado um aumento significativo na produtividade das colheitas, atingindo recordes anuais, esse avanço ocorreu à custa da resiliência e da capacidade regenerativa dos ecossistemas naturais que compõem os agroecossistemas.

Atualmente, a agricultura enfrenta intensas adversidades meteorológicas, o que reforça a necessidade de uma transição da agricultura convencional, consumidora de recursos naturais, para a agricultura regenerativa, vista como uma possível solução para a sustentabilidade da produção de alimentos no futuro. Os sistemas agroflorestais, que integram plantas perenes lenhosas com a produção agrícola e/ou animal, promovem maior biodiversidade e resiliência produtiva, representando um modelo mais sustentável e adaptável às novas condições climáticas.

Esta pesquisa buscou investigar a viabilidade de produzir milho e feijão em uma agrofloresta consolidada, com 10 anos de crescimento e baixo manejo. Para responder a essa questão, foram realizados experimentos em uma área de agrofloresta e em uma área de cultivo orgânico a pleno sol, visando comparar os dados obtidos. Além disso, foram testadas duas cultivares de milho: uma de maior produtividade ('BRS 019TL') e outra mais rústica ('BRS 015FB'), para avaliar seu desempenho sob sombreamento. Por fim, buscou-se identificar o

melhor arranjo para esse sistema agroflorestal, analisando o cultivo isolado e o consórcio nas proporções 1:1 e 2:2.

Os resultados foram organizados em quatro capítulos. O primeiro capítulo oferece uma análise holística do crescimento e da produção de feijão e cultivares de milho sob arranjos de cultivos, solteiro e consorciado, no sistema agroflorestal e pleno sol, abordando aspectos sobre o uso eficiente da terra. O segundo capítulo investigou o crescimento e a produção de feijão e cultivares de milho sob arranjo de cultivo solteiro, em diferentes distâncias das linhas arbóreas no sistema agroflorestal, buscando compreender o coeficiente de extinção da radiação solar e a eficiência na interceptação de radiação fotossinteticamente ativa. O terceiro capítulo explora as alterações micrometeorológicas do sistema agroflorestal, em comparação ao ambiente a pleno sol, abordando a oferta energética e térmica às plantas, as temperaturas cardiais das espécies e temperaturas foliares e evapotranspiração de referência. Por fim, o quarto capítulo retoma a perspectiva holística do experimento, por meio da análise de componentes principais, abordando não apenas o crescimento e a produção das plantas, mas também a qualidade fisiológica das sementes produzidas no sistema agroflorestal e a pleno sol, arranjos de cultivos solteiros e consorciados no feijão e cultivares de milho.

Os resultados obtidos demonstram que no interior do sistema agroflorestal há menor oferta de radiação solar para o milho e o feijão, com redução de 48% na média diária, e considerando apenas o período em torno das 12 horas, a atenuação média é de 33%.

A radiação solar transmitida para o dossel dos cultivos no sistema agroflorestal, em torno das 12 horas, é reduzida em 50,7% ao nível do dossel do milho e em 54,9% no dossel do feijão, considerando os cultivos solteiros.

Considerando a redução de radiação solar nos cultivos em agroflorestas, é essencial compreender o quanto essa radiação é atenuada ao atravessar o dossel do cultivo, especialmente em arranjos consorciados com diferentes extratos vegetais. Nesse contexto, o coeficiente de extinção, um parâmetro da Lei de Beer, indica que quanto maior o seu valor, maior a redução exponencial da quantidade de radiação solar que atravessa cada extrato vegetal do consórcio. Para o milho, o coeficiente de extinção é de 0,35 em dias ensolarados

e varia conforme a distância das árvores em dias nublados. No caso do feijão, o coeficiente é de 0,45 em dias nublados e de 0,56 em dias ensolarados.

Além da quantidade de radiação solar que atravessa o dossel do cultivo, é crucial considerar a quantidade que a planta consegue absorver. Para avaliar isso, utiliza-se a eficiência de interceptação da radiação fotossinteticamente ativa (RFA), sendo que, quanto maior o valor, mais eficiente é o cultivo. No caso do milho, a eficiência de interceptação é de 0,37 em dias nublados, enquanto em dias ensolarados a cultivar BRS 019TL se destaca, com uma eficiência de 0,20, em comparação aos 0,14 da cultivar BRS 015FB. Para o feijão, os valores são de 0,26 em dias nublados e 0,24 em dias ensolarados. Essa maior eficiência do feijão na interceptação da radiação solar se deve à sua folhagem planófila, que maximiza a captação da luz.

O sistema agroflorestal também apresentou tendência a menores valores de temperatura do ar em comparação com o ambiente a pleno sol, funcionando como um atenuador de temperaturas extremas. Esse sistema registrou temperaturas mínimas absolutas mais elevadas e temperaturas máximas absolutas mais baixas. A menor disponibilidade energética e térmica resultou em uma redução de 48,7% na evapotranspiração potencial, além de temperaturas foliares mais baixas nos cultivos de milho e feijão.

Embora a menor temperatura máxima do ar e a redução na evapotranspiração sejam vantagens, a diminuição na oferta de radiação solar impactou o crescimento e desenvolvimento das plantas de milho e feijão. Cultivadas no sistema agroflorestal, essas plantas apresentaram estiolamento, com maior altura e área foliar, mas produtividade inferior em comparação com o cultivo a pleno sol.

Devido a ínfima produção do milho, foi observado que para o sistema agroflorestal adulto cultivado em fileiras espaçadas a 5 m, os componentes de produção e produtividade do milho foram afetados indistintamente das distâncias em relação às árvores, entretanto, o feijão apresentou maior produção nas linhas centrais da entrelinha das arbóreas.

O cultivo consorciado não prejudicou o milho no sistema agroflorestal, não influenciando a sua produção de grãos, entretanto, no ambiente a pleno sol em um ano com déficit hídrico intenso, a maior produtividade ocorreu no cultivo solteiro. Para o feijão, devido ao sombreamento das plantas de milho e

competição por água e nutrientes, o feijão apresenta máxima produtividade quando cultivado em solteiro, tanto na agroflorestal quanto a pleno sol.

O uso eficiente da terra (UET) foi utilizado para avaliar a produtividade dos cultivos em relação a área, serve como um parâmetro de escolha dos cultivos consorciados em comparação aos solteiros. Os resultados indicaram vantagens produtivas em ambos os ambientes estudados. No ciclo de 2021/22, o sistema cultivado sob pleno sol apresentou ganho de produtividade de 4% a 123%, enquanto no ciclo 2022/23, marcado por intenso déficit hídrico, o sistema agroflorestal demonstrou maior resiliência, com ganhos produtivos de 31% a 174%. Esses resultados corroboram a viabilidade e importância do consórcio de milho e de feijão.

Entre as cultivares de milho avaliadas, a cultivar BRS 019TL apresenta maiores valores de crescimento e produção de grãos do que a 'BRS 015FB'.

Apesar do sistema agroflorestal consolidado não ser viável para a produção de grãos de milho, o sombreamento proporcionado pela agrofloresta e o cultivo consorciado entre milho e feijão aumentou a primeira contagem do teste de germinação do milho, indicando ser possível a produção de sementes orgânicas na agrofloresta.

Além dos dados obtidos na pesquisa, algumas observações adicionais, não discutidas nos capítulos, contribuem para o entendimento do sistema agroflorestal. Primeiramente, destaca-se o conforto térmico proporcionado ao agricultor ao trabalhar em um ambiente "protegido" da radiação solar direta, promovendo maior bem-estar. Além disso, a necessidade de capinas de plantas espontâneas é menor no sistema agroflorestal em comparação ao cultivo a pleno sol, pois a escassez de radiação solar no solo reduz o crescimento dessas plantas.

Apesar dos benefícios mencionados, foi observado também alguns obstáculos ao cultivo de grãos. O sistema agroflorestal estudado apresenta grande densidade de árvores, as quais cresceram livremente por 10 anos, com intervenções de podas pouco frequentes. Quando realizadas, devido à falta de triturador, os resíduos orgânicos foram depositados na superfície da linha da arbórea e não entre as linhas de cultivo, o que contribuiu para a formação de um solo pobre nutricionalmente. Além da baixa fertilidade do solo ter contribuído para a reduzida produção de grãos, sua alta densidade arbórea e localização

próxima a mata nativa, propiciou um ambiente protegido para os animais silvestres, favorecendo o ataque às espigas. Outro fato que contribuiu para a baixa produção foi a ocorrência do carvão do milho (*Ustilago maydis*), que consome os carboidratos dos grãos para se reproduzir e inviabiliza a espiga para o comércio do grão. Entretanto, vale destacar que este fungo também é uma iguaria culinária com alto valor de aquisição em restaurantes, principalmente mexicanos, que utilizam as espigas infectadas que ainda não produziram esporos na gastronomia com o nome de huitacoche ou cuitacoche.

