



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGROECOSSISTEMAS

Luiz Fernando Zin Battisti

**BIOMASSA E SEQUESTRO DE CARBONO NO ESTÁGIO INICIAL DE SUCESSÃO DO
SISTEMA SILVIPASTORIL COM NÚCLEOS: DA NUCLEAÇÃO APLICADA A
REABILITAÇÃO ECOLÓGICA DOS AGROECOSSISTEMAS NO BIOMA MATA
ATLÂNTICA**

FLORIANÓPOLIS

2025

LUIZ FERNANDO ZIN BATTISTI

**BIOMASSA E SEQUESTRO DE CARBONO NO ESTÁGIO INICIAL DE SUCESSÃO DO
SISTEMA SILVIPASTORIL COM NÚCLEOS: DA NUCLEAÇÃO APLICADA A
REABILITAÇÃO ECOLÓGICA DOS AGROECOSSISTEMAS NO BIOMA MATA
ATLÂNTICA**

Tese submetida ao Programa de Pós-graduação em
Agroecossistemas da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Título de Doutor em
Agroecossistemas

Orientador: Prof. Dr. Abdon L. Schmitt Filho

Coorientadora: Prof.^a Dr^a. Daniele C. S. Kazama

Coorientador: Prof. Dr. Arcangelo Loss

FLORIANÓPOLIS, SC

2025

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.
Dados inseridos pelo próprio autor.

Battisti, Luiz Fernando Zin

BIOMASSA E SEQUESTRO DE CARBONO NO ESTÁGIO INICIAL DE
SUCESSÃO DO SISTEMA SILVIPASTORIL COM NÚCLEOS: DA
NUCLEAÇÃO APLICADA A REABILITAÇÃO ECOLÓGICA DOS
AGROECOSSISTEMAS NO BIOMA MATA ATLÂNTICA / Luiz Fernando
Zin Battisti ; orientadora, Abdon Luiz Schmitt-Filho,
coorientador, Daniele Kazama, coorientador, Arcangelo
Loss, 2025.

120 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-
Graduação em Agroecossistemas, Florianópolis, 2025.

Inclui referências.

1. Agroecossistemas. 2. Restauração ecológica. 3.
Sistemas Silvopastoris. 4. Agroecologia. 5. Facilitação.
I. Schmitt-Filho, Abdon Luiz. II. Kazama, Daniele. III.
Loss, Arcangelo IV. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas.
V. Título.

Luiz Fernando Zin Battisti

**Título: BIOMASSA E SEQUESTRO DE CARBONO NO ESTÁGIO INICIAL DE
SUCESSÃO DO SISTEMA SILVIPASTORIL COM NÚCLEOS: DA NUCLEAÇÃO
APLICADA A REABILITAÇÃO ECOLÓGICA DOS AGROECOSSISTEMAS NO BIOMA
MATA ATLÂNTICA**

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 4 de agosto de 2025, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Dr. Paulo Sinisgalli
PROCAM / USP

Prof. Dr. Fernando Joner
UFSC

Prof. Dr. Alfredo Fantini
UFSC

Certificamos que esta é a versão original e final do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de Doutor em Agroecossistemas



Documento assinado digitalmente
Oscar Jose Rover
Data: 12/09/2025 09:20:49-0300
CPF: ***.116.509-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Coordenação do Programa de Pós-Graduação



Documento assinado digitalmente
ABDON LUIZ SCHMITT FILHO
Data: 14/09/2025 17:55:36-0300
CPF: ***.859.559-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Dr. Abdon Luiz Schmitt Filho
Orientador

Florianópolis, 2025

RESUMO

Os sistemas silvipastoris (SSP) integram árvores, pastagens e animais, e representam uma alternativa sustentável para a pecuária em biomas florestais, como a Mata Atlântica. Assim os SSP reabilitam os agroecossistemas degradados, além de aumentar o fluxo de serviços ecossistêmicos e o estoque de carbono. Esta pesquisa tem como objetivo avaliar o efeito de diferentes elementos de facilitação sucessional nos primeiros anos de implantação do sistema silvipastoril com núcleos (SSPnu) quanto ao desenvolvimento das plantas, acúmulo de biomassa e estoque de carbono. A pesquisa foi desenvolvida na Unidade de Ensino e Pesquisa em Sistemas Silvipastoris da Fazenda Experimental da Ressacada (FER/UFSC), da Universidade Federal de Santa Catarina. O sistema em estágio inicial de implantação foi avaliado durante os quatro primeiros anos. Através de equações alométricas, foi estimado a biomassa e o carbono acumulado nas plantas facilitadoras e componentes arbóreos dos 94 núcleos que compõe o sistema. Durante os quatro primeiros anos de implantação, os estoques médios de carbono arbóreo variaram entre 1,1 e 3,2 Mg ha⁻¹, sem diferenças significativas entre os tratamentos. A biomassa e o carbono foram estimados por equações alométricas, totalizando 2,73 Mg ha⁻¹ de biomassa acima do solo e 1,35 Mg ha⁻¹ de carbono no quarto ano. Observou-se forte correlação positiva entre a biomassa de bananeiras e a biomassa e o carbono arbóreo ($R^2 = 0,85$; $p < 0,001$), evidenciando o papel facilitador dessa espécie facilitadora no sequestro de carbono durante a implantação do sistema. Em contraste, o capim-elefante, usado como quebra-vento, apresentou correlação negativa com a biomassa das árvores e das bananeiras, sugerindo competição, embora tenha contribuído para maiores taxas de sobrevivência de mudas. As leguminosas não mostraram influência significativa sobre o acúmulo de biomassa ou carbono arbóreo nesta fase inicial do sistema. Os resultados reforçam a importância das espécies facilitadoras e a escolha criteriosa baseada nos atributos funcionais para viabilizarmos a reabilitação ecológica das pastagens degradadas através dos SSPnu por meio da nucleação agroecológica em sistemas biodiversos.

Palavras-chave: Restauração ecológica. Sistemas agroflorestais. Pecuária sustentável. Facilitação ecológica. Nucleação aplicada.

ABSTRACT

Silvopastoral systems (SSP) integrate trees, pastures and animals, and represent a sustainable alternative to livestock farming in forest biomes, such as the Atlantic Forest. Thus, SSP rehabilitate degraded agroecosystems, in addition to increasing the flow of ecosystem services and carbon stocks. This research aims to evaluate the effect of different elements of succession facilitation in the first years of implementation of the silvopastoral system with nuclei (SSPnu) on plant development, biomass accumulation and carbon stocks. The research was developed at the Silvopastoral Systems Teaching and Research Unit of the Ressacada Experimental Farm (FER/UFSC), of the Federal University of Santa Catarina. The system in its initial stage of implementation was evaluated during the first four years. Through allometric equations, the biomass and carbon accumulated in the facilitating plants and tree components of the 94 nuclei that make up the system were estimated. During the first four years of implementation, average tree carbon stocks ranged from 1.1 to 3.2 Mg ha⁻¹, with no significant differences between treatments. Biomass and carbon were estimated by allometric equations, totaling 2.73 Mg ha⁻¹ of aboveground biomass and 1.35 Mg ha⁻¹ of carbon in the fourth year. A strong positive correlation was observed between banana biomass and tree biomass and carbon ($R^2 = 0.85$; $p < 0.001$), evidencing the facilitating role of this facilitating species in carbon sequestration during the implementation of the system. In contrast, elephant grass, used as a windbreak, showed a negative correlation with tree and banana biomass, suggesting competition, although it contributed to higher seedling survival rates. Legumes did not show significant influence on biomass accumulation or tree carbon in this initial phase of the system. The results reinforce the importance of facilitating species and the careful selection based on functional attributes to enable the ecological rehabilitation of degraded pastures through SSPnu through agroecological nucleation in biodiverse systems.

Keywords: Ecological restoration. Agroforestry systems. Sustainable livestock farming. Ecological facilitation. Applied nucleation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Estado atual das variáveis de controle dos nove limites planetários.	19
Figura 2 Piquetes antes da implantação do Sistema Silvipastoril com núcleos. Fonte: Acervo LASSre.	30
Figura 3 Bananeiras sendo plantadas próximas ao Quebra-vento de Capim-elefante. Fonte: Acervo Lassre.....	30
Figura 4 Plantio de mudas nos Núcleos do Sistema Silvipastoril com núcleos com o quebra-vento de.....	31
Figura 5 Parte da equipe de implantação Fonte: Acervo Lassre.	31
Figura 6 Equipe de implantação, e ao fundo alguns núcleos com o capim-elefante bem desenvolvido.....	32
Figura 7 Núcleo com o Capim-elefante e Feijão-guandú bem desenvolvidos, criando um microclima.....	32
Figura 8 Núcleo com os Feijão-guandú bem desenvolvidos, criando um microclima melhor para o desenvolvimento das mudas de arbóreas e de bananeiras. abril de 2020. Fonte: Acervo Lassre.....	33
Figura 9 Amendoim-forrageiro bem desenvolvido ao lado das mudas de bananeira e tucaneira, dentro do núcleo. Fonte: Acervo Lassre.	33
Figura 10 Núcleos arbóreos. Fonte: Acervo Lassre.....	34
Figura 11 Núcleos com as bananeiras bem desenvolvidas. Fonte: Acervo Lassre..	34
Figura 12 Atividade de avaliação qualitativa do solo com os Professores Arcangelo Loss e Jucinei Comin nos núcleos arbóreos (sob a sombra das bananeiras) . Fonte: Acervo Lassre.....	35
Figura 13 Medição das árvores do SSPnu. Fonte: Acervo do autor	35
Figura 14 Foto aérea do SSPnu. Fonte: Raphael Buch.....	36
Figura 15 Foto aérea do SSPnu. Fonte: Raphael Buch.....	36
Figura 16 Foto aérea do SSPnu. Fonte: Raphael Buch.....	37
Figura 17 Foto do rebanho sob a sombra do SSPnu. Fonte: Raphael Buch	37
Figura 18 Foto aérea do SSPnu com as copas das árvores emergindo no dossel. Fonte: Raphael Buch	38
Figura 19 Foto aérea do SSPnu com 6 anos. Fonte: Raphael Buch	38
Figura 20 Núcleos arbóreos e o rebanho bovino em 2022. Fonte: O autor.	39
Figura 21 Foto aérea de um bloco. Fonte: Google Earth, 2022.....	39

Figura 22 Foto aérea de dois piquetes do SSPnúcleos com 10% de ocupação. Fonte: Raphael Buch, 2024	40
Figura 23 Croqui com a disposição das plantas nos núcleos do Sistema Silvipastoril com Núcleos. Fonte: Acervo do autor.....	40
Figura 24 Ciclo do carbono. Fonte: http://www.repositorio.ppec.ueg.br:8080/handle/123456789/41	52
Figura 25 Representação de um bloco, que contém 3 piquetes e 3 tratamentos, PSA, SSPn5 e SSPn10.	119

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Resultados dos testes de Kruskal-Wallis para variáveis estruturais e produtivas do sistema silvipastoril com núcleos ao longo de quatro anos de monitoramento.....	120
Tabela 2 Resultados dos modelos lineares ajustados para avaliar os efeitos da biomassa de capim-elefante e do número de leguminosas sobre a biomassa e o carbono de árvores e bananeiras.	121

SUMÁRIO

APRESENTAÇÃO.....	12
INTRODUÇÃO GERAL.....	14
OBJETIVO GERAL	17
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
HIPÓTESE DA PESQUISA.....	17
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
LIMITES PLANETÁRIOS.....	18
RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA	22
AGROECOLOGIA E SISTEMAS SILVIPASTORIS	24
SISTEMA SILVIPASTORIL COM NÚCLEOS	28
ESTRATÉGIAS PARA O MANEJO: ATRIBUTOS E GRUPOS FUNCIONAIS, PLANTAS FACILITADORAS, QUEBRA-VENTO E ADUBAÇÃO VERDE.....	41
CARBONO EM SISTEMAS SILVIPASTORIS	51
ARTIGO 1.....	59
INTRODUÇÃO	60
METODOLOGIA.....	62
RESULTADOS	65
DISCUSSÃO	70
CONCLUSÃO.....	73
REFERENCIAS	74
ARTIGO 2.....	78
RESUMO	78
ABSTRACT	78
INTRODUÇÃO	79
METODOLOGIA.....	81
ÁREA DE ESTUDO	81
COLETA DE DADOS.....	83
ANÁLISE DE DADOS.....	84
RESULTADOS	84
DISCUSSÃO	89
CONCLUSÃO.....	94
REFERÊNCIAS	95

CONSIDERAÇÕES FINAIS	101
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102
MATERIAIS COMPLEMENTARES.....	118
CONFLITO DE INTERESSES	118
FONTE DE FINANCIAMENTO:	118

APRESENTAÇÃO

Esta tese de doutorado, desenvolvida no Laboratório Sistemas Silvipastoris e Restauração Ecológica (LASSre) do Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), investiga o potencial dos Sistemas Silvipastoris com núcleos (SSPnu) como modelo ecológico e inovador para a reabilitação de agroecossistemas pastoris em biomas florestais.