Além da redução na oferta de radiação solar e amenização de temperaturas do ar extremas, a oferta hídrica precisa ser outro ponto a ser investigado. Nas duas safras ocorreram períodos com déficit hídrico, em 2021/22 o acumulado foi de 83 mm, da emergência a maturação do milho e em 2022/23 o acumulado de déficit hídrico foi de 111 mm. O sistema agroflorestal pode proporcionar maior conteúdo de água no solo no início do período seco, devido a maior proteção do solo contra a incidência direta dos raios solares e de ventos, causada pela adição de material orgânico, por queda natural ou poda de folhas e ramos, e também pelo sombreamento proporcionado pelo dossel das árvores, resultando em diminuição da evaporação do solo. Entretanto, com a intensificação do déficit hídrico ao longo da safra, as arbóreas contribuem com o maior consumo de água por transpiração, e por consequência, diminui o conteúdo de água no solo, ocasionando sintomas de déficit hídrico dentro da agrofloresta iguais aos da área a pleno sol.

Os resultados dessa pesquisa contribuem para o avanço do conhecimento sobre o manejo de grãos em sistemas agroflorestais maduros sob baixo manejo. A partir dos dados pode se esclarecer que é possível produzir grãos de feijão na entrelinha de uma agrofloresta madura com 10 anos de crescimento e de baixo manejo, pois é uma planta tolerante a sombreamento leve. Por outro lado, apesar de não ser viável a produção de grãos de milho, a produção de sementes orgânicas demonstrou potencial. Também se conclui que o manejo de poda é crucial para a perpetuação desse sistema de cultivo, bem como um sistema de irrigação para suprir a demanda hídrica das graníferas, pois foi verificado que em déficit hídrico severo, as árvores competem por água e demonstram vantagens sobre as plantas anuais.

Apesar dessa pesquisa solucionar parte da lacuna de conhecimento sobre esse tema, ainda são necessárias novas pesquisas. O estudo sobre o manejo de diferentes podas e o quanto ela permitirá a transmissividade da radiação solar é necessário. Ainda, estudo com outras espécies tolerantes ao sombreamento podem contribuir para aperfeiçoar o modelo produtivo ao longo da vida de uma agrofloresta. Principalmente, é necessário realizar um estudo ainda mais holístico, não considerando somente a produção dos cultivos anuais no sistema, mas também das espécies florestais e frutíferas que o sistema agroflorestal proporciona.

Fundamental ressaltar que diferentes sistemas, com distintas combinações de espécies, cultivares e locais, podem gerar resultados variados. A concepção de sistemas agroflorestais necessita de planejamento individualizado, considerando as peculiaridades de cada contexto. Não é coerente a elaboração de “pacotes agroflorestais” padronizáveis, pois ignora a complexidade e a diversidade dos agroecossistemas.

REFERÊNCIAS

- ACTION. **Portal Action**. 2014. Disponível em: Action. <http://www.portalaction.com.br>. Acesso em: 10 jun. 2023.
- ADETILOYE, P. O.; EZEDIMA, F. O. C.; OKIGBO, B. N. A land equivalent coefficient (LEC) concept for the evaluation of competitive and productive interactions in simple to complex crop mixtures. **Ecological Modelling**, v. 19, n. 1, p. 27-39, 1983. DOI: [https://doi.org/10.1016/0304-3800\(83\)90068-6](https://doi.org/10.1016/0304-3800(83)90068-6)
- ALBERTI, R.; MELO, L. F.; WIZNIEWSKY, J. G. Compreender porque é que os produtores agrícolas não se tornam produtores biológicos. **Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento**, v. 11, n. 7, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i7.29585>.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos**. Roma: Organización De Las Naciones Unidas Para La Agricultura Y La Alimentación, 2006.
- ALMEIDA, L. P.; ALVARENGA, A. A.; CASTRO, E. M.; ZANELA, S. M.; VIEIRA, C. V. Crescimento inicial de plantas de *Cryptocaria aschersoniana* Mez. submetidas a níveis de radiação solar. **Ciência Rural**, v.34, n.1, p.83-88, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000100013>.
- ALMEIDA, P. R. V.; WANDER, A. E.; FIGUEIREDO, R. S. Panorama do mercado internacional de feijões: análise dos principais players mundiais com competitividade do setor de exportações brasileira. **Revista Gestão, Inovação e Negócios**, v. 1, n. 2, p. 1-23, 2016.
- ALBERTI, R.; MELO, L. F.; WIZNIEWSKY, J. G. Entendendo por que os produtores agrícolas não se tornam produtores orgânicos. **Research, Society and Development**, v. 11, n.7, 2022. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v11i7.29585>
- ARCO-VERDE, M. F.; AMARO, G. **Cálculo de Indicadores Financeiros para Sistemas Agroflorestais**. Boa Vista: Embrapa, 2014.
- ARMENGOT, L.; FERRARI, L.; MILZ, J.; VELÁSQUEZ, F.; HOHMANN, P.; Schneider, M. Cacao agroforestry systems do not increase pest and disease incidence compared with monocultures under good cultural management practices. **Crop Protection**, v. 130, p. 105047, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2019.105047>
- ASMAE, A.; KARIM, B.; AHMED, B.; BENNASSEUR, A. S.; ABIDINE, F. Z. E.; KHALID, D. Yield and related traits of three legume crops grown in olive-based agroforestry under an intense drought in the South Mediterranean Saudi.

Journal of Biological Sciences, v. 30, n. 4, 2023. DOI:
<https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2023.103597>

ASSIS, F. N.; MENDEZ, M. E. Relação entre radiação fotossinteticamente ativa e radiação global. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 24, n. 7, p. 797-800, 1989.

AWAL, M. A., KOSHI, H., IKEDA, T. Radiation interception and use by maize/peanut intercrop canopy. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 139, n. 1-2, p. 74-83, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2006.06.001>

BADO, B. V.; WHITBREAD, A. S.; MANZO, M. L. Improving agricultural productivity using agroforestry systems: Performance of millet, cowpea, and ziziphus-based cropping systems in West Africa Sahel. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 305, p. 107175, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107175>

BAIER, C.; GROSS, A.; THEVS, N.; GLASER, B. Effects of agroforestry on grain yield of maize (*Zea mays* L.) - A global meta-analysis. **Frontiers in Sustainable Food Systems**, v. 7, 2023. DOI: 10.3389/fsufs.2023.116768

BATISTA, S. C. P.; COSTA, S. C. F. das C.; COSTA, F. S. da; DIAS JÚNIOR, L. As dificuldades dos agricultores familiares na produção orgânica na feira agroufam de Manaus, AM. **Revista Terceira Margem Amazônia**, v. 6, n. 14, p. 09-15, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.36882/2525-4812.2020v6i14p9-15>

BEDOUSSAC, L.; BEDOUSSAC, E. P.; JOURNET, H.; HAUGGAARD_NIELSEN, C.; NAUDIN, G. Corre-Hellou, E.S. Jensen, L. Prieur, E. Justes Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. **A review Agronomy Sustainable Development**, v.35, p. 911-935, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s13593-014-0277-7>

BEHLING, M.; SOUZA, A. L.; LANGE, A.; CAMARGO, D.; FALLGATTER, J.; BARRETO, G. U. Effect of thinning eucalyptus trees on soybean productivity in integrated crop-livestock-forestry systems. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.53, n.9, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20220202>

BELLALOU, N.; SMITH, J. R.; GILLEN, A. M.; FISHER, D. K.; MENGISTU, A. Effect of shade on seed protein, oil, fatty acids, and minerals in soybean lines varying in seed germinability in the early soybean production system. **American Journal of Plant Sciences**, v. 3, p. 84-95, 2012. DOI: <https://doi.org/10.4236/ajps.2012.31008>

BENTES-GAMA, M. M.; SILVA, M. L.; VILCAHUAMÁN, L. J. M.; LOCATELLI, M. Análise econômica de sistemas agroflorestais na Amazônia Ocidental, Machadinho D'Oeste- RO. **Revista Árvore**, v. 29, n. 3, p. 401-411, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622005000300007>

BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I. **As plantas e o clima: princípios e aplicações**. Guaíba: Agrolivros, 2017.

BERGAMASCHI, H.; MATZENUER, R. **O milho e o clima**. Porto Alegre: Emaer/RS-Ascar, 2014.

BERTALOT, M. J. A.; GUERRINI, I. A.; MENDOZA, E.; PINTO, M. S. V. Desempenho da cultura do milho (*Zea mays* L.) em sucessão com aveia-preta (*Avena strigosa* Schreb.) sob manejos agroflorestal e tradicional. **Revista Árvore**, v.34, n.4, p.597-608, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622010000400004>

BIANCULLI, M. L.; AGUIRREZÁBAL, L. A. N.; PEREYRA IRUJO, G. A.; ECHARTE, M. M. Contribution of incident solar radiation on leaves and pods to soybean seed weight and composition. **European Journal of Agronomy**, v. 77, p. 1-9, 2016. DOI:10.1016/j.eja.2016.03.002

BIRCH, E. B. Guidelines for top sunflower yields. In: **Farming in South Africa**. Pretoria: Department of Agriculture, 1982. p.1-6.

BIRCH, C. J.; HAMMER, G. L; RICKERT, K. J. Temperature and photoperiod sensitivity in five cultivars of maize (*Zea mays*) until tasseling initiation. **Field Crops Research**, v. 55, p. 93-107, 1998.