O estudo foi conduzido na Unidade de Ensino e Pesquisa em Sistemas Silvipastoris com Núcleos (UEP SSPnu) da Fazenda Experimental da Ressacada (FER) na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A FER está em Florianópolis - SC, inserida em uma planície costeira marcada por solos arenosos, lençol freático alto com frequentes inundações, baixa fertilidade natural e marcada por ventos fortes e constantes. Um cenário, certamente, hostil para o desenvolvimento de Sistemas Sucessionais de abundância. As espécies nativas características da cobertura florestal original, a Floresta Ombrófila Densa Quaternária, são em grande parte adaptadas a ambientes sombreados, úmidos e/ou alagados, com solos ricos em matéria orgânica e protegidos por serrapilheira. Assim, são bem diferentes do ambiente encontrado atualmente, um agroecossistema pastoril degradado, desprovido de árvores e serrapilheira.

Em função dessas características, o desenho e a composição de espécies dos núcleos do SSPnu foram adaptados para as condições da FER. Considerando a alta incidência de ventos na região, foram implantadas barreiras de capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) nas faces sul e norte de cada núcleo, protegendo o interior dos ventos predominantes. Essa barreira física reduz a intensidade dos ventos, protege as mudas do estresse hídrico e térmico e ajuda na manutenção de um microclima mais estável e úmido, especialmente importante nos estágios iniciais da sucessão ecológica. Além disso, espécies facilitadoras como a bananeira (*Musa paradisiaca*) e leguminosas como o feijão-guandu (*Cajanus cajan*), o amendoim-forrageiro (*Arachis pintoi*) e a mucuna-preta (*Mucuna pruriens*) prepararam o ambiente para as arbóreas pioneiras. Estas plantas foram selecionadas em função da rusticidade, provendo sombra, aumentando a umidade do solo e do ar, fixando nitrogênio e suprimindo o crescimento de gramíneas competidoras. Assim, criam condições favoráveis ao estabelecimento, crescimento e sobrevivência das espécies arbóreas ao longo do processo sucessional.

A transição de um agroecossistema pastoril pobre para um sistema de maior biodiversidade, abundância e estratificação requer estratégias que facilitem o estabelecimento de espécies arbóreas. Neste contexto, o desenho de sistemas regenerativos com base nos princípios sucessionais é fundamental para integrar a restauração ecológica com produção agrícola, possibilitando uma pecuária agroecológica aliada à conservação da biodiversidade.

Este sistema, inspirado pela técnica de restauração ecológica conhecida como nucleação aplicada, foi criado a partir da demanda dos produtores de leite por sombra nas áreas manejadas sob Pastoreio Racional Voisin. Na restauração, a nucleação consiste na criação de pequenas “ilhas” ou núcleos de vegetação em áreas degradadas, com o objetivo de catalisar a regeneração natural do ecossistema. Esses núcleos funcionam atraindo dispersores de sementes, abrigando a fauna e promovendo o estabelecimento de novas espécies vegetais espontâneas, o que contribui para acelerar a sucessão ecológica e a restauração da paisagem.

Em vez de distribuir as árvores de forma linear na pastagem, como nos sistemas silvipastoris convencionais, no SSPnu as espécies arbóreas estão inseridas em núcleos que estão distribuídos equidistantemente no piquete. Dessa forma a matriz da paisagem deixa de ser uma monocultura de pasto com linhas de árvores para ser um bosque pastoril pontuado com 40 núcleos por hectare, cada qual com vinte árvores nativas e quatro bananeiras. Assim, os núcleos contribuem para a criação de um microclima mais ameno, promovendo o bem-estar dos animais ao proporcionar áreas com sombra e menor temperatura durante os períodos mais quentes do dia. Esses microambientes reduzem o estresse térmico sobre os rebanhos, promovendo melhores condições de conforto e, consequentemente, maior produtividade e saúde animal nos sistemas silvipastoris.

Ao longo dos últimos anos, as medições realizadas nos sistemas silvipastoris com núcleos (SSPnu) implantados na Fazenda Experimental da Ressacada (FER/UFSC) resultaram em um conjunto de informações valiosas sobre as dinâmicas ecológicas desses arranjos. Esta tese, estruturada em dois artigos, é parte deste acervo. O primeiro artigo aborda os efeitos dos quebra-ventos com capim-elefante bem como o uso de leguminosas, sobre o crescimento, a biomassa e o sequestro de carbono durante os anos iniciais de implantação do sistema. Já o segundo avalia os efeitos da bananeira como espécie facilitadora no acúmulo de biomassa e sequestro de carbono arbóreo.

Em um cenário de mudanças climáticas, perda de biodiversidade, degradação ambiental e pressão por produtividade, os SSPnu oferecem uma alternativa sinérgica entre a produção agrícola e a reabilitação ecológica dos agroecossistemas, mitigando os impactos da pecuária convencional sobre o clima e a biodiversidade.

A adoção de modelos como este pode contribuir para políticas públicas voltadas à recuperação de áreas degradadas, ao pagamento por serviços ecossistêmicos e à promoção da pecuária regenerativa. Os resultados apresentados fornecem evidências científicas para fundamentar tais políticas e apoiar agricultores, técnicos e gestores na construção de sistemas mais resilientes, biodiversos e sustentáveis.

INTRODUÇÃO GERAL

No momento atual da humanidade, estamos observando a concretização da temida mudança climática, com a intensificação dos recordes meteorológicos promovendo eventos climáticos cada vez mais extremos e mais recorrentes, conforme destacado no Sexto Relatório do (IPCC, 2021). As mudanças climáticas têm intensificado a ocorrência destes eventos climáticos extremos em todo o planeta, como ondas de calor severas, chuvas torrenciais, enchentes, secas prolongadas, incêndios florestais e tempestades intensas. Esse fenômeno está diretamente relacionado ao aumento das concentrações de gases de efeito estufa na atmosfera, impulsionado principalmente pela queima de combustíveis fósseis desde a Revolução Industrial. Gases como dióxido de carbono e metano atuam como uma camada que retém o calor, elevando as temperaturas do ar e dos oceanos, o que, por sua vez, afeta o ciclo hidrológico, altera padrões meteorológicos e acelera o derretimento de geleiras (NASA, 2024). Em 2024, a concentração média global de dióxido de carbono na atmosfera atingiu um novo recorde, alcançando 422 ppm, o que representa um aumento de 3,75 ppm em relação a 2023, o maior acréscimo anual já registrado. Esse marco evidencia a aceleração do acúmulo de CO₂ na atmosfera, cuja concentração atual é 50% superior em comparação aos níveis pré-industriais, refletindo a intensificação das emissões antrópicas desde a Revolução Industrial e reforçando os alertas sobre a urgência de ações para mitigação das mudanças climáticas (NOAA, 2025). Além disso, paralelo ao alarmante índice de carbono na atmosfera, também estamos presenciando uma crescente taxa de extinção de espécies, desmatamento, entre outros índices que vem disparando, em um movimento intitulado de “a grande aceleração” (STEFFEN et al., 2011; WATERS & TURNER, 2022).

O relatório da National Centers for Environmental Information (NCEI), sobre os dados climáticos de 2024, revela um cenário alarmante de aquecimento global. O ano foi o mais quente já registrado desde 1850, com uma temperatura média global igual a 1,29 °C acima da média do século XX, superando o recorde anterior registrado em 2023 (houve uma sequência inédita de 14 meses consecutivos com recordes de temperatura entre junho de 2023 e julho de 2024). A América do Norte e a Europa registraram elevações na temperatura média anual de 2,22 °C e 2,45 °C, respectivamente. No Ártico, o aumento foi ainda mais expressivo, chegando a 2,71 °C acima da média, resultado que contribuiu para a sétima menor extensão de gelo

marinho já observada. Neste ano, os oceanos também atingiram recordes de aquecimento por 15 meses consecutivos, intensificando eventos extremos e acelerando a elevação do nível do mar. Esses fenômenos, somados ao avanço das marés, vêm impactando diretamente a vida das populações por meio da intensificação de eventos climáticos extremos (NCEI, 2025). Como consequência, há o surgimento de uma nova era geológica promovida pelo homem, intitulada de antropoceno, ou seja, a humanidade se tornou uma força geológica global (STEFFEN et al., 2011; WATERS & TURNER, 2022).

Na agricultura, o aquecimento global impõe desafios significativos, comprometendo a produtividade das culturas e ampliando os riscos à segurança alimentar em escala mundial. O aumento das temperaturas médias e as alterações nos regimes de precipitação provocam diversos estresses abióticos, como salinidade, déficit hídrico e calor extremo, que prejudicam o crescimento e a produtividade das plantas. Além disso, as mudanças climáticas favorecem a proliferação de pragas e doenças, alteram a composição das comunidades de plantas daninhas e reduzem a duração dos ciclos fenológicos das culturas. Embora a maior concentração atmosférica de CO₂ possa, inicialmente, estimular a fotossíntese e o crescimento vegetal, esses efeitos benéficos tendem a ser neutralizados pelo aumento da temperatura e da evapotranspiração, resultando, em última análise, na redução da produtividade agrícola (MALHI et al., 2021). Esses impactos são particularmente severos em países em desenvolvimento, como o Brasil, cuja economia e segurança alimentar dependem fortemente da agricultura (IPCC, 2018).

Neste cenário catastrófico, a agricultura convencional representa um dos grandes vilões do antropoceno, pois ocupa uma grande parcela da superfície terrestre, gerando desserviços ambientais em grande escala como: erosão e perda de solo, alta demanda e contaminação hídrica, uso intensivo de agroquímicos e combustíveis fósseis e expansão sobre remanescentes florestais, descaracterizando os ecossistemas originais e destruindo habitats que conservam a biodiversidade (LYYTIMÄKI et al., 2022; TILMAN et al., 2011). Além de ser um dos principais emissores de GEE mundiais, contribuindo significativamente para as mudanças climáticas. Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU, 2024), esse impacto decorre de uma série de processos ao longo da cadeia produtiva, incluindo o desmatamento e a conversão de ecossistemas naturais em áreas agrícolas e pastagens, a fermentação entérica de ruminantes como bovinos e ovinos, o uso

intensivo de fertilizantes nitrogenados e o consumo de combustíveis fósseis para operação de máquinas e equipamentos agrícolas. Quando se considera toda a cadeia alimentar, desde a produção até o consumo, passando pelo processamento, transporte e distribuição, estima-se que a agricultura contribua com aproximadamente 21% a 37% das emissões antrópicas globais de GEE (ROSENZWEIG et al., 2020). Desse total, cerca de 10% correspondem às emissões diretas provenientes das propriedades agrícolas, principalmente de metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O), enquanto o restante está associado à mudanças no uso da terra e à conversão de áreas naturais para produção de alimentos.

A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, adotada em 2015 pelos 193 Estados-Membros das Nações Unidas, estabelece 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) que integram de forma indissociável as dimensões econômica, social e ambiental. Nesse contexto, a pecuária ocupa posição estratégica, com potencial de contribuir direta ou indiretamente para a maioria dos ODS. Os sistemas silvipastoris (SSP) se destacam como uma abordagem promissora para alinhar a produção pecuária aos princípios do desenvolvimento sustentável. Através da Rede Global sobre Sistemas Silvipastoris, vinculada à Parceria Global para a Pecuária Sustentável, promove-se a expansão desses sistemas como estratégia para aumentar a produtividade, restaurar ecossistemas, mitigar as emissões de gases de efeito estufa e fortalecer os meios de subsistência no meio rural. A América Latina tem desempenhado um papel de liderança nesse processo, acumulando ampla experiência na adoção e adaptação dos SSP às diversas realidades locais, consolidando-os como alternativa eficaz para a intensificação sustentável da produção pecuária (CHARÁ et al., 2019).

Nesse contexto, torna-se urgente conciliar a necessidade da restauração e reabilitação ecológica com a manutenção da produtividade e da viabilidade econômica dos sistemas agropecuários, especialmente em áreas sensíveis e prioritárias para a conservação, como o Bioma Mata Atlântica. Avaliar a utilização de quebra-ventos e a introdução de leguminosas para facilitar o desenvolvimento das plantas arbóreas nos estágios iniciais de implantação de SSP, para identificar estratégias que promovam um maior acúmulo de biomassa e carbono. Esses conhecimentos permitirão orientar decisões mais eficazes e fundamentadas para a implantação de novos sistemas silvipastoris, promovendo simultaneamente uma restauração ecológica, sustentabilidade produtiva, biodiversidade e estabilidade climática.

OBJETIVO GERAL

Avaliar os efeitos de diferentes elementos de facilitação sucessional sobre o crescimento, o acúmulo de biomassa e o estoque de carbono nas plantas nos primeiros anos de implantação do SSPnu.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Quantificar a biomassa e o carbono das espécies arbóreas, dos quebra-ventos de capim-elefante e das bananeiras nos primeiros anos do SSPnu.

Avaliar o efeito do quebra-vento de capim-elefante sobre a sobrevivência, a produção de biomassa e o estoque de carbono dos elementos florestais na fase inicial de sucessão do sistema.

Avaliar a influência das leguminosas na produção de biomassa e no estoque de carbono dos elementos florestais na fase inicial de sucessão do sistema.

Avaliar a influência das bananeiras na produção de biomassa e no estoque de carbono dos elementos florestais na fase inicial de sucessão do sistema.

HIPÓTESE DA PESQUISA

Práticas de manejo baseadas em mecanismos de facilitação, como a implantação de quebra-ventos e o plantio de leguminosas, favorecerão o desenvolvimento inicial de espécies florestais pioneiras e de bananeiras nos núcleos do SSPnu, aumentando o acúmulo de biomassa, o sequestro de carbono e a taxa de sobrevivência.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

LIMITES PLANETÁRIOS

O debate acerca do futuro do planeta está pautado principalmente em uma possível escassez de recursos naturais, perda de biodiversidade e diminuição do fluxo de serviços ecossistêmicos (SCHMITT FILHO et al., 2023). Além disso, há uma crescente incapacidade do planeta em absorver e processar os resíduos oriundos de um crescimento econômico, que não contabiliza nos custos de produção as externalidades negativas, desprezando os custos ambientais e sociais vinculados ao processo produtivo (FARLEY & SCHMITT-FILHO, 2024).

A preocupação com o impacto das atividades humanas nas mudanças climáticas a médio e longo prazo tem sido crescente e despertado grandes inquietações (SOLECKI et al., 2024). Um modelo que busca entender melhor este processo é o conceito de limites planetários, proposto inicialmente por (ROCKSTRÖM et al., 2009) e atualizado por (RICHARDSON et al., 2023). Os limites planetários apresentados no estudo representam os principais processos ambientais que regulam a estabilidade do sistema terrestre e a capacidade do planeta de sustentar a civilização humana. O modelo define uma zona de operação segura para a humanidade e, caso seja respeitada, garantiria que a Terra permanecesse em um estado estável e propício à vida, semelhante às condições ambientais do Holoceno (período geológico que favoreceu o florescimento das sociedades humanas).

As nove fronteiras planetárias são: (1) mudanças climáticas, que envolvem a concentração de dióxido de carbono na atmosfera e o balanço energético da Terra - limite ultrapassado; (2) integridade da biosfera, relacionada à perda de biodiversidade genética e funcional - limite ultrapassado; (3) mudança no uso da terra, com foco na conversão de ecossistemas naturais em áreas agrícolas ou urbanas - limite ultrapassado; (4) ciclos biogeoquímicos do nitrogênio e fósforo, afetados pelo uso excessivo de fertilizantes - limite ultrapassado; (5) uso da água, que se refere à extração de água de rios, lagos e aquíferos - limite ultrapassado; (6) aerossóis atmosféricos, partículas que afetam o clima e a saúde humana - fronteira ainda não claramente definida, mas em estado preocupante; (7) acidificação dos oceanos, causada pela absorção de CO₂ pelos oceanos – limite não ultrapassado; (8) carga de entidades novas, como poluentes químicos sintéticos e plásticos – limite ultrapassado;

e (9) integridade da camada de ozônio, que atualmente se encontra dentro dos limites seguros devido a políticas internacionais como o Protocolo de Montreal (RICHARDSON et al., 2023).

O estudo revelou que seis das nove fronteiras já foram transgredidas, incluindo as (1) mudanças climáticas, a (2) integridade da biosfera, os (4) ciclos de nitrogênio e fósforo, a (3) mudança no uso da terra, o (5) uso da água e a (8) carga de entidades novas. Entre todas as fronteiras, o aquecimento global e a perda da integridade da biosfera são considerados limiares centrais, cuja transgressão pode desencadear alterações abruptas e irreversíveis no sistema terrestre (RICHARDSON et al., 2023).

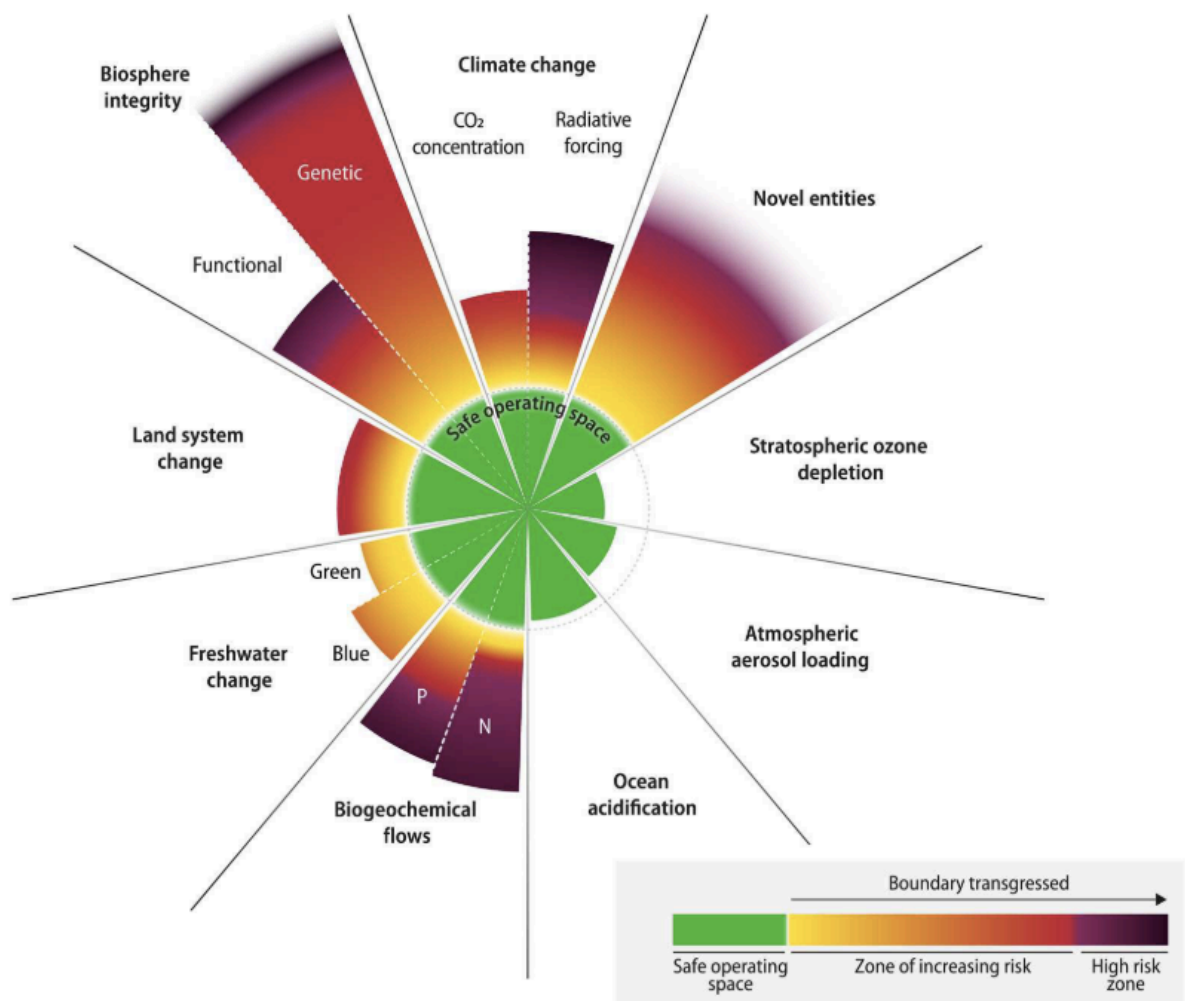


Figura 1 Estado atual das variáveis de controle dos nove limites planetários.

A zona verde representa o espaço seguro de operação (abaixo do limite). As zonas amarela e vermelha indicam risco crescente. A cor roxa representa a zona de alto risco, onde as condições do sistema terrestre são ultrapassadas. Os valores das variáveis de controle são normalizados de forma que a origem represente a média das condições do Holoceno, e o limite planetário esteja a uma mesma distância radial para todas as fronteiras. As extremidades superiores dos setores relativos a entidades novas e à diversidade genética (componente da fronteira de integridade da biosfera) são desfocadas, seja porque o limite superior da zona de risco crescente ainda não foi quantitativamente definido (entidades novas), seja porque o valor atual é conhecido com grande incerteza (perda de diversidade genética). Ambos, no entanto, estão claramente fora do espaço seguro de operação. A transgressão desses limites reflete uma perturbação humana sem precedentes no sistema terrestre.