BRAGA, F. M.; FERREIRA, E. A.; CABRAL, C. M.; FREITAS, I. C.; MACIEL, J. C.; FREITAS, M. S. S.; ASPIAZU, I.; SANTOS, J. B.; FRAZÃO, L. A.; SAMPAIO, R. A. Revisão: Crescimento de plantas C3 e C4 em resposta a diferentes concentrações de CO₂. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 7, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v10i7.16701>

BRASIL. **Regras para análise de sementes**. Brasília: MAPA/ACS, 2009.

BRASIL. **Instrução normativa nº 45, de 17 de setembro de 2013**. Padrões de identidade e qualidade para a produção e a comercialização de sementes. Brasília: Diário Oficial da República Federativa do Brasil, 2013. Disponível em: https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/insumos-agropecuarios/insumos-agricolas/sementes-e-mudas/publicacoes-sementes-e-mudas/copy_of_INN45de17desetembrede2013.pdf. Acesso em 11 out. 2024.

CABRAL, J. P.; FARIA, D.; MORANTE-FILHO, J. C. Landscape composition is more important than local vegetation structure for understory birds in cocoa agroforestry systems. **Forest Ecology and Management**, v. 481, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118704>

CAMARGO, G. P.; PEREIRA, R. S.; DIAS FILHO, S. C. Sustentabilidade econômica e ambiental através de sistemas agroflorestais. **Revista Reiva**, v.6, n.1, 2023.

CASANOVA-LUGO, F.; LARA-PÉREZ, L. A.; DZIB-CASTILLO, B.; CAAMAL-MALDONADO, J. A.; RAMÍREZ-BARAJAS, P. J.; CETZAL-LX, W. R.;

ESTRADA-MEDINA, H. Alley cropping agroforestry systems change weed community composition and reduce dominant weed species associated with corn in southern Mexico. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 350, n. 1, 2023. DOI: <https://doi-org/10.1016/j.agee.2023.108471>

CASTILLO, M. S.; TIEZZI, F.; FRANZLUEBBERS, A. J. Tree species effects on understory forage productivity and microclimate in a silvopasture of the Southeastern USA. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 295, 2020. DOI: <https://doi-org/10.1016/j.agee.2020.106917>

CELMELI, T.; SARI, H. C. D.; ADAK, A.; EKER, T.; TOKER, C. The Nutritional Content of Common Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Landraces in Comparison to Modern Varieties. *Agronomy*, v.8, n.9, p. 2-9, 2018. DOI: <https://doi-org/10.3390/agronomy8090166>.

CERA, J. **Relatório sobre a estiagem na safra 2019/2020**. 2020. Disponível em: < <https://irga.rs.gov.br/relatorio-sobre-a-estiagem-da-safra-2019-2020>>. Acesso em: 15 jan. 2021.

CHEN, F.; ZHOU, W.; YIN, H.; LUO, X.; CHEN, W.; LIU, X.; WANG, X.; MENG, Y.; FENG, L.; QIN, Y.; ZHANG, C.; YANG, F.; YONG, T.; WANG, X.; LIU, J.; DU, J. LIU, W.; YANG, W.; SHU, K. Shading of the mother plant during seed development promotes subsequent seed germination in soybean. *Journal of Experimental Botany*, v. 71, n. 6 p. 2072-2084, 2020. DOI: <https://doi-org/10.1093/jxb/erz553>.

CIGEL, C.; SOUZA, C. A.; KANDLER, R.; SILVA, E. R.; COELHO, C. M. M. Physiological quality of soybean seeds produced under shading. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v. 22, n. 1, p. 1-8, 2023. DOI: <https://doi-org/10.5965/223811712212023001>

COELHO, D. S.; MARQUES, M. A. D.; SILVA, J. A. B.; GARRIDO, M. S.; CARVALHO, P. G. S. Respostas fisiológicas em variedades de feijão caupi submetidas a diferentes níveis de sombreamento. *Revista Brasileira De Biociências*, v. 12, n. 1, p. 14-19, 2014.

COELHO, R. da S.; FUGITA, G. S.; REDISS, W. B.; TIMM, N. da S.; EICHOLZ, E. D.; ELIAS, M. C.; OLIVEIRA, M. de. Propriedades físicas de diferentes grãos de milho. Embrapa Agricultura Temperado. *In: VII CONFERÊNCIA BRASILEIRA DE PÓS-COLHEITA*, 43. 2018, Londrina. **Anais** [...]. Londrina, Associação Brasileira de Pós Colheita, 2018. 6p.

COLBACH, N.; MUNIER-JOLAIN, N.; DUGUÉ, F.; GARDARIN, A.; STRBIK, F.; MOREAU, D. The response of weed and crop species to shading. How to predict their morphology and plasticity from species traits and ecological indexes? *European Journal of Agronomy*, v. 121, 2020. DOI: <https://doi-org/10.1016/j.eja.2020.126158>

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **6º levantamento - safra 2022/23 – Brasília**: CONAB. 2023. Disponível em: <http://www.CONAB.gov.br>. Acesso em 11 out. 2024.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO (CONAB). **Grãos Safra 2023/24 – 3º levantamento. 2024**. Disponível em: <http://www.CONAB.gov.br>. Acesso em 21 out. 2024

COSTA, A. S. V.; SILVA, M. B. Sistemas de consórcio milho feijão para a região do VALE DO Rio Doce, Minas Gerais. **Ciência e agrotecnologia**, v. 32, n. 2, p. 663-667, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542008000200050>

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO (CQFS-RS/SC). **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. Porto Alegre: SbcS/Nrs, 2016.

CRUZ, J. C.; RAMALHO, M. A. P.; SALLES, L. T. G. Utilização de cultivares de milho prolífico no consórcio milho-feijão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 22, n. 2, p. 203-211, 1987.

COMISSÃO TÉCNICA SUL-BRASILEIRA DE FEIJÃO (CTSBF). **Informações técnicas para o cultivo de feijão na Região Sul brasileira**. Florianópolis: Epagri, 2012.

CUNHA, A. R.; VOLPE, C. A. Relações radiométricas no terço superior da copa de cafeeiro. **Bragantia**, v.69, n.2, p.263-271, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052010000200002>

DARTORA, J.; ASSMANN, J. M.; FERNANDES, W. C.; MATT, J. M.; QUINAGLIA, G. D. P.; KIYOTA, N. Produção de cultivares de feijão agroecológico nas entrelinhas de um sistema agroflorestal. **Cadernos de Agroecologia**, v. 17, n. 3, 2022.

DARYANTO, S.; FU, B.; ZHAO, W.; WANG, S.; JACINTHE, P. A.; WANG, L. Ecosystem service provision of grain legume and cereal intercropping in Africa. **Agricultural Systems**, v 178, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102761>

DEISS, L.; MORAES, A.; PELISSARI, A.; NETO, F. S.; OLIVEIRA, E. B.; SILVA, V. P. Oat tillering and tiller traits under different nitrogen levels in an eucalyptus agroforestry system in Subtropical Brazil. **Ciência Rural**, v.44, n.1, p.71-78, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782014000100012>

DIAS, M. A. N. MONDO, V. H. V.; CICERO, S. M. Vigor de sementes de milho associado à mato-competição. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 32, n. 2 p. 93-101, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0101-31222010000200011>

DINESH, D.; CAMPBELL, B. M.; BONILLA-FINDJI, O.; RICHARDS, M. **10 best bet innovations for adaptation in agriculture: A supplement to the UNFCCC NAP Technical Guidelines**. Holanda: CCAFS, 2017.

DOEBLEY, J. The Genetics of Maize Evolution. **Annual Review of Genetics**, v. 38, n. 1, p. 37–59, 2004. DOI: <https://doi.org/10.1146/annurev.genet.38.072902.092425>

DUAN, Z. P.; GAN, Y. W.; WANG, B. J.; HAO, X. D.; XU, W. L.; ZHANG, W.; LI, L. H. Interspecific interaction alters root morphology in young walnut/wheat agroforestry systems in northwest China. **Agroforestry Systems**, v. 93, p. 419-434, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0133-2>

DUFFY, C.; TOTH, G. G.; HAGAN, R. P. O.; MCKEOWN, P. C.; RAHMAN, S. A.; WIDYANINGSIH, Y.; SUNDERLAND, T. C. H.; SPILLANE, C. Agroforestry contributions to smallholder farmer food security in Indonesia. **Agroforestry Systems**, v. 95, p. 1109-1124, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00632-8>

DURIGON, A.; EVERS, J.; METSELAAR, K.; LIER, W.J.V. Water stress permanently alters shoot architecture in *Common bean* plants. **Agronomy**, v. 9, n. 160, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy9030160>

EICHOLZ, E. D.; REDISS, W. B.; BEVILAQUA, G. A. P.; ANTUNES, I. F.; ALBULQUERQUE, T. S.; SCHIAVON, J. S. **BRS 015 Farináceo Branco: Práticas de Manejo e Beneficiamento para Certificação Orgânica de Grãos e Sementes**. Embrapa: Pelotas, 2021.