A intensificação dos sistemas produtivos, embora tenha aumentado a eficiência, não resultou em uma redução proporcional no uso de insumos e recursos naturais, agravando não só a crise climática, mas também degradando os ecossistemas. Isso representa uma séria ameaça ao meio ambiente e à biodiversidade. A conversão de ecossistemas naturais em áreas agrícolas tem reduzido drasticamente a biodiversidade, sendo a agricultura o principal responsável pela perda de espécies terrestres (ORTIZ et al., 2021). Considerando que a biodiversidade sustenta funções e serviços ecossistêmicos essenciais à agricultura, é necessário que seu papel nos sistemas alimentares receba atenção adequada. Ela é fundamental para a produção de alimentos, garantindo a provisão de serviços ecossistêmicos indispensáveis, cuja perda pode gerar consequências negativas significativas para a segurança alimentar. Embora determinadas formas de manejo agrícola e do uso da terra possam favorecer a conservação da biodiversidade em contextos específicos, há uma necessidade urgente de conter a perda irreversível da diversidade biológica e evitar seus efeitos prejudiciais sobre a produção de alimentos e o desenvolvimento sustentável (ORTIZ et al., 2021).

Este modelo de agricultura convencional, fomentado a partir da Revolução Verde, promoveu a adoção de pacotes tecnológicos por meio de grandes empresas, buscando o aumento da produtividade agropecuária e o desenvolvimento econômico. No entanto, ignorando as questões ambientais e sociais. No Brasil, essa modernização da agricultura teve início nos anos 60 (SANTOS, 1988). Um dos biomas mais devastados por esse processo foi a Mata Atlântica, devido ao desmatamento para conversão da floresta em áreas agrícolas e à expansão urbana, sofrendo uma grande perda de área florestal e empobrecimento dos remanescentes naturais desde 1500 (RODRIGUES et al., 2009).

A Mata Atlântica é um dos biomas com maiores endemismos do planeta, sendo considerado um dos 25 *hotspots* mundiais de biodiversidade (MYERS et al., 2000), mas atualmente seus remanescentes somados totalizam apenas 12,4% da cobertura original (S.O.S MATA ATLÂNTICA, 2023). Por isso, na 15ª Conferência das Partes (COP15) da Convenção de Diversidade Biológica da ONU, o Bioma Mata Atlântica foi anunciado como um dos dez ecossistemas mais promissores para a restauração no mundo, na década das Nações Unidas da Restauração de Ecossistemas (2021-2030) (S.O.S MATA ATLÂNTICA, 2022). Analisando o cenário atual do desmatamento e ocupação do solo do bioma Mata Atlântica, vemos que 25,7% do território são

ocupados hoje por pastagens cultivadas, o maior percentual entre os biomas brasileiros, sendo que 87,33% destas pastagens apresentam algum grau de degradação. No Brasil, pastagens degradadas representam 52,3% dos 154,7 milhões de hectares de pastagens em biomas florestais (MAPBIOMAS, 2021).

Agroecossistemas degradados são áreas onde a intervenção humana gerou impactos ambientais negativos no solo, na água, na diminuição da produtividade da vegetação ou na diversidade genética (PARROTTA, 1992). A degradação de ecossistemas compromete a resiliência ecológica e a provisão de serviços ecossistêmicos, cenário que demanda a implementação de estratégias de manejo integradas para sua recuperação.

Com base no relatório *Millennium Ecosystem Assessment*, serviços ecossistêmicos são definidos como os benefícios que os seres humanos obtêm dos ecossistemas. Esses serviços resultam das interações complexas entre organismos vivos e seu ambiente abiótico, formando unidades funcionais que sustentam a vida na Terra. A avaliação agrupa esses serviços em quatro categorias principais: serviços de provisão (como alimentos, água doce, madeira e fibras), serviços de regulação (como controle do clima, regulação de enchentes, purificação da água e controle de doenças), serviços culturais (incluindo valores espirituais, recreativos e estéticos) e serviços de suporte (como a formação do solo, fotossíntese e o ciclo de nutrientes), que são fundamentais para a manutenção dos demais serviços. O relatório destaca que a humanidade, embora protegida parcialmente por meio de cultura e tecnologia, depende fundamentalmente do fluxo contínuo desses serviços para seu bem-estar. A compreensão e a valorização desses serviços são essenciais para promover o uso sustentável dos ecossistemas e garantir as condições ambientais necessárias à vida humana no longo prazo (MEA, 2005).

Diante desse cenário, torna-se imprescindível adotar um olhar crítico sobre as áreas de pastagem inseridas no bioma Mata Atlântica, uma vez que essas áreas resultaram de processos de desmatamento. Quando manejadas de forma inadequada, essas áreas passam a gerar diversos desserviços ambientais, contribuindo para a degradação dos agroecossistemas. Nesse contexto, a reabilitação ecológica surge como uma estratégia promissora para reverter os processos de degradação. Por meio da adoção de práticas de manejo regenerativo, é possível recuperar a funcionalidade ecológica de pastagens degradadas, aumentar a capacidade de suporte do sistema e promover a provisão de serviços ecossistêmicos,

fortalecendo a sustentabilidade ambiental e produtiva dos agroecossistemas (ABRAMOVAY et al., 2025).

RESTAURAÇÃO ECOLÓGICA

A degradação de um ecossistema compromete seu funcionamento e a sustentabilidade dos sistemas socioecológicos, configurando-se como uma das mais graves ameaças ambientais contemporâneas. Entre os principais vetores antrópicos da degradação ecossistêmica destacam-se a conversão do uso da terra, a exploração excessiva de recursos naturais, o crescimento populacional desordenado, o desenvolvimento econômico dissociado de critérios ambientais, as mudanças climáticas induzidas por atividades humanas, além de fatores institucionais, como a fragilidade das legislações ambientais, a insegurança na posse da terra e a ausência de mecanismos de governança eficazes. Estima-se que aproximadamente dois terços do carbono anteriormente armazenado na vegetação e no solo tenham sido perdidos desde o século XIX como resultado da degradação ecossistêmica, contribuindo de forma o aquecimento global (EKKA et al., 2024). Diante deste cenário, é crescente a conscientização global da necessidade da restauração e reabilitação dos ecossistemas degradados, resultando em uma escalada global dos esforços relacionados com restauração ecológica. Visto isto, a Assembleia Geral das Nações Unidas intitulou o período entre 2021 a 2030 como a “Década da Restauração de Ecossistemas” (ONU, 2024). A principal meta da Década das Nações Unidas para a Restauração de Ecossistemas (2021–2030) é interromper e reverter os processos de degradação de bilhões de hectares de ecossistemas em todo o mundo. Essa iniciativa global foi concebida com o propósito de articular, fortalecer e amplificar as diversas ações de restauração em curso, promovendo sinergias entre governos, instituições, comunidades e indivíduos. Ao fomentar o engajamento multissetorial, a Década da ONU visa criar uma cultura de restauração, incentivando que diferentes atores identifiquem oportunidades concretas de recuperação ecológica em suas regiões e participem ativamente da transformação necessária para restaurar a saúde dos ecossistemas e garantir seus serviços para as gerações presentes e futuras (UN, 2021).

A restauração ecológica é uma temática de importância global, que visa melhorar a qualidade de vida das pessoas, combater as mudanças climáticas e deter

o colapso da biodiversidade (ONU, 2020). A Society for Ecological Restoration (SER) define restauração ecológica como o processo de auxiliar a recuperação de um ecossistema que foi degradado, danificado ou destruído, direcionando-o para que tome uma trajetória de recuperação, permitindo uma adaptação às mudanças locais e globais, para a persistência e evolução das espécies que o constitui (SER, 2004; GANN et al., 2016). Os programas ou projetos de restauração ecológica definem objetivos específicos, que incluem a identificação do ecossistema original a ser restaurado com base no modelo de referência e a determinação do nível de recuperação almejado. A recuperação total é definida como o estágio no qual, após as intervenções de restauração, todos os atributos essenciais do ecossistema são comparáveis aos apresentados no modelo de referência. Projetos de restauração ecológica devem buscar a recuperação substancial das espécies nativas e das funções ecossistêmicas. Essa abordagem difere da reabilitação ecológica, cujo propósito não é restaurar o ecossistema original, mas sim reestabelecer um nível funcional que permita a provisão contínua de serviços ecossistêmicos, podendo incluir elementos de ecossistemas exóticos. A reabilitação ecológica busca restaurar o funcionamento do ecossistema, em vez de focar na restauração da biodiversidade e integridade de um determinado ecossistema original como referência (GANN et al., 2019).

Embora ainda persista a percepção de que a restauração ecológica representa um obstáculo ao desenvolvimento econômico, evidências recentes demonstram que essas duas frentes podem ser conciliadas de maneira eficaz. Resultados obtidos por meio da modelagem de diferentes cenários de uso da terra no condado de Dorset, no sul da Inglaterra, indicam que a restauração ecológica em escala de paisagem pode gerar benefícios econômicos significativos. Embora frequentemente se associe a restauração à redução da produtividade agrícola, o estudo revela que, ao considerar a provisão de múltiplos serviços ecossistêmicos — como regulação climática, purificação da água, polinização e controle da erosão — é possível ampliar tanto o valor agregado bruto (VAB) quanto os índices de emprego. Com a integração de modelos ecológicos (InVEST) a um modelo econômico de insumo e produto ajustado aos fluxos de serviços ecossistêmicos, verificou-se que os cenários de restauração aumentaram o VAB em até 5,4% e o emprego em até 6,7%, enquanto os cenários de expansão agrícola resultaram em reduções de até 4,5% no VAB e 5,6% no emprego. Esses resultados reforçam que a restauração e a reabilitação ecológica, além de

promoverem a conservação da biodiversidade, podem ampliar a contribuição econômica das áreas rurais ao fortalecer setores produtivos que dependem diretamente dos serviços ecossistêmicos. Assim, a adoção de estratégias restaurativas revela-se uma alternativa viável e promissora para o desenvolvimento de economias locais (NEWTON et al., 2021; FARLEY & SCHMITT-FILHO, 2023).

A aparente dicotomia entre restauração ecológica e segurança alimentar pode ser superada quando a restauração é integrada a estratégias de uso regenerativo das terras agrícolas. Um estudo com dados de cidades chinesas (2000–2019) mostrou que os impactos iniciais da restauração sobre a produção de alimentos tendem a ser mitigados pelo manejo eficiente das áreas agrícolas remanescentes e pela influência de fatores climáticos, como temperatura, precipitação e insolação. Os resultados indicam que, quando planejada e associada a práticas agrícolas adaptadas às condições locais, a restauração pode coexistir com a produção de alimentos, conciliando conservação ambiental e segurança alimentar. O estudo ressalta ainda a importância da articulação entre os setores florestal e agrícola e da criação de plataformas integradas de monitoramento climático, planejamento territorial e troca de informações (HOU et al., 2022). Portanto, a restauração ecológica não deve ser considerada um entrave ao desenvolvimento rural, mas sim um componente estratégico de modelos produtivos resilientes, especialmente quando associada à agricultura regenerativa, à coordenação de políticas públicas e à implementação de ações integradas voltadas à mitigação das mudanças climáticas (HOU et al., 2022; SCHMITT FILHO & FALEY 2023).