ELLI, E. F.; CARON, B. O.; PAULA, G. M.; ELOY, E.; SCHMIDT, D. Ecofisiologia da cana-de-açúcar no sub-bosque de canafístula em arranjos de sistema agroflorestal. **Comunicata Scientiae**, v.7, n.4, p. 464-472, 2016. DOI: <https://doi.org/10.14295/CS.v7i4.1538>

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5 ed. Brasília: Embrapa, 2018.

FARRÉ, I.; FACI, J. M. Comparative response of maize (*Zea mays* L.) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) to irrigation deficit in a Mediterranean environment. **Agricultural Water Management**, v. 83, n. 1-2, p. 135-145, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.interval.2005.11.001>

FERNANDEZ, F. C.; GEPTS, P; LOPEZ, G. **Etapas de desarrollo de la planta de frijol común**. Colômbia: Centro Internacional de Agricultura Tropical, 1986.

FERREIRA, A. C. **Fisiologia e morfologia de plantas de feijão sob deficiência hídrica**. 2017. 62 p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2017.

FERREIRA, E. B.; CAVALCANTI, P. P.; NOGUEIRA, D. A. **ExpDes.pt: Pacote Experimental Designs**. 2021. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ExpDes.pt>. Acesso em 21 jun. 2023.

FERREIRA, H. C. O. **Cultivo superprecoce de feijão melhora produtividade e resistência a pragas**. 2020. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/54800345/cultivo-superprecoce-de-feijao-melhora-produtividade-e-resistencia-a-pragas>. Acesso em 11 out. 2024.

FERREIRA JUNIOR, R. A.; SOUZA, J. L.; TEODORO, I.; LYRA, G. B.; SOUZA, R. C.; NNETO, R. A. A. Eficiência do uso da radiação em cultivos de milho em Alagoas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.3, p.322–328, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662014000300012>

FISCHER, J.; BÖHM, H.; HEB, J. Maize-bean intercropping yields in Northern Germany are comparable to those of pure silage maize. **European Journal of Agronomy**, v. 112, p. 125947, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125947>

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Crops**. 2021. Disponível em: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/SC>. Acesso em 24 out. 2024.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAOSTAT). **Crops and livestock products**. 2022. Disponível em: <https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL>. Acesso em 11 out. 2024.

GUAN, D.; AL-KAISI, M.; ZHANG, Y.; DUAN, L.; TAN, W.; ZHANG, M.; LI, Z. Tillage practices affect biomass and grain yield through regulating root growth, root-bleeding sap and nutrients uptake in summer maize. **Field Crops Research**, v. 157, p. 89-97, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2013.12.015>

HABTE, A.; KASSA, M.; SISAY, A. Maize (*Zea mays* L.) - common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) intercropping response to population density of component crop in wolaita zone Southern Ethiopia. **Journal of Natural Sciences Research**, v. 6, p. 69-74, 2016.

HALLAL, M. O. C.; SCHÖFFEL, E. R.; BRIXNER, G. F.; RADÜNZ, A. L. Ajuste de uma equação de estimativa da evapotranspiração de referência para Pelotas – RS. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 19, n. 2, p. 147-156, 2014.

HEINEMANN, A. B.; RAMIREZ-VILLEGAS, J.; STONE, L. F.; DIDONET, A. D. Climate change determined drought stress profiles in rainfed common bean production systems in Brazil. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 246, p. 64-77, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2017.06.005>

HEINEMANN, A. B.; STONE, L. F.; SILVA, S. C. Feijão. In: **Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo agro 2017**. 2017. Disponível em: <https://censos.ibge.gov.br/agro/2017>. Acesso em 30 mar. 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Produção agrícola - lavoura temporária**. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/pelotas/pesquisa/14/10193>. Acesso em 11 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **PAM – Produção Agrícola Municipal**. 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/agricultura-e-pecuaria/9117-producao-agricola-municipal-culturas-temporarias-e-permanentes.html?utm_source=landing&utm_medium=explica&utm_campaign=producao_agropecuaria&t=resultados. Acesso em 11 out. 2024.

INAGAKI, M. N.; JUNQUEIRA, C. P.; BELON, P. P. R. Desafios da produção de soja orgânica como determinante à implantação de seu cultivo para fins comerciais na região oeste do Paraná. **Revista de Gestão e Sustentabilidade Ambiental**, v. 7, n. 1, p. 682-699, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.19177/rgsa.v7e12018682-699>

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Provisional state of the global climate 2023**. 2023. Disponível em: <https://wmo.int/files/provisional-state-of-global-climate-2023>. Acesso em 8 out. 2024.

JACINTO JUNIOR, S. G.; LUCENA, E. M. P. Alterações morfofisiológicas e metabólitos secundários produzidos por feijoeiros submetidos ao estresse hídrico: uma revisão integrativa. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 14, 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36506>

JENSEN, E. S.; CARLSSON, G.; HAUGGAARD-NIELSEN, H. Intercropping of grain legumes and cereals improves the use of soil N resources and reduces the requirement for synthetic fertilizer N: A global-scale analysis. **Agronomy Sustainable**, v. 40, n.5, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13593-020-0607-x>

JU, Q.; OUYANG, F.; GU, S.; QIAO, F.; YANG, Q.; QU, M.; GE, F. Strip intercropping peanut with maize for peanut aphid biological control and yield enhancement. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 286, n. 1 p. 106682, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106682>

JUSTINO, L. F.; ALVES JÚNIOR, J.; BATTISTI, R.; HEINEMANN, A. B.; LEITE, C. V.; EVANGELISTA, A. W. P.; CASAROLI, D. Assessment of economic returns by using a central pivot system to irrigate common beans during the rainfed season in Central Brazil. **Agricultural Water Management**, v. 224, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105749>

KANDASAMY, S.; WEERASURIYA 1, N.; GRITSIOUK, D.; PATTERSON, G.; SALDIAS, S.; ALI, S.; LAZAROVITS, G. Size variability in seed lot impact seed nutritional balance, seedling vigor, microbial composition and plant performance of common corn hybrids. **Agronomy**, v. 10, n. 157, p. 1-17, 2020. DOI: 10.3390/agronomy10020157

KANZLER, M.; BÖHM, C.; MIRCK, J.; SCHMITT, D.; VESTE, M. Microclimate effects on evaporation and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield within a temperate. **Agroforestry System**, v. 93, p. 1821-1841, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0289-4>

KASSAMBARA, A. **ggpubr**: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots. 2023. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr>. Acesso em 12 set. 2024.

KASSAMBARA, A.; MUNDT, F. **factoextra**: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. 2020. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>. Acesso em 12 set. 2024.

KERMAH, M.; FRANKE, A. C.; AHIABOR, B. D. K.; ADJEI-NSIAH, S.; ABAIDOO, R. C.; GILLER, K. E. Legume–maize rotation or relay? options for ecological intensification of smallholder farms in the Guinea Savanna of northern Ghana. **Experimental Agriculture**, v. 55, n. 5, p. 1-19, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0014479718000273>

KLEINPAUL, I. S.; SCHUMACHER, M. V.; VIERA, M.; NAVROSKI, M. C. Plantio misto de *Eucalyptus urograndis* e *Acacia mearnsii* em sistema agroflorestal: I - produção de biomassa. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 4, p. 621-627, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050982420>

KRZYZANOWSKI, F.C.; FRANÇA NETO, B. **Vigor de sementes**. Informativo Abrates, v. 11, n. 3, p. 81-84, 2001.

KUNZ, J. H.; BERGONCI, J. I.; BERAMASCHI, H.; DALMAGO, G. A.; HECKLER, B. M. M.; COMIRAN, F. Uso da radiação solar pelo milho sob diferentes preparos do solo, espaçamento e disponibilidade hídrica. **Pesquisa Agropecária Brasileira**, v. 42, n. 11, p. 1511-1520, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007001100001>

LACERDA, C. F.; CARVALHO, C.M. DE; VIEIRA, M. R.; NOBRE, J. G. A.; NEVES, A. L. R.; RODRIGUES, C. F. Análise de crescimento de milho e feijão sob diferentes condições de sombreamento. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 5, n. 1, p. 18-24, 2010. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v5i1a485>

LANDAU, E. C.; MAGALHÃES, P. C.; GUIMARÃES, D. P. **Milho**: relações com o clima. 2021. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/milho/pre-producao/caracteristicas-da-especie-e-relacoes-com-o-ambiente/relacoes-com-o-clima> 2021. Acesso em 5 fev. 2024.

LANGNER, J. A.; LAGO, I.; REINIGER, L. R. S.; PETRY, M. T.; STRECK, N. A.; DURIGON, A.; POHLMANN, V.; FREITAS, C. P. O.; SLIM, T.; SILVA, S. D. Water-deficit tolerance of landrace and improved corn genotypes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.56, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2021.v56.02627>

LANGNER, J. A. **Milho crioulo e melhorado: tolerância a deficiência hídrica na perspectiva da segurança e soberania alimentar**. 2018. 96 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola), Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, Santa Maria, 2018.

LARCHER, W. **Ecofisiologia vegetal**. São Carlos: Rima, 2000.

LATATI, M.; AOUICHE, A.; TELLAH, S.; LARIBI, A.; BENLAHRECH, S.; KACI, G.; OUAREM, F.; OUNANE, S. M. Intercropping maize and common bean enhances microbial carbon and nitrogen availability in low phosphorus soil under Mediterranean conditions. **European Journal of Soil Biology**, v. 80, p. 9-18, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2017.03.003>

LIMA, L. S. Lei de Lambert–Beer. **Revista Ciência Elementar**, v. 1, n. 1, 2013. DOI: <https://doi.org/10.24927/rce2013.047>

LIMA, F. J. F.; ROCHA, L. A.; TORRES, N. S.; SILVA, A. A. M.; NASCIMENTO, M. M.; LIMA, M. S.; FERREIRA, A. B. Desempenho morfológico de begônia (*Begonia cucullata* willd.) sob diferentes níveis de intensidade luminosa. **Scientia Naturalis**, v. 3, n. 5, p. 2358-2365, 2021. DOI: <https://doi.org/10.29327/269504.3.5-28>

LIMA, B. C.; DUDEK, G.; CHAVES, M. H. M.; MARTINS, A. G.; MISSIO, V. C.; MISSIO, R. F. Diversidade genética em acessos de milho crioulo. **Brazilian Journal of Development**, v.6, n.10, p. 82712-8226, 2020. DOI: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n10-631>

LIU, X.; RAHMAN, T.; SONG, C.; SU, B.; YANG, F.; YONG, T.; WU, Y.; ZHANG, C.; YANG, W. Changes in light environment, morphology, growth and yield of soybean in maize-soybean intercropping systems. **Field Crops Research**, v. 200, p. 38-46, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2016.10.003>

LUCAS, E. O.; BERNARDO, J. T.; MESQUITA, M. O.; SCHMITZ, A. Contaminação dos recursos hídricos por agrotóxicos na região central do Rio Grande do Sul, Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, 2020. DOI: <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v9i9.7128>

MACKAY, D. C.; EAVES, C. A. The influence of irrigation treatments on yields and fertilizer utilization by sweet corn and snap beans. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 42, n. 2, p. 219-228, 1962. DOI: <http://dx.doi.org/10.4141/cjps62-032>

MAGALHÃES, C. A. S.; PEDREIRA, B. C.; TONINI, H.; FARIAS NETO, A. L. Crop, livestock and forestry performance assessment under different production systems in the north of Mato Grosso, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 93, p. 2085-2096, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0311-x>

MAHALLATI, M. N.; KOOCHEKI, A.; MONDANI, F.; FEIZI, H.; AMIRMORADI, S. Determination of optimal strip width in strip intercropping of maize (*Zea mays* L.) and bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Northeast Iran. **Journal of Cleaner Production**, v. 106, p. 343-350, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.099>

MANFRON, P. A.; BACCHI, O. O. S.; NETO, D. D.; PEREIRA, A. R.; MEDEIROS, S. L. P.; PILAU, F. G. Modelo da profundidade efetiva do sistema radicular na cultura de milho em função de graus-dia acumulados. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 11, p. 327-332, 2003.

MARIN, A. M. P.; MENEZES, R. S. C.; SILVA, E. D.; SAMPAIO, E. V. S. B. Efeito da *Gliricidia sepium* sobre nutrientes do solo, microclima e produtividade do milho em sistema agroflorestral no agreste paraibano. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 30, n. 3, p. 555-564, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000300015>

MARTINELLI, G. C.; SCHLINDWEIN, M. M.; PADOVAN, M. P.; GIMENES, R. M. T. Decreasing uncertainties and reversing paradigms on the economic performance of agroforestry systems in Brazil. **Land Use Policy**, v. 80, p. 274-286, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2018.09.01>

MARTIN-GUAY, M. O.; PAQUETTE, A.; DUPRAS, J.; RIVEST, D. The new Green Revolution: Sustainable intensification of agriculture by intercropping. **Science of the Total Environment**, v. 615, n. 15, p. 767-772, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.10.024>

MARTINS, J. C. R.; MENEZES, R. S. C.; SAMPAIO, E. V. S. B.; SANTOS, A. F.; NAGAI, M. A. Produtividade de biomassa em sistemas agroflorestrais e tradicionais no Cariri Paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, v. 17, p. 581-587, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000600002>

MARTORANO, L. G. **Padrões de resposta da soja a condições hídricas do sistema solo-planta-atmosfera, observados no campo e simulados no sistema de suporte à decisão DSSAT**. 2007. 151 f. Tese (Doutorado em fitotecnia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

MASSON-DELMOTTE, V.; ZHAI, P.; PÖRTNER, H. O.; ROBERTS, D.; SKEA, J.; SHUKLA, P. R.; PIRANI, A.; MOUFOUMA-OKIA, W.; PÉAN, C.; PIDCOCK, R.; CONNORS, S.; MATTHEWS, J. B. R.; CHEN, Y.; ZHOU, X.; GOMIS, M. I.; LONNOY, E.; MAYCOCK, T.; TIGNOR, M.; WATERFIELD, T. **Global warming of 1,5°C IPCC**. 2018. Disponível em: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/2/2022/06/SR15_Full_Report_LR.pdf. Acesso em 21 jun. 2023.

MATZENAUER, R.; RADIN, B.; MALUF, J. R. T. O fenômeno ENOS e o regime de chuvas no Rio Grande do Sul. **Agrometeoros**, v.2 5, n. 2, p. 323-331, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.v25i2.25510>

MEAD, R.; WILLEY, R. W. The Concept of a 'Land Equivalent Ratio' and Advantages in Yields from Intercropping. **Experimental Agriculture**, v. 16, n. 3, p. 217-228, 1980. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0014479700010978>

MENDES, M. M. S.; LACERDA, C. F.; CAVALCANTE, A. C. R.; FERNANDES, F. E. P.; OLIVEIRA, T. S. Desenvolvimento do milho sob influência de árvores de pau branco em sistema agrossilvipastoril. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.48, n.10, p.1342-1350, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2013001000005>

MERLE, I.; VILLARREYNA-ACUÑA, R.; RIBEYRE, F.; ROUPSARD, O.; CILAS, C.; AVELINO, J. Microclimate estimation under different coffee-based agroforestry systems using full-sun weather data and shade tree characteristics. **European Journal of Agronomy**, v. 132, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126396>

MICCOLIS, A.; PENEIREIROS, F. M.; VIEIRA, D. L. M.; MARQUES, H. R.; HOFFMANN, M. R. M. Restoration through agroforestry: options for reconciling livelihoods with conservation in the cerrado and caatinga biomes in Brazil. **Experimental Agriculture**, v. 55, n. 1, p. 208-225, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0014479717000138>

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Zoneamento agroclimático do Rio Grande do Sul**. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/riscos-seguro/programa-nacional-de-zoneamento-agricola-de-risco-climatico/portarias/safra-vigente/rio-grande-do-sul/word/PORTN188MILHO1SAFRARS.pdf>. Acesso em 05 nov. 2024.

MIORINI, T. J. J.; SAAD, J. C. C.; MENEGALE, M. L. Supressão de água em diferentes fases 401 fenológicas do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Irriga**, v.16, p.360-368, 2011. DOI: <https://doi.org/10.15809/irriga.2011v16n4p360>.

MONSI, M.; SAEKI, T. The lighy fator in plant communities and its significance for dry matter production. **Japanese journal of botany**, v. 14, p. 22-52, 1953.

MONTEITH, J. L. Climate and the efficiency of crop production in Britain *Philos. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, v. 281, p. 277-294, 1977. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.1977.0140>

MONTGOMERY, E. G. Correlation studies in corn. **Nebraska Agricultural Experiment Station Annual Report**, v. 24, p. 108-159, 1911.

MOTA, V. A.; SANTOS, L. D. T.; SANTOS JUNIOR, A.; MACHADO, V. D.; SAMPAIO, R. A.; OLIVERA, F. L. R. Dinâmica de plantas daninhas em consórcio de sorgo e três forrageiras em um sistema de integração lavoura-

pecuária-floresta. **Planta Daninha**, v. 28, n. 4, p. 759-768, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582010000400008>

MÜLLER, A. G.; BERGAMASCHI, H. Eficiências de interceptação, absorção e uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo milho (*Zea mays* L.), em diferentes disponibilidades hídricas e verificação do modelo energético de estimativa da massa seca acumulada. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 1, p. 27-33, 2005.

MÜLLER, A. G.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J. I.; RADIN, B.; FRANÇA, S.; SILVA, M. I. G. Estimativa do índice de área foliar do milho a partir da soma de graus-dia. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 13, n. 1, p. 65-71, 2005.