AGROECOLOGIA E SISTEMAS SILVIPASTORIS

Para um futuro próspero para o planeta Terra, é fundamental conservar a biodiversidade e frear o aquecimento global, reduzindo as emissões de GEE e sequestrando o carbono atmosférico. Nesse sentido, o manejo e o desenho dos agroecossistemas representam uma estratégia eficaz para lograr estes objetivos (ONU, 2024). A remoção do carbono atmosférico pode ser realizada por meio da fotossíntese das plantas, que capturam o CO₂ atmosférico e o armazenam na forma de carbono orgânico, presente na biomassa viva (acima e abaixo do solo), na matéria orgânica morta (como a serrapilheira) e na matéria orgânica do solo (IPCC, 2003). Nesse contexto, as florestas exercem um papel fundamental, pois além de conservar

a biodiversidade, são responsáveis por remover anualmente cerca de 30% das emissões globais provenientes da queima de combustíveis fósseis (FRIEDLINGSTEIN et al., 2023). Neste cenário, sem a restauração da cobertura florestal e a redução das emissões de CO₂, o planeta poderá entrar em um estado pós-Holoceno instável, com graves riscos ecológicos e sociais (RICHARDSON et al., 2023). Para adiar (o fim do mundo) estas catástrofes ambientais anunciadas, a humanidade precisa desenvolver e implementar mecanismos capazes de reduzir o desmatamento e as mudanças climáticas, promovendo o aumento da biodiversidade e da captura do carbono atmosférico (MATOS et al., 2020). Neste sentido, a agroecologia apresenta ferramentas para conseguirmos atingir estes objetivos e construirmos um futuro mais próspero da humanidade.

Segundo a definição, agroecologia é a integração entre pesquisa, educação, ação e transformação que promove a sustentabilidade em todas as partes do sistema alimentar: ecológica, econômica e social. A agroecologia é transdisciplinar, pois valoriza todas as formas de conhecimento e experiência na transformação dos sistemas agroalimentares. Também se caracteriza como uma prática participativa, ao exigir o envolvimento de todas as partes interessadas, desde o campo até a mesa e todos os que estão entre eles na cadeia. A agroecologia é orientada para a ação, pois confronta as estruturas de poder político e econômico do atual sistema alimentar industrial com estruturas sociais alternativas e ação política (GLIESSMAN, 2018). A prática da agroecologia tem se mostrado eficaz na construção de sistemas alimentares sustentáveis e resilientes às mudanças climáticas, promovendo segurança alimentar, restauração de áreas degradadas e sequestro de carbono. Práticas como agroflorestas, rotação e diversificação de culturas e adubação verde se caracterizam como práticas agroecológicas e demonstram potencial para aumentar a produtividade agrícola, a diversidade alimentar e a renda de agricultores, ao mesmo tempo que promovem a biodiversidade e um maior fluxo de serviços ecossistêmicos nos agroecossistemas (AMOAK et al., 2022).

Estudos recentes têm investigado se a adoção de práticas agroecológicas podem promover simultaneamente a mitigação e a adaptação às mudanças climáticas sem comprometer a segurança alimentar. Uma revisão de 50 artigos com 77 casos em países de baixa e média renda revelou que, em 63% dos casos avaliados, os sistemas agroecológicos resultaram em maiores produtividades em comparação com práticas convencionais. Além disso, cerca de 70% ou mais dos casos demonstraram

ganhos em indicadores de capacidade adaptativa, como diversidade de cultivos e de renda, aumento da renda líquida, redução da variabilidade de rendimento e melhoria na regulação de nutrientes e no controle de pragas. Apesar da escassez de dados diretos sobre mitigação climática, como emissões de gases de efeito estufa e sequestro de carbono, práticas como o uso de adubação orgânica, adubação verde e manejo integrado de pragas demonstraram contribuir significativamente para a adaptação climática. Esses resultados indicam que a adoção em larga escala da agroecologia pode representar uma estratégia promissora para promover serviços climáticos e segurança alimentar (DITTMER et al., 2023).

A agroecologia vem sendo reconhecida como uma abordagem essencial para a transformação dos sistemas alimentares em direção à resiliência climática, especialmente em países de baixa e média renda (HLPE, 2019). Evidências indicam que práticas agroecológicas, como a diversificação de culturas agrícolas, promovem benefícios relevantes de adaptação às mudanças climáticas, ao fortalecer funções ecossistêmicas como polinização, controle biológico de pragas, ciclagem de nutrientes, regulação hídrica e melhoria da fertilidade do solo (BICKSLER et al., 2023). No que se refere à mitigação das mudanças climáticas, destaca-se o papel das agroflorestas tropicais, responsáveis por aumentar de forma significativa o sequestro de carbono tanto na biomassa quanto no solo. Além disso, práticas de adubação orgânica têm demonstrado potencial para reduzir as emissões de óxido nitroso (N_2O) (SNAPP et al., 2021).

A capacidade adaptativa dos sistemas agroecológicos também é fortalecida por meio da valorização dos saberes tradicionais e da participação ativa das comunidades rurais no desenvolvimento e adaptação das práticas ao contexto regional. Tais elementos evidenciam que transições agroecológicas apoiadas em processos participativos e políticas públicas adequadas podem gerar impactos climáticos positivos em larga escala, e promover sistemas alimentares mais sustentáveis (GLIESSMAN, 2016; SOW et al., 2024). De acordo com as pesquisas mais recentes, a agroecologia nos apresenta ferramentas para viabilizar a reabilitação ecológica dos agroecossistemas degradados, e assim logarmos um cenário futuro de estabilidade climática com a preservação da biodiversidade (ABRAMOVAY et al., 2025; SOW et al., 2024).

Entre os agroecossistemas degradados no Brasil, destacam-se as pastagens, que ocupam 42 milhões de hectares apenas nos biomas florestais, área equivalente

à utilizada para o cultivo de soja no país (MAPBIOMAS, 2021). A recuperação desses sistemas é urgente e o sistema silvipastoril (SSP) despontam como solução, capaz de restaurar a cobertura florestal e a biodiversidade, ao mesmo tempo em que promove o bem estar animal, a produtividade e o sequestro de carbono atmosférico, com repercussões diretas no balanço regional e global de carbono (MAZUMDER ET AL., 2025; MCGRODDY et al., 2015).

O estudo de PARRA et al., (2023) demonstra que a integração de árvores com pastagens e animais não apenas reduz significativamente a emissão de GEE por quilograma de peso vivo, mas também contribui ativamente para a neutralização da pegada de carbono. Os autores destacam que sistemas silvipastoris baseados em gramíneas tropicais, como *Brachiaria decumbens*, associadas a espécies arbóreas como *Acacia mangium*, *Gliricidia sepium* e *Mangifera indica*, foram capazes de sequestrar quantidades expressivas de carbono, atingindo valores negativos na pegada de carbono por kg de peso vivo produzido.

Os SSP têm se destacado como uma estratégia promissora para enfrentar as mudanças climáticas por sua capacidade de sequestrar carbono tanto na biomassa quanto no solo. MAZUMDER et al. (2025), evidenciam que a incorporação de árvores em sistemas pastoris contribui significativamente para o aumento dos estoques de carbono orgânico no solo e para o acúmulo de biomassa acima do solo, especialmente em regiões tropicais. Além disso, os sistemas silvipastoris melhoram a resiliência dos agroecossistemas às variações climáticas, promovendo o aumento do fluxo de serviços ecossistêmicos, a melhoria da qualidade do solo, aumento da biodiversidade e regulação do microclima. Essa multifuncionalidade torna os SSP uma alternativa eficaz para a mitigação das emissões de GEE e para a adaptação às mudanças climáticas (MAZUMDER et al., 2025).

Além disso, Sistemas Silvipastoris podem recuperar pastagens degradadas, aumentar a produção de biomassa de forragem, e a capacidade de suporte do sistema (PAGIOLA et al., 2007; SOW et al., 2024), além de amenizar os extremos microclimáticos e promover ambiência e bem-estar animal através da sombra das árvores, promovendo uma maior qualidade de leite, eficiência reprodutiva e produtividade, visto que o estresse térmico causado pela exposição ao sol reduz a produtividade em até 20% (DENIZ et al., 2019; FISHER et al., 2008; PORFÍRIO, 2004). além de gerar uma renda extra ao produtor, viabilizada pela comercialização de produtos florestais não-madeireiros (ALVEZ et al., 2014).

SISTEMA SILVIPASTORIL COM NÚCLEOS

Buscando aplicar o conceito de restauração ecológica em agroecossistemas pastoris inseridos em biomas florestais, os Sistemas Silvipastoris configuram-se como um manejo regenerativo caracterizado pela integração de árvores ou arbustos, pastagens e animais (SCHMITT FILHO et al. 2013; SCHMITT FILHO et al. 2017). Existem diversos modelos de sistemas silvipastoris, mas este estudo, é avaliado o Sistema Silvipastoril com Núcleos (SSPnu), caracterizado como um sistema sucessional, inspirado na teoria da nucleação aplicada (REIS; KAGEYAMA, 2003), e estruturado com base no ecossistema original em que está inserido, neste caso, a Mata Atlântica. Por essa razão, o SSPnu é considerado um modelo de restauração ecológica (SCHMITT FILHO et al., 2023; SIMIONI et al., 2022; SCHMITT FILHO et al., 2017). A restauração ecológica tem como objetivo restabelecer a estrutura, composição e funcionamento do ecossistema natural ou seminatural, sem impor uma nova direção ou forma, adotando como modelo de referência o ecossistema nativo local e utilizando majoritariamente espécies vegetais nativas (SEOANE et al., 2023). É neste referencial teórico que SCHMITT FILHO et al. (2023) se inspiraram para desenhar de forma participativa o SSPnu. Este apresenta uma composição específica de espécies vegetais inspirada naquelas que ocorrem naturalmente no ambiente de origem. Essa abordagem busca conciliar a restauração ecológica com a produção agropecuária, promovendo a resiliência ecológica e contribuindo para a recuperação da funcionalidade e da diversidade estrutural dos ecossistemas florestais (SCHMITT et al., 2013; SCHMITT-FILHO & FARLEY, 2020).

Em contraste com os sistemas silvipastoris tradicionais, que geralmente adotam o plantio de árvores em fileiras ou aleias sobre a pastagem, o SSPnu apresenta uma configuração baseada em núcleos agroflorestais de vegetação biodiversa (SCHMITT FILHO, et al., 2023), com uma distribuição espacial distinta em comparação aos SSP convencionais. Além do aumento da biodiversidade, pesquisas realizadas já revelaram os múltiplos benefícios proporcionados pela implantação do SSPnu. Entre estes foi observado um incremento na biodiversidade e conectividade ecológica entre fragmentos florestais na paisagem com aumento na diversidade e riqueza formigas, abelhas e pássaros (BENTO, 2020 HECK et al., 2023; SIMIONI et al., 2022). O SSPnu também contribuiu para o restabelecimento de funções ecossistêmicas relacionadas ao microclima, ambiência e bem-estar aos animais

(DENIZ et al., 2019; SCHMITT-FILHO et al. 2023; MACHADO et al., 2024). Em avaliações dos atributos físicos, químicos e biológicos do solo observou-se um aumento nos teores e estoques de carbono e nitrogênio, além de amenizar o efeito da compactação do solo nas áreas sombreadas (BATTISTI et al., 2016; ZIN BATTISTI et al., 2018). Já com relação à biomassa arbórea, foi registrado uma grande capacidade em sequestrar e armazenar carbono nos núcleos (SILVA, 2020). Estes dados evidenciam o potencial do SSPnu de atuar na regulação climática, caso fossem implementados em uma larga escala (SCHMITT FILHO et al. 2023).

Entretanto, esse modelo também apresenta desafios, como o custo inicial de implantação, devido à densidade e diversidade de espécies, além da necessidade de um manejo mais intensivo e técnico nos primeiros anos para garantir o estabelecimento das espécies e o equilíbrio entre os componentes do sistema. Apesar disso, o SSPnu representa uma abordagem inovadora, promissora e viável para aliar a produção agropecuária à restauração ecológica em biomas florestais tropicais (FARLEY & SCHMITT FILHO, 2023).

No Sistema Silvipastoril com Núcleos (SSPnu), o componente florestal é alocado no interior de núcleos quadrados com dimensões de 5 metros por 5 metros, os quais são protegidos contra o forrageamento animal por meio de cercas elétricas. Esses núcleos ocupam 5% ou 10% da área total de cada piquete, a depender do tratamento adotado. A disposição espacial dos núcleos segue um arranjo equidistante dentro dos piquetes, com cada um orientado de modo que seus lados estejam voltados para os quatro pontos cardeais (norte, sul, leste e oeste) (SCHMITT FILHO et al. 2013, 2017, 2023). Esse arranjo visa em especial criar uma matriz de paisagem que imita bosques biodiversos 'ralos', além de aumentar a distribuição de sombra pelos piquetes. Desta forma tem-se diluído o pisoteio nos locais das sombras virtuais, em função do movimento rotacional da sombra durante o dia (DENIZ et al., 2019).

A seguir algumas fotos do estágio inicial de sucessão SSPnu na Unidade de Ensino e Pesquisa em Sistemas Silvipastoris com Núcleos (UEP SSPnu) na Fazenda Experimental da Ressacada (FER), área do Centro de Ciências Agrárias (CCA) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).



Figura 2 Piquetes antes da implantação do Sistema Silvipastoril com núcleos. Fonte: Acervo LASSre.



Figura 3 Bananeiras sendo plantadas próximas ao Quebra-vento de Capim-elefante. Fonte: Acervo Lassre.



Figura 4 Plantio de mudas nos Núcleos do Sistema Silvopastoril com núcleos com o quebra-vento de Capim-elefante bem desenvolvido. Fonte: Acervo Lassre.



Figura 5 Parte da equipe de implantação Fonte: Acervo Lassre.



Figura 6 Equipe de implantação, e ao fundo alguns núcleos com o capim-elefante bem desenvolvido.
Fonte: Acervo Lassre.



Figura 7 Núcleo com o Capim-elefante e Feijão-guandú bem desenvolvidos, criando um microclima melhor para o desenvolvimento das mudas de arbóreas e de bananeiras. Fonte: Acervo Lassre.



Figura 8 Núcleo com os Feijão-guandú bem desenvolvidos, criando um microclima melhor para o desenvolvimento das mudas de arbóreas e de bananeiras. abril de 2020. Fonte: Acervo Lassre.



Figura 9 Amendoim-forrageiro bem desenvolvido ao lado das mudas de bananeira e tucaneira, dentro do núcleo. Fonte: Acervo Lassre.



Figura 10 Núcleos arbóreos. Fonte: Acervo Lassre.



Figura 11 Núcleos com as bananeiras bem desenvolvidas. Fonte: Acervo Lassre.



Figura 12 Atividade de avaliação qualitativa do solo com os Professores Arcangelo Loss e Jucinei Comin nos núcleos arbóreos (sob a sombra das bananeiras) . Fonte: Acervo Lassre.



Figura 13 Medição das árvores do SSPnu. Fonte: Acervo do autor



Figura 14 Foto aérea do SSPnu. Fonte: Raphael Buch



Figura 15 Foto aérea do SSPnu. Fonte: Raphael Buch



Figura 16 Foto aérea do SSPnu. Fonte: Raphael Buch



Figura 17 Foto do rebanho sob a sombra do SSPnu. Fonte: Raphael Buch



Figura 18 Foto aérea do SSPnu com as copas das árvores emergindo no dossel. Fonte: Raphael Buch



Figura 19 Foto aérea do SSPnu com 6 anos. Fonte: Raphael Buch



Figura 20 Núcleos arbóreos e o rebanho bovino em 2022. Fonte: O autor.



Figura 21 Foto aérea de um bloco. Fonte: Google Earth, 2022



Figura 22 Foto aérea de dois piquetes do SSPnúcleos com 10% de ocupação. Fonte: Raphael Buch, 2024

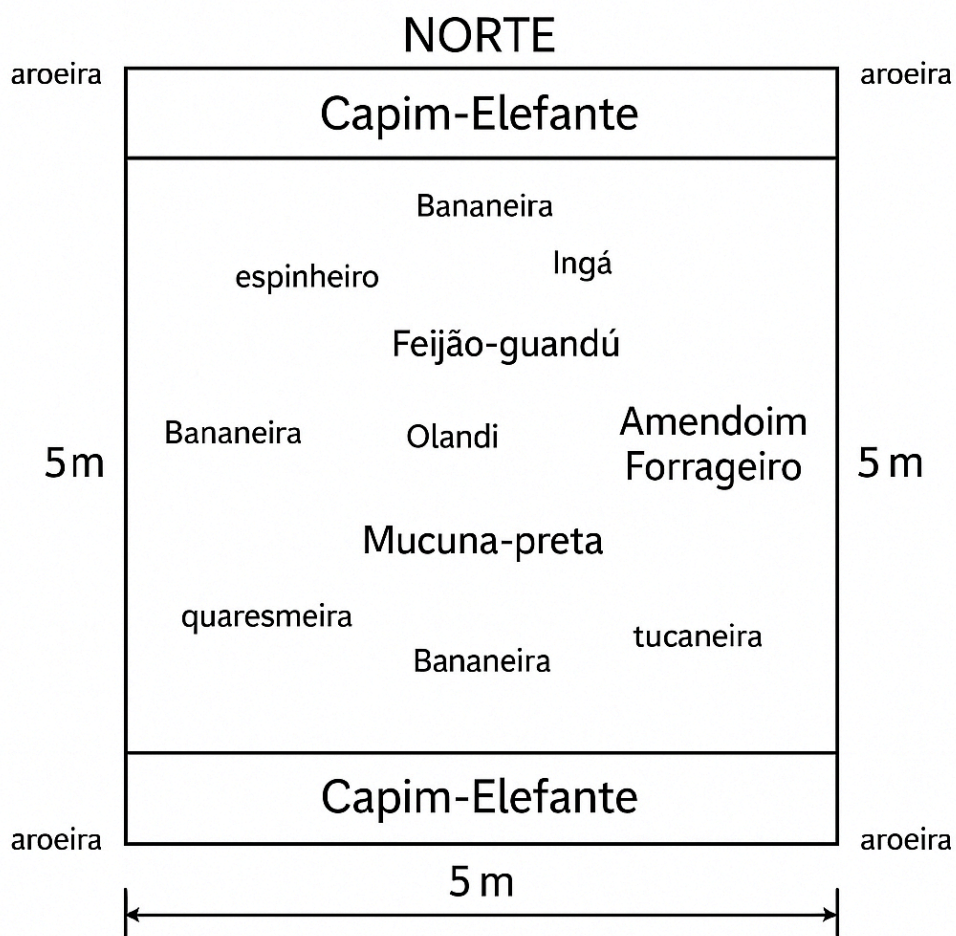


Figura 23 Croqui com a disposição das plantas nos núcleos do Sistema Silvopastoril com Núcleos. Fonte: Acervo do autor.

Quanto à estimativa do potencial de geração de renda dos núcleos do SSPnu, considerou-se, de forma conservadora, apenas a produção de frutos da palmeira juçara (*Euterpe edulis*) e da banana (*Musa paradisiaca*). Para a juçara, adotou-se uma produtividade média de 10 kg de frutos por planta por ano, com preço de comercialização de R\$ 4,00/kg. Considerando três indivíduos por núcleo, a receita anual estimada é de R\$ 120,00 por núcleo. Para a banana, estimou-se a produção de 15 kg por cacho, a R\$ 0,70/kg, resultando em R\$ 31,50 por núcleo ao ano, também com três indivíduos. Dessa forma, a receita anual combinada de frutos (juçara + banana) atinge R\$ 151,50 por núcleo.

Quando extrapolados para a escala por hectare, considerando densidades de 20 e 40 núcleos, a receita anual proveniente dessas duas culturas varia de R\$ 3.030,00/ha a R\$ 6.060,00/ha, sendo a juçara responsável pela maior parcela do valor (R\$ 2.400,00/ha e R\$ 4.800,00/ha, respectivamente), enquanto a banana contribui com R\$ 630,00/ha e R\$ 1.260,00/ha, respectivamente.

Embora esta projeção considere apenas banana e juçara, o sistema apresenta potencial adicional de diversificação e incremento de renda, incluindo a comercialização de madeira proveniente de manejo sustentável de espécies arbóreas, a colheita de frutos da aroeira (*Schinus terebinthifolia*, pimenta-rosa) e a produção de mel e derivados por meio da meliponicultura integrada. A inclusão desses produtos pode ampliar significativamente a rentabilidade, além de fortalecer a resiliência econômica e ambiental dos sistemas silvipastoris com núcleos.

ESTRATÉGIAS PARA O MANEJO: ATRIBUTOS E GRUPOS FUNCIONAIS, PLANTAS FACILITADORAS, QUEBRA-VENTO E ADUBAÇÃO VERDE.

Um agroecossistema pastoril sem a presença de árvores tem diferentes características de um ambiente florestal, no qual as espécies arbóreas coevoluíram. Uma pastagem é um ambiente hostil e de muitas perturbações para as mudas arbóreas, principalmente pela exposição à luminosidade direta e rajada de ventos, sendo um microclima muito diferente do proporcionado pela estrutura florestal, de maior umidade e proteção solar e dos ventos. Por esses fatores, é importante tomar alguns cuidados e criar uma estratégia de manejo para a inserção de mudas arbóreas nas paisagens pastoris abertas. Esta estratégia passa por entendermos a importância da sucessão ecológica para o estabelecimento das espécies arbóreas. Este

entendimento nos leva à uma escolha criteriosa das espécies e da compreensão dos papéis que cada uma desempenhará no sistema, que variará dependendo das demandas dos atores envolvidos, da região, do nível de degradação, das especificidades do microclima, da topografia e dos diferentes objetivos de manejo (FIKE et al., 2017, SCHMITT FILLHO & FARLEY, 2020), além da própria disponibilidade de mudas e sementes para compra e coleta.

As funções desempenhadas por cada planta no sistema são chamadas de atributos funcionais, que pela definição, pode ser qualquer característica fisiológica, fenológica, ou morfológica, possível de mensurada a nível de indivíduo, e que influencie diretamente na sua habilidade de adaptação ao ambiente, seja atuando sobre seu estabelecimento, crescimento, reprodução ou sobrevivência (VIOLLE et al., 2007), e que de certa forma possa afetar o funcionamento de todo ecossistema (LAVOREL & GARNIER, 2002). Alguns exemplos são o tamanho de raiz, tamanho da semente, habilidade de rebrote, área foliar, conteúdo de nitrogênio foliar, capacidade de fixação de nitrogênio, altura da planta, entre outros (DÍAZ & CABIDO, 2001).