NASSARY, E. K.; BAIJUKYA, F.; NDAKIDEMI, P. A. Productivity of intercropping with maize and common bean over five cropping seasons on smallholder farms of Tanzania. **European Journal of Agronomy**, v. 113, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125964>

NASSARY, E. K.; BAIJUKYA, F.; NDAKIDEMI, P. A. Productivity of intercropping with maize and common bean over five cropping seasons on smallholder farms of Tanzania. **European Journal of Agronomy**, v. 113, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2019.125964>

NAUDIN, C.; VAN DER WERF, H. M. G.; JEUFFROY, M. H.; CORREHELLOU, G. Life cycle assessment applied to pea-wheat intercrops: a new method for handling the impacts of co-products. **Journal of Cleaner Production**, v. 73, p. 80-87, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.12.029>

NDOLI, A.; BAUDRON, F.; SCHUT, A. G. T.; MUKURALINDA, A.; GILLER, K. E. Disentangling the positive and negative effects of trees on maize performance in smallholdings of Northern Rwanda. **Field Crops Research**, v. 213, p. 1-11, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.07.020>

NICODEMO, M. L. F.; CASTIGLIONI, P. P.; PEZZOPANE, M.; THOLON, P.; CARPANEZZI, A. A. Reducing competition in agroforestry by pruning native trees. **Revista Árvore**, v.40, n.3, p.509-518, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000300014>

NIED, A. H. **Parâmetros bioclimáticos e respostas da canola ao ambiente físico**. Tese Doutorado em Fitotecnia. 2013. 135 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

NIELSEN, R. L. **Kernel set scuttlebutt**. 2020. Disponível em: <http://www.kingcorn.org/news/timeless/KernelSet.html>. Acesso em 05 nov. 2024.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION (NOAA). **Historical El Nino/La Nina episodes (1950-present)**. 2024. Disponível em:

https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php. Acesso em 1 ago. 2023.

NOVELINI, L. **Disponibilidade da radiação solar e eficiência de cultivos consorciados de milho safrinha e feijão**. 2018. 70 f. Tese (Doutora em Agronomia), Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2018.

OLIVEIRA, A. C. S.; COELHO, F. C.; CREVELARI, J. A.; SILVA, I. F.; RUBIM, R. F. Fitossociologia de plantas daninhas em monocultivo de milho e em consórcio com diferentes Fabaceae. **Revista Ceres**, v. 61, n.5, p. 643-651, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201461050007>

OLLINAH, O. I.; KRÖGER, M. Agroforestry transitions: The good, the bad and the ugly. **Journal of Rural Studies**, v. 82, p. 210-221, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2021.01.016>

PACIULLO, D. S. C.; GOMIDE, C. A. M.; CASTRO, C. R. T.; FERNANDES, P. B.; MULLER, M. D.; PIRES, M. F. A.; FERNANDES, P. B.; MULLER, M. D.; PIRES, M. F. A.; FERNANDES, E. N.; XAVIER, D. F. Características produtivas e nutricionais do pasto em sistema agrossilvipastoril, conforme a distância das árvores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.10, p.1176-1183, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2011001000009>

PADILHA, M. S.; COELHO, C. M. M.; ANDRADE, G. C. Seed reserve mobilization evaluation for selection of highvigor common bean cultivars. **Revista Caatinga**, v. 33, n. 4, p. 927-935, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-21252020v33n407rc>

PALUDO, R.; COSTABEBER, J. A. Sistemas agroflorestais como estratégia de desenvolvimento rural em diferentes biomas brasileiros. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 7, n. 2, p. 63-76, 2012. DOI: <https://doi.org/10.33240/rba.v7i2.49333>

PEDERSEN, T. **patchwork: The Composer of Plots_**. 2022. Disponível em: <https://CRAN.R-project.org/package=patchwork> . Acesso em 12 jan. 2023.

PEDROSO, D. O.; SILVA, B. F.; AGOSTINETTO, L.; EVARISTO, A.; SIEGLOCH, A. E. Manejo de agrotóxicos no cultivo de grãos e sua relação com a saúde e ambiente. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 10, 2020. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8282>

PÉRES-MARIN, A. M.; MENEZES, S. C.; SALCEDO, I. H. Produtividade de milho solteiro ou em aléias de gliricídia adubado com duas fontes orgânicas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 669-677, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2007000500009>

PEZZOPANE, J. R. M.; BERNARDI, A. C. C.; BOSI, C.; OLIVEIRA, P.; MARCONATO, M. H.; PEDROSO, A.; ESTEVES, S. N. Forage productivity and nutritive value during pasture renovation in integrated systems. **Agroforest Systems**, v. 93, n.2, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0149-7>

PEZZOPANE, J. R.; BONANI, W. L.; BOSI, C.; ROCHA, E. L. F.; BERNARDI, A. C. C.; OLIVEIRA, P. P. A.; PEDROSO, A. F. Reducing competition in a crop-livestock-forest integrated system by thinning eucalyptus trees. **Experimental Agriculture**, v. 56, n. 4, p. 574-586, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0014479720000162>

PEZZOPANE, J. R. M.; BOSI, C.; BERNARDI, A. C. C.; MULLER, M. D.; OLIVEIRA, P. P. A. Managing eucalyptus trees in agroforestry systems: Productivity parameters and PAR transmittance. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 312, p.107350, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107350>

PIAS, O. H. C.; LOWE, M. A.; DAMIAN, J. M.; SANI, A. L.; TREVISAN, R. Componentes de rendimento e produtividade de híbridos de milho em função de doses de NPK e de deficit hídrico em estádios fenológicos críticos. **Revista De Ciências Agroveterinárias**, v.16, n.4, p. 422-432, 2017. DOI: DOI: <http://dx.doi.org/10.5965/223811711642017422>

PINTO, C. M.; SIZENANDO FILHO, F. A.; CYSNE, J. R. B.; PITOMBEIRA, J. B. Produtividade e índices competição da mamona consorciada com gergelim, algodão, milho e feijão caupi. **Revista Verde**, v. 6, p. 75-85, 2011.

POHLMAN, V.; LAGO, I.; LOPES, S. J.; ZANON JUNIOR, A.; STRECK, N. A.; MARTINS, J. T. S.; CAYE, M.; BITTENCOURT, P. N.; SANTANA, V. F. K.; PORTALANZA, D. Water deficit tolerance of bean cultivars. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.57, 2022b. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2022.v57.02479>

POHLMANN, V.; LAZZARI, M.; KNIES, A. E.; FERNANDES, D. M.; LUDWIG, F. Foliar silicon in tolerance to water deficit in beans. **Ciência Agrícola**, v. 20, n. 1, p. 25-32, 2022a. DOI: <https://doi.org/10.28998/rca.v20i1.11241>

POHLMANN, V.; LOPES, S. J.; LAGO, I.; MARTINS, J. T. S.; ROSA, C. A.; CAYE, M.; PORTALANZA, D. Estimation of common bean (*Phaseolus vulgaris*) leaf area by a non-destructive method. **Semina: ciências agrárias**, Londrina, 2021. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2021v42n4p2163>

POHLMANN, V.; SCHÖFFEL, E. R.; EICHOLZ, E. D.; GUARINO, E. S. G.; SCHEER, G. R.; FRANZ, E. V.; MOLINA, A. R. Corn and bean growth and production in agroforestry systems. **Agroforest Systems**, v. 98, p. 1-17, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10457-024-00959-y>

POMPEU, R. C. F. F.; TONUCCI, R. G.; BUENO, L. G.; CRUZ, G. S.; MARANGUAPE, J. S.; ANDRADE, H. A. F.; SOUZA, H. A. Impact of organic fertilization on establishing an agroforestry system in a semi-arid Brazilian region. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 44, n. 4, p. 1375-1392, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2023v44n4p1375>

PRASANNA, B. M. Diversity in global maize germplasm: characterization and utilization. **Journal of Biosciences**, v. 37, n. 5, p. 843-55, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12038-012-9227-1>.

PROCÓPIO, S. O.; SANTOS, J. B.; SILVA, A. A.; COSTA, L. C. Desenvolvimento foliar das culturas da soja e do feijão e de plantas daninhas. **Ciência Rural**, v. 33, n. 2, p. 207-211, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-84782003000200005>

QUEIROZ, L. A. P.; GOULART, A. C.; GOULART, S. M.; SANTOS, J. P. V. Prognóstico do potencial da contaminação hídrica superficial e subterrânea dos principais agrotóxicos comercializados no Estado de Goiás. **Águas Subterrâneas**, v. 37, n. 1, 2023. DOI: <https://doi.org/10.14295/ras.v37i1.30191>

R CORE TEAM. **The R Project for Statistical Computing**. 2020. Disponível em: <https://www.r-project.org/>. Acesso em 04 abr. 2021.

RAAI, M. N.; ZAIN, N. A. M.; OSMAN, N.; REJAB, N. A.; SAHRUZAINI, N. A.; CHENG, A. Effects of shading on the growth, development and yield of winged bean (*Psophocarpus tetragonolobus*). **Ciência Rural**, v. 50, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190570>

RADIN, B. **Eficiência de uso da radiação fotossinteticamente ativa pelo tomateiro cultivado em diferentes ambientes**. 2022. 127 f. Tese (Doutorado em Fitotecnia), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

RADÜNZ, A. L.; SCHÖFFEL, E. R.; HALLAL, M. O. C.; BRIXNER, G. F. Efeito da época de poda e da desfolha na interceptação de radiação solar na videira Bordô. **Bragantia**, v. 72, n. 4, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/brag.2013.048>

RANA, J.; PAUL, J. Consumer behavior and purchase intention for organic food: A review and research agenda. **Journal of Retailing and Consumer Services**, v. 38, p. 157-165, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jretconser.2017.06.00>

RAZA, M. A.; GUL, H.; WANG, J.; YASIN, H. S.; QIN, R.; KHALID, M. H. B.; NAEEM, M.; FENG, L.Y.; IQBAL, N.; GITARI, H.; AHMAD, S.; BATTGLIA, M.; ANSAR, M.; YANG, F.; YANG, W. Land productivity and water use efficiency of maize-soybean strip intercropping systems in semi-arid areas: A case study in Punjab Province, Pakistan. **Journal of Cleaner Production**, v. 308, n. 25, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127282>

REUNIÃO TÉCNICA SUL-BRASILEIRA DE PESQUISA DE MILHO E SORGO (MISOSUL). **Informações técnicas para o cultivo de milho e sorgo na região subtropical do Brasil: safras 2023/24 e 2024/25**. Pelotas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2024.

REYNOLDS, P. E.; SIMPSON, J. A. THEVATHASAN, N. V.; GORDON, A. M. Effects of tree competition on corn and soybean photosynthesis, growth, and yield in a temperate tree-based agroforestry intercropping system in southern Ontario, Canada. **Ecological Engineering**, v. 29, n. 4, p. 362-371, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.09.024>

RIBEIRO, D.; MENDEZ, M. E. G.; SCHÖFFEL, E. R.; BÖHMER, C. R. K.; PAULA, V. A.; FRAGA, D. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa para a produção de fitomassa da cultura da abóbora italiana em ambiente protegido. *In: XV CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA*, 15., 2007, Aracaju. **Anais [...]**. Aracaju: SBAGRO, 2007. 5p.

RIGHI, C. A.; BERNARDES, M. S. Disponibilidade de energia radiante em um sistema agroflorestal com seringueiras: produtividade do feijoeiro. **Bragantia**, v. 67, n. 2, p. 533-540, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052008000200031>

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. **How a corn plant develops**. Iowa: Special Bulletin, 1993.

RODRIGUEZ, C.; CARLSSON, G.; ENGLUND, J. E.; FLOHR, A.; PELZER, E.; JEUFFROY, M. H.; MAKOWSKI, D.; JENSEN, E. S. Grain legume-cereal intercropping enhances the use of soil-derived and biologically fixed nitrogen in temperate agroecosystems. A meta-analysis. **European Journal of Agronomy**, v. 118, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2020.126077>

RODRÍGUEZ, L.; SUÁREZ, J. C.; RODRIGUEZ, W.; ARTUNDUAGA, K. J.; LAVELLE, P. Agroforestry systems impact soil macroaggregation and enhance carbon storage in Colombian deforested Amazonia. **Geoderma**, v. 384, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.11481>

SABINO, G.; COSTA, L.; ANDRADE, T.; TEIXEIRA, J.; ARAÚJO, G.; ACOSTA, A. L.; CARVALHEIRO, K.; GIANNINI, T. C. Status and trends of pollination services in Amazon agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 335, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2022.108012>

SANTOS, D. S.; MONTEIRO, S. S.; PEREIRA, E. M.; MARINI, F. S.; VASCONCELLOS, A.; LIMA, J. F. Composição centesimal de milho Crioulo coletado em localidades do estado da Paraíba. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.13, n. 3, p. 308-312, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v13i3.5628>

SANTOS, M. J. C.; PAIVA, S. N. Os sistemas agroflorestais como alternativa econômica em pequenas propriedades rurais: estudo de caso. **Ciência Florestal**, v. 12, n. 1, p. 135-141, 2002. DOI: <https://doi.org/10.5902/198050981707>

SANTOS, J. C.; SANTOS, M. I. G. Consequências do uso de agrotóxicos na agricultura: uma revisão de literatura. **Pesquisa, Sociedade e**

Desenvolvimento, v. 10, 2023. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v12i10.43556>.

SCHEMBERGUE, A.; CUNHA, D. A.; CARLOS, S. M.; PIRES, M. V.; FARIA, R. M. Sistemas Agroflorestais como Estratégia de Adaptação aos Desafios das Mudanças Climáticas no Brasil. **Revista Economia e Sociologia Rural**, v. 55, n.1, p. 9-30, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/1234-56781806-94790550101>

SCHIEDECK, G.; EICHOLZ, E. D.; MACHADO, J. A.; EICHOLLZ, M. D.; REDISS, W. B. **Respostas produtivas de genótipos de milho cultivados sob práticas de manejo de base ecológica**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2021.

SCHMIDT, D.; CARON, B. O.; PILAU, J.; NARDINO, M.; ELLI, E. F. Morfoanatomia foliar de azevém no sub-bosque de espécies arbóreas em sistemas agroflorestais. **Revista Ceres**, v. 64, p. 368-375, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1590/0034-737X201764040005>

SCHUMUTZ, J.; MCCLEAN, P. E.; JACKSON, S. A. A reference genome for common bean and genome-wide analysis of dual domestications. **Nature Genetics**, v. 46, p. 707–713, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1038/ng.3008>

SCHÖFFEL, E. R.; SANTOS, P. M.; MACIEL, L. R.; HERTER, F. G.; TRENTIN, R. Fluxos de energia radiante em cultivos de amora - preta 'Tupy'. **Revista Caminhos de Geografia**. v. 22, n.80, p. 169–181, 2021. DOI: <https://doi.org/10.14393/RCG228054787>.

SCHÖFFEL, E. R.; BORGES, A. F.; NOVELINI, L.; SANTOS, P. M.; TRENTIN, R. Alterações micrometeorológicas com uso de cobertura plástica em cultivo de videira 'Niágara rosada'. **Revista Thema**, v.21, n.3, p. 903-919, 2022. DOI: <https://doi.org/10.15536/thema.V21.2022.903-919.2912>.

SCHÖFFEL, E. R.; VOLPE, C. A. Eficiência de conversão da radiação fotossinteticamente ativa interceptada pela soja para a produção de fitomassa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 9, n. 2, p. 241-249, 2001. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622012000500005>

SCHWARZ, J.; SCHNABEL, F.; BAUHUS, J. A. conceptual framework and experimental design for analysing the relationship between biodiversity and ecosystem functioning (BEF) in agroforestry systems. **Basic and Applied Ecology**, v. 55, p. 133-151, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.baae.2021.05.002>

LE, S.; JOSSE, J.; HUSSON, F. FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis. **Journal of Statistical Software**, v. 25, n. 1, p. 1-18, 2008. DOI: <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>

SEVERINO, F. J.; CARVALHO, S. J. P.; CHRISTOFFOLETI, P. J. Interferências mútuas entre a cultura do milho, espécies forrageiras e plantas daninhas em um sistema de consórcio: III - implicações sobre as plantas

daninhas. **Planta Daninha**, v. 24, n. 1, p. 53-60, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-83582005000400005>

SGARBOSSA, J.; ELLI, E. F.; SCHWERZ, F.; NARDINI, C.; CRISTO, E.; OLIVEIRA, D.; CARON, B. O. Morphology, growth and yield of black oats cultivated in agroforestry systems in southern Brazil. **Agricultural systems**, v. 184, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2020.102911>

SGARBOSSA, J.; ELLI, E. F.; SCHWERZ, F.; NARDINI, C.; KNAPP, F. M.; SCHMIDT, D.; DAL'COL LÚCIO, A.; CARON, B. O. Bean–soybean succession under full sun and in agroforestry systems: Impacts on radiation use efficiency, growth and yield. **Journal of Agronomy and Crop Science**, v. 207, n.2, p. 362-377, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1111/jac.12450>

SHABANOV, N.; GASTELLU-ETCHEGORRY, J. P. The stochastic Beer-Lambert-Bouguer law for discontinuous vegetation canopies. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, v. 214, p. 18-32, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2018.04.021>

SILVA, S.; SOUSA, A. C. P.; SILVA, C. S.; ARAÚJO, E. R.; SOARES, M. A. S. TEODORO, I. Parâmetros produtivos do milho sob déficit hídrico em diferentes fases fenológicas no semiárido brasileiro. **Irriga**, v.1, n. 1, p. 30-41, 2021. DOI: <https://doi.org/110.15809/irriga.2021v1n1p30-41>.

SILVA, S.C.; HEINEMANN, A. B. **Clima**. 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/en/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/clima>. Acesso em 22 jul. 2021.

SILVA, H.T. **Morfologia**. 2021. Disponível em: https://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Repositorio/CONTAG01_9_1311200215101.html. Acesso em 18 dez. 2021.