Em um sistema biodiverso como o SSPnu, com múltiplos atributos funcionais no ecossistema, ocorrem interações ecológicas de facilitação entre as espécies, promovendo maior captura de recursos, eficiência no uso e aumento da produtividade (WRIGHT et al., 2021). A diversidade de espécies exerce papel central na manutenção da produtividade e resiliência dos ecossistemas, sendo capaz de superar os efeitos de perturbações ambientais como herbivoria, seca e adição de nutrientes. Em sistemas biodiversos, mecanismos como a complementaridade de nicho, uso mais eficiente de recursos e menor incidência de pragas contribuem para um aumento progressivo na produção vegetal ao longo do tempo (TILMAN et al., 2014).

Contudo, evidências recentes destacam que essa complementaridade também abrange múltiplos mecanismos de facilitação, como a diluição de patógenos específicos, melhorias microclimáticas, defesa associativa e mudanças positivas na ciclagem de nutrientes. Tais mecanismos facilitadores estão intrinsecamente ligados à diversidade e contribuem diretamente para o fortalecimento das funções ecossistêmicas (WRIGHT et al., 2021). Esse fenômeno, conhecido como complementaridade de nicho, reduz a competição interespecífica e intensifica a facilitação (REICH et al., 2012).

A partir disto, espécies semelhantes funcionalmente e que respondem de forma similar às condições ambientais, ou seja, que compartilham dos mesmos atributos

funcionais, são agrupadas em grupos funcionais (FRANKS et al., 2009). Grupo funcional se define como uma classificação não-filogenética que leva à um agrupamento de organismos que respondem de maneira similar às condições ambientais ou têm um efeito comum no funcionamento do ecossistema (LAVOREL et al., 1997; MORAIS & CIANCIARUSO, 2014). No caso do SSPnu, temos dois grupos funcionais, o grupo funcional zero (GF0), composto pelas espécies herbáceas facilitadoras: *Penisetum purpurium* (capim-elefante) desempenhando papel de quebra-vento, *Musa paradisiaca* (Bananeira), e indivíduos da família das leguminosas, para adubação verde: *Cajanus cajan* (Guandú), *Arachis pintoii* (amendoim forrageiro), *Mucuna pruriens* (Mucuna Preta); e o grupo funcional 1 (GF1), composto por espécies arbóreas pioneiras: *Tibouchina granulosa* (quaresmeira), *Citharexylum myrianthum* (tucaneira), *Calophyllum brasiliense* (olandi), *Inga edulis* (ingá), *Mimosa bimucronata* (espinheiro ou Maricá) e *Schinus terebinthifolia* (aroeira). Além do sub-bosque composto por uma pastagem naturalizada polifítica, já presente no local previamente à implantação do SSPnu (SCHMITT FILHO & FARLEY, 2023; MACHADO et al. 2023).

Facilitação entre plantas refere-se a interações positivas em que uma espécie beneficia outra, direta ou indiretamente, promovendo seu crescimento, sobrevivência ou reprodução, especialmente sob condições ambientais limitantes. Esses mecanismos são fundamentais na sucessão ecológica, na restauração de ecossistemas e na organização de comunidades vegetais em ambientes diversos (LIANCOURT & DOLEZAL, 2021). O GF0 é composto por plantas facilitadoras, e conforme a definição, a facilitação é definida como o efeito positivo de uma espécie sobre outra, denominada beneficiária, promovido por meio de mecanismos que favorecem interações positivas entre plantas. Esses mecanismos de facilitação podem modificar o ambiente biótico ou abiótico de forma a reduzir estresses, aumentar a disponibilidade de recursos ou criar condições mais favoráveis para o crescimento, estabelecimento ou sobrevivência da espécie beneficiária. Tais interações ocorrem ao longo do tempo e podem gerar benefícios unilaterais ou mútuos, desempenhando papel fundamental na dinâmica de comunidades vegetais, especialmente em ambientes sob forte limitação ambiental ou em estágios iniciais de sucessão ecológica. (O'BRIEN et al., 2019). Plantas facilitadoras podem ser utilizadas para diversas finalidades, no caso da SSPnu, a presença delas é importante pois uma das características das plantas facilitadoras é que elas permitem a retomada em ambientes com baixa regeneração e com condições ambientais extremas,

modificando positivamente a dinâmica e a estrutura da comunidade, a partir da formação de microambientes (LIANCOURT & DOLEZAL, 2021).

As interações entre plantas em comunidades biodiversas resultam de uma complexa combinação de efeitos positivos e negativos, frequentemente mediados por mecanismos fisiológicos relacionados à disponibilidade de luz. Embora o sombreamento entre vizinhas geralmente implique competição por luz, ele também pode atenuar o estresse luminoso, especialmente em espécies tolerantes à sombra, promovendo facilitação. Em um experimento com árvores de clima temperado, observou-se que algumas espécies aumentaram seu crescimento sob sombreamento, com destaque para *Tilia americana*, que apresentou maior assimilação de carbono e prolongamento do período vegetativo em ambientes parcialmente sombreados. A fotoinibição, indicadora de estresse por luz excessiva, foi reduzida nessas condições, sugerindo que o sombreamento pode favorecer a performance de determinadas espécies. Esses resultados evidenciam que respostas fisiológicas à luz, como a fotossíntese e o alongamento caular, são determinantes nas interações interespecíficas, reforçando o papel da facilitação como mecanismo chave nas relações entre biodiversidade e funcionamento ecossistêmico (KOTHARI et al., 2021)

Sistemas consorciados têm potencial para melhorar a eficiência no uso da água e promover maior estabilidade nos agroecossistemas. Uma meta-análise global com mais de 1200 observações mostrou que o consórcio de culturas reduziu, em média, o conteúdo de água no solo em 1,31 %, o escoamento superficial em 29,17 % e a evaporação do solo em 10,30 %, ao mesmo tempo em que aumentou a transpiração foliar em 9,85 % e a eficiência no uso da água em 29,46 %. Esses efeitos variaram conforme o clima, as características do solo e as práticas de manejo adotadas, sendo explicados por mecanismos como complementaridade de recursos, facilitação abiótica e retroalimentações bióticas. Esses resultados destacam o papel do consórcio como estratégia eficaz para otimizar o uso da água e tornar os sistemas agrícolas mais resilientes frente ao estresse hídrico (LIU et al., 2025).

Há evidências amplas de que certas plantas atuam como facilitadoras ao moderarem o microclima, promovendo benefícios diretos às espécies associadas. Esses efeitos podem ocorrer em escala local, ao melhorar as condições abióticas vivenciadas pelos indivíduos beneficiados, ou em escala de paisagem, ao aumentar a persistência populacional por meio da heterogeneidade ambiental e da conectividade (BRIGHAM & SUDING, 2024)

A facilitação por espécies pioneiras tolerantes a metais e acidez pode ser decisiva para acelerar a sucessão ecológica em áreas degradadas por mineração, especialmente em locais remotos onde a restauração ativa é limitada por custos e logística. Em um estudo com mais de 40 anos de sucessão natural em depósitos de rejeitos de níquel e cobre no Canadá, observou-se que espécies nativas tolerantes, como *Betula papyrifera*, *Populus tremuloides* e *Pohlia nutans*, favoreceram o estabelecimento de espécies menos tolerantes. Embora coníferas e leguminosas fixadoras de nitrogênio tenham sido plantadas em áreas corrigidas com calagem e adubação, apenas a leguminosa *Lotus corniculatus* mostrou associação positiva com o aumento da diversidade. Esses resultados reforçam o papel funcional de espécies pioneiras adaptadas como facilitadoras da colonização vegetal em ambientes extremos, oferecendo subsídios para estratégias de restauração baseadas na sucessão natural assistida (MUNFORD et al., 2022).

Interações facilitadoras entre plantas em sistemas consorciados podem aumentar a produtividade agrícola ao mesmo tempo em que reduzem a necessidade de fertilizantes nitrogenados e melhoram a eficiência de emissão de carbono. Em um experimento de dois anos em ambiente semiárido, o consórcio de soja com trigo ou milho apresentou valores de razão de uso da terra superiores a 1, indicando facilitação entre espécies, enquanto o consórcio milho-trigo evidenciou competição. A facilitação resultou em maior eficiência no uso do nitrogênio e menor necessidade de aplicação de N, mesmo com aumento da produtividade. Além disso, a facilitação elevou a emissão de carbono devido ao aumento da atividade microbiana e das enzimas relacionadas à degradação de C e N, mas essa maior emissão foi compensada por um aumento ainda mais expressivo na produtividade, elevando a eficiência de emissão de carbono. Esses resultados apontam a facilitação entre plantas como uma estratégia promissora para sistemas agrícolas mais produtivos e ambientalmente eficientes (WANG et al., 2023).

A compreensão dos efeitos da facilitação nas interações ecológicas ainda é limitada pela escassa integração desse fenômeno em modelos teóricos de dinâmica populacional. No entanto, estudos recentes demonstram que interações facilitadoras podem ser classificadas em tipos dinamicamente análogos a categorias já bem descritas pela teoria populacional, como interações mutuamente benéficas ou assimétricas. Essa aproximação teórica permite incorporar a facilitação em estruturas formais que antes eram dominadas por modelos baseados exclusivamente na

competição. Além disso, a teoria moderna da coexistência já reconhece que nem todas as interações entre espécies são competitivas, abrindo espaço para o papel estabilizador da facilitação na manutenção da biodiversidade. A adoção de modelos que considerem a reciprocidade, a densidade populacional e as interações intraespecíficas pode aprofundar a compreensão dos desfechos ecológicos mediados pela facilitação, reforçando sua relevância nos processos de montagem e estabilidade das comunidades (HART, 2023).

A facilitação entre plantas desempenha papel relevante na restauração de florestas tropicais secas, promovendo maior produção de biomassa foliar e distribuição mais equitativa entre as espécies. Em um experimento com 147 comunidades vegetais de diferentes níveis de diversidade e potencial de facilitação, observou-se que a facilitação aumentou o desempenho coletivo das espécies, mesmo sem estar diretamente associada aos traços funcionais medidos. O efeito de complementaridade foi positivo, indicando melhor desempenho das espécies em cultivos biodiversos do que em monocultivos, enquanto o efeito de seleção foi negativo, sugerindo que espécies de baixo desempenho individual se beneficiaram da presença de outras. A facilitação também reduziu a dominância de espécies mais competitivas, favorecendo maior estabilidade e confiabilidade do ecossistema restaurado. Esses resultados reforçam que, para maximizar o sucesso da restauração, é estratégico utilizarmos espécies com alto potencial facilitador na composição dos plantios (FAGUNDES et al., 2023).

A força da facilitação entre plantas pode ser prevista a partir da compatibilidade funcional entre espécies enfermeiras e suas beneficiárias. Em um experimento com 60 combinações conduzido em floresta tropical sazonalmente seca, verificou-se que características como área foliar específica, eficiência no uso da água e volume radicular influenciam a intensidade das interações positivas. Espécies enfermeiras com traços conservativos, como baixa área foliar específica e menor eficiência hídrica, favoreceram o crescimento de espécies alvo com estratégias aquisitivas, como alta taxa de crescimento apical e maior alocação de biomassa em raízes. Esses resultados indicam que a combinação funcional entre enfermeiras e beneficiárias, especialmente em relação à estratégias de uso de recursos e tolerância à seca, determina a magnitude da facilitação. Compreender essas relações permite otimizar a seleção de espécies para restauração ecológica, priorizando combinações que maximizem a

sobrevivência e o desempenho das espécies alvo em ambientes limitantes (FAGUNDES et al., 2022).