SILVA, T. R. B.; LEMOS, L. B.; CRUSCIOL, C. A. C. Produtividade e características tecnológicas de cultivares de feijão em resposta à calagem superficial em plantio direto. **Bragantia**, v.70, n. 1, p.196-205, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0006-87052011000100026>

SMETHURST, P. J.; HUTH, N. I.; MASIKATI, P.; SILESHI, G. W.; AKINNIFESI, F. K.; WILSON, J.; SINCLAIR, F. Accurate crop yield predictions from modelling tree-crop interactions in gliricidia-maize agroforestry. **Agricultural Systems**, v. 155, p. 70-77, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.04.008>

SONG, C.; SARPONG, C. K.; ZHANG, X.; WANG, W.; WANG, L.; GAN, Y.; YONG, T.; CHANG, X.; WANG, Y.; YANG, W. Mycorrhizosphere bacteria and plant-plant interactions facilitate maize P acquisition in an intercropping system. **Journal of Cleaner Production**, 314, n.10 p.127993, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127993>

SORATTO, R. P.; ARF, O.; RODRIGUES, R. A. F.; BUZETTI, S.; SILVA, T. B. Resposta do feijoeiro ao preparo do solo, manejo de água e parcelamento do

nitrogênio. **Acta Scientiarum: Agronomy**, v. 25, n. 1, p. 89-96, 2003. DOI: <https://doi.org/10.4025/actasciagron.v25i1.2453>

SUN, X.; HUANG, S. R.; AI, Y.; ZHANG, E. Z.; WANG, X. C.; DU, J. B.; YANG, W. Y. Comparative study on the different responses of maize photosynthesis to systemic regulation under light heterogeneity. **Plant Science**, v. 301, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.plantsci.2020.110666>

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013.

TANG, X.; ZHANG, C.; YU, Y.; SHEN, J.; VAN DER WERF, W. Intercropping legumes and cereals increases phosphorus use efficiency; a meta-analysis. **Plant Soil**, v. 460, p. 89-104, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04768-x>

TEIXEIRA, M. B.; COURA NETO, A. B.; PASTORE, U.; RANGEL FILHO, A. L. R. Vegetação. In: **Levantamento dos recursos naturais**. Rio de Janeiro: IBGE, 1986. p. 541-632.

TEIXEIRA, G. C. S.; STONE, L. F.; HEINEMANN, A. B. Eficiência do uso da radiação solar e índices morfofisiológicos em cultivares de feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 45, n. 1, p. 9-17, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1590/1983-40632015v4528297>

THAKUR, P.; THAKUR, C. L.; PRABHAKAR, M.; BHARDWAJ, D. R. Performance of *Phaseolus vulgaris* L. (var. shreya) under peach-based agroforestry system. **Indian Journal of Agroforestry**, v. 21, p. 69-75, 2019.

THE WORLD AGROFORESTRY CENTRE. **What is Agroforestry?** 2021. Disponível em: <https://www.worldagroforestry.org/about/agroforestry>. Acesso em 22 dez. 2021.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. **The water balance**. New Jersey: Drexel Inst Of Technology, 1955.

TIIBOLLA, L. B.; SCHWERZ, F.; SGARBOSSA, J.; ELLI, E. F.; NARDINI, C.; MEDEIROS, S. L. P.; SCHMIDT, D.; CARON, B. O. Effect of artificial shading on soybean growth and yield. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 14, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v14i4a6876>

TONINI, H.; MAGALHAES, C.A.S.; FARIA NETO, A.L. Technical thinning age of eucalyptus trees grown in crop-forest integration systems. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 54, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1678-3921.pab2019.v54.00648>

TORRES, C.M.M.E.; JACOVINE, L.A.G.; NETO, S.N.O.; BRIANEZI, D.; ALVES, E.B.B.M. Sistemas agroflorestais no Brasil: uma abordagem sobre a estocagem de carbono. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 79, p. 235-244, 2014. DOI: <https://doi.org/10.4336/2014.pfb.34.79.633>

TSUFAC, A. R.; AWAZI, N. P.; YERIMA, B. P. K. Characterization of agroforestry systems and their effectiveness in soil fertility enhancement in the south-west region of Cameroon. **Current Research in Environmental Sustainability**, v. 3, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crsust.2020.100024>

VANDERMEER, J. H. **The Ecology of Intercropping**. Cambridge: Cambridge University Press, 1989.

VARLET-GRANCHER, C. G.; GOSSE, M.; CHARTIER, H.; SINOQUET, R.; BONHOMME, J. M. Allirand Mise au point: rayonnement solaire absorbé ou intercepté par un couvert végétal. **Agronomie**, v.9, p. 419- 439, 1989. DOI: <https://doi.org/10.1051/agro:19890501>

VICENTE-SERRANO, S. M.; QUIRING, S. M.; PEÑA-GALLARDO, M.; YUAN, S.; DOMÍNGUEZ-CASTRO, F. A review of environmental droughts: Increased risk under global warming? **Earth-Science Reviews**, v. 201, n. 42, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102953>

WANG, D.; SUN, Y.; LIN, Y.; GAO, Y. Analysis of Light Environment under Solar Panels and Crop Layout. **Photovoltaic Specialist Conference**, p. 2048-2053, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1109/PVSC.2017.8521475>

WARNER, G. R.; MOURIKES, V. E.; NEFF, A. M.; BREHM, E.; FLAWS, J. A. Mechanisms of action of agrochemicals acting as endocrine disrupting chemicals. **Molecular and Cellular Endocrinology**, v. 15, n. 502, p. 110680, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mce.2019.110680>

WERNER, F.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; FRANCHINI, J. C.; FERREIRA, A. S.; AGUIAR E SILVA, M. A. de. Desempenho agrônômico de cultivares de soja em sistema agroflorestal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 47, n. 3, p. 279-285, 2017.

WICKHAM, H. **ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis**. 2. ed. Suíça: Springer-Verlag New York, 2016.

WIJEWARDANA, C.; REDDY, K. R.; KRUTZ, L. J.; GAO, W.; BELLALLOUI, N. Drought stress has transgenerational effects on soybean seed germination and seedling vigor. **Plos One**, v. 14, n. 9, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0214977>

XIANG, H.; LAN, N.; WANG, F.; ZHAO, B.; WEI, H.; ZHANG, J. Reduced pests, improved grain quality and greater total income: benefits of intercropping rice with *Pontederia cordata*. **Science of food and agriculture**, v. 101, n. 14, p. 5907-5917, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1002/jsfa.11243>

XU, Z.; LI, C.; ZHANG, C.; YU, Y.; VAN DER WERF, W.; ZHANG, F. Intercropping maize and soybean increases efficiency of land and fertilizer nitrogen use; A meta-analysis. **Field Crops Research**, v. 246, n. 2, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2019.107661>

YADAV, G. S.; KANDPAL, B. K.; DAS, A.; MOHAPATRA, S. B. K. P.; DEVI, A. G. DEVI, H. L.; CHANDRA, P.; BARMAN, R. S. K. K. Impact of 28 year old agroforestry systems on soil carbon dynamics in Eastern Himalayas. **Journal of Environmental Management**, v. 283, p.111978, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.111978>

YANG, L.; DING, X.; LIU, X.; LI, P.; ENEJI, A. E. Impacts of long-term jujube tree/winter wheat–summer maize intercropping on soil fertility and economic efficiency—A case study in the lower North China Plain. **European Journal of Agronomy**, v. 75, p. 105-117, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.01.008>

YANG, T.; MA, C.; LU, W.; WAN, S.; LI, L.; ZHANG, W. Microclimate, crop quality, productivity, and revenue in two types of agroforestry systems in drylands of Xinjiang, northwest China. **European Journal of Agronomy**, v. 124, p.126245, 2021a. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126245>

YANG, Y.; GUO, X.; LIU, H.; LIU, G.; LIU, W.; MING, B.; XIE, R.; WANG, K.; HOU, P.; LI, S. The effect of solar radiation change on the maize yield gap from the perspectives of dry matter accumulation and distribution. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 20, n. 2, p. 482-493, 2021b. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63581-X](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63581-X)

YIN, W.; CHAI, Q.; ZHAO, C.; YU, A.; FAN, Z.; HU, F.; FAN, H.; GUO, Y.; COULTER, J. A. Water utilization in intercropping: A review. **Agricultural Water Management**, v. 241, n. 4, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106335>

ZAHOOR, S.; DUTT, V.; MUGHAL, A. H.; PALA, N. A.; RASHID, M.; QAISAR K.N.; KHAN, P. A. Economics and productivity of apple-based agroforestry system for livelihood generation in North Western Himalaya, India. **Indian Journal of Agroforestry**, v. 23, n. 1, p. 74-81, 2021.

ZALAC, H.; HERMAN, G.; ERGOVIC, L.; JOVIC, J.; ZEBEC, V.; BUBALO, A.; IVEZIC, V. Ecological and Agronomic Benefits of Intercropping Maize in a Walnut Orchard—A Case Study. **Agronomy**, v. 13, n. 77, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/agronomy13010077>

ZHANG, C.; DONG, Y.; TANG, L.; ZHENG, Y.; MAKOWSKI, D.; YU, Y.; ZHANG, F.; WERF, W. V. Intercropping cereals with faba bean reduces plant disease incidence regardless of fertilizer input; a meta-analysis. **European Journal of Plant Pathology**, v. 154, p.931-942, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10658-019-01711-4>

ZHENG, Y.; ZHANG, L. CHEN, B.; YAN, N.; GUI, F.; ZAN, Q. DU, G.; HE, S.; LI, Z.; GAO, Y.; XIAO, G. Potato/Maize intercropping reduces infestation of potato tuber moth, *Phthorimaea operculella* (Zeller) by the enhancement of natural enemies. **Journal of Integrative Agriculture**, v. 19, n. 2, p. 394-405, 2020. DOI: [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(19\)62699-7](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(19)62699-7)