Os efeitos da diversidade vegetal sobre a produtividade da comunidade tendem a se intensificar ao longo do tempo, impulsionados por mudanças na performance relativa das espécies em comunidades biodiversas. A partir da análise de 65 experimentos em pastagens e florestas, observou-se que o aumento temporal da produtividade está relacionado ao chamado "overyielding", ou seja, à maior produtividade de certas espécies em cultivos biodiversos do que em monocultivos. Esse padrão é influenciado por estratégias ecológicas específicas, determinadas por traços funcionais, como a facilitação. A combinação de espécies com estratégias ecológicas complementares favorece a produtividade à longo prazo, tanto em ecossistemas campestres quanto florestais (ZHENG et al., 2024).

A facilitação promovida por árvores enfermeiras influencia fortemente a composição de comunidades vegetais em sucessão primária, especialmente em ambientes degradados. Em um estudo realizado em um local degradado pela mineração, observou-se que diferentes espécies de árvores criaram microambientes distintos, afetando de forma específica a abundância de espécies colonizadoras sob suas copas. Embora fatores ambientais como a temperatura do solo também tenham influenciado a distribuição das plantas, os efeitos das árvores enfermeiras foram decisivos para a presença de certos arbustos e trepadeiras. Mesmo sendo espécies exóticas, as árvores avaliadas facilitaram o estabelecimento de espécies nativas e exóticas, sugerindo que a manutenção de plantas com potencial de facilitação pode favorecer a restauração (HOLMES & KUEBBING, 2022).

A diversidade de espécies potencializa os efeitos positivos da facilitação vegetal em condições de estresse hídrico. Em um experimento conduzido em área agrícola abandonada de clima semiárido mediterrâneo, observou-se que comunidades com três espécies transplantadas sob plantas enfermeiras apresentaram maior sobrevivência e produção de biomassa durante a seca, quando comparadas a comunidades monoculturais ou expostas em áreas abertas. A facilitação foi mais eficaz em contextos de alta diversidade, superando os efeitos negativos da competição intra e interespecífica. Os mecanismos envolvidos incluíram complementaridade entre espécies, redução da dominância competitiva e plasticidade de traços funcionais em direção a perfis mais tolerantes ao estresse. Em contraste com a irrigação, que reforçou hierarquias competitivas, as enfermeiras favoreceram

espécies menos competitivas, promovendo maior equilíbrio funcional. Esses resultados reforçam a importância das plantas facilitadoras para mitigar os impactos da seca e manter a biodiversidade e a produtividade em ambientes sob mudanças climáticas (DANET et al., 2024).

Espécies arbóreas de sucessão inicial podem favorecer a regeneração vegetal em ambientes sazonalmente secos ao modificar o microclima e atenuar o estresse ambiental. Em estudo de campo, avaliou-se o efeito de três espécies pioneiras adultas (*Combretum leprosum*, *Cenostigma bracteosum* e *Mimosa tenuiflora*) sobre duas espécies regenerantes (*Cordia oncocalyx* e *Croton blanchetianus*), considerando variáveis morfofisiológicas e ambientais. Observou-se que *C. leprosum* e *C. bracteosum* atuaram como facilitadoras, reduzindo a radiação solar em até 55% na estação chuvosa e aumentando significativamente a umidade do solo, especialmente sob *C. leprosum*, com acréscimos superiores a 38% no teor de água gravimétrica. Essas condições favoreceram a assimilação de CO₂, condutância estomática, transpiração e crescimento das espécies-alvo. Por outro lado, não foram detectados efeitos positivos sob a copa de *M. tenuiflora* nem em áreas abertas, onde os indivíduos apresentaram menor desempenho fisiológico. Os resultados reforçam que o potencial de facilitação depende das características funcionais das espécies enfermeiras e que sua seleção adequada pode contribuir para acelerar os processos de regeneração em ambientes semiáridos (SALES LUCAS et al., 2022).

Visto isso, a facilitação é um mecanismo importante para o desenvolvimento de quaisquer SSP e em especial para o SSPnu, visto que é um sistema biodiverso e sucessional. Este é caracterizado pela dinâmica de sucessão das espécies que o compõe, em que cada estágio é marcado pela presença de espécies que criam as condições ambientais ideais para o desenvolvimento das espécies do estágio seguinte (SANTOS, 2020). Logo, o GF0 é composto por plantas que se desenvolvem bem nas condições ambientais encontradas no momento inicial de implantação do SSPnu com exposição direta ao sol e ao vento. Estas plantas atuam como plantas facilitadoras, promovendo benefícios para o estabelecimento das arbóreas pioneiras que foram introduzidas em seguida, e que compõe o grupo funcional 1 (GF1). Estes benefícios são principalmente a sombra e quebra-vento, gerados pelo guandú e pelo capim-elefante, criando um microclima melhor para a introdução das mudas florestais e adubação verde proporcionado pelo amendoim-forrageiro, guandú e mucuna-preta (SCHMITT FILHO & FARLEY, 2020; SCHMITT FILHO et al., 2023).

A adubação verde, é viabilizada principalmente por plantas da família das leguminosas, e é uma técnica para promover a qualidade do solo. Estas plantas, se associam com bactérias fixadoras do nitrogênio atmosférico (N_2), e disponibilizam nutrientes às outras plantas do sistema, por meio da incorporação da biomassa ou deposição sobre o solo (ESPÍNDOLA et al., 2004). A utilização da técnica da adubação verde contribui para a ciclagem de nutrientes, e tem potencial para melhorar a qualidade do solo, aumentar a produtividade agrícola e ajuda a prevenir ou reverter processos de degradação da qualidade do solo (LIMA FILHO, 2023). Outro benefício interessante de se inserir leguminosas no sistema é que espécies fixadoras de nitrogênio contribuem para a melhoria da fertilidade do solo e, ao elevar a qualidade edáfica da área, podem estimular o aumento da produção de biomassa das outras espécies presentes (POORTER et al., 2015). As leguminosas representam um componente funcional essencial nos ecossistemas terrestres, exercendo papel central na ciclagem e disponibilidade de nitrogênio (N) no solo, fator determinante para a produtividade em diversos tipos de ecossistemas. Uma meta-análise global recente demonstrou que a presença de leguminosas promoveu um aumento médio de 67% na taxa líquida de mineralização de N no solo, valor substancialmente superior ao observado em função da fixação biológica do N atmosférico (25%). Os efeitos positivos foram consistentes tanto em regiões tropicais (53%) quanto temperadas (81%), e mais pronunciados em ecossistemas naturais como pastagens (151%) e florestas (74%), em contraste com os sistemas agrícolas, nos quais não se observou aumento significativo (GOU et al., 2023).

O quebra-vento é definido como o plantio de uma ou múltiplas fileiras de árvores ou arbustos estabelecidos para um ou mais propósitos ecológicos (UNIVERSITY OF MINNESOTA, 2012, MACHADO et al. 2024). Entre os benefícios que o quebra-vento pode proporcionar, estão o aumento da produtividade de culturas agrícolas, pastagem e animais, pois atuam criando um abrigo às plantas. Este abrigo amortiza o fluxo dos ventos, criando um microclima mais adequado aos animais, plantas e o solo. Melhorias no microclima diminuem as perdas de água das plantas, além dos danos físicos que o vento pode provocar a vegetação, que podem servir de porta de entrada de patógenos. Já no solo, o quebra-vento reduz a erosão eólica, além de deixar o solo mais úmido e com menor amplitude térmica. Em um contexto silvopastoril, o quebra-vento é um componente importante para o sucesso do sistema, além de prover uma

ampla gama de serviços ecossistêmicos (CLEUGH, 1998; DAWID MUME et al., 2021; WENINGER et al., 2021).

Os quebra-ventos agroflorestais atuam como elementos facilitadores, promovendo múltiplos benefícios agronômicos, ecológicos e produtivos. De acordo com a revisão realizada por (DAWID MUME et al., 2021), os quebra-ventos reduzem significativamente a velocidade do vento nas áreas de cultivo, o que resulta em menor evapotranspiração, maior eficiência no uso da água e aumento da produtividade de culturas sensíveis ao estresse hídrico. Além disso, esses sistemas contribuem para a redução da erosão eólica, melhoria da estrutura e fertilidade do solo, e criação de microclimas mais favoráveis ao desenvolvimento vegetal. O estudo também destaca que quebra-ventos bem estabelecidos podem elevar a produtividade de pastagens em até 20%, e aumentar a produção de leite em sistemas pecuários em cerca de 10%, evidenciando seu papel como elementos facilitadores tanto para a agricultura quanto para a pecuária. Em termos comparativos, os sistemas com quebra-ventos demonstram maior estabilidade produtiva e menores perdas ambientais em relação a sistemas convencionais expostos, posicionando-se como uma estratégia eficaz para adaptação climática e intensificação sustentável da produção agrícola (MACHADO et al. 2024).

Quebra-ventos arbóreos promovem uma série de serviços ecossistêmicos que influenciam positivamente parâmetros agronômicos e produtivos. De acordo com (WENINGER et al., 2021), os quebra-ventos contribuem diretamente para a melhoria do microclima, aumento da produtividade das culturas e da pastagem, e mitigação de estresses ambientais. Ao reduzir a velocidade do vento, os quebra-ventos minimizam perdas por evaporação e erosão, aumentam a retenção de umidade no solo e melhoram a eficiência no uso de recursos pelas plantas. Os autores destacam que, em comparação com áreas agrícolas desprotegidas, os sistemas com quebra-ventos apresentam ganhos consistentes na produtividade e na estabilidade de rendimento ao longo do tempo, maior diversidade funcional na paisagem rural. Além disso, esses elementos promovem serviços regulatórios e de suporte, como a polinização, controle biológico de pragas e conectividade ecológica, reforçando seu papel como estruturas multifuncionais que vão além da simples barreira física, atuando como verdadeiros "enfermeiros" do sistema produtivo.

Estudos têm demonstrado que quebra-ventos podem desempenhar papel crucial como facilitadores no estabelecimento e crescimento de espécies arbóreas,

especialmente em ambientes com condições climáticas adversas. Ao avaliarem os efeitos do quebra-vento composto por vegetação nativa sobre mudas de *Pinus pumila* em ambientes subalpinos no Monte Seoraksan, Coreia do Sul, (LIM et al., 2020), observaram que quebra-ventos proporcionaram melhorias significativas em múltiplos parâmetros de desempenho das plântulas. Nas parcelas protegidas, a taxa de sobrevivência foi de 96,7% no primeiro ano, enquanto em áreas expostas, todas as mudas pereceram em até sete meses. A presença dos quebra-ventos também favoreceu o enraizamento, com 85,3% das mudas apresentando bom desenvolvimento radicular, e promoveu aumentos expressivos no crescimento, com elevações de 2,5 vezes na altura e 2,8 vezes no diâmetro do colo após três anos. Esses benefícios foram atribuídos à capacidade dos quebra-ventos de reduzir a velocidade do vento em até 28% durante o inverno, diminuir a perda de umidade do solo e criar um microclima mais favorável ao desenvolvimento das plantas. Tais resultados reforçam a função dos quebra-ventos vegetais como estruturas análogas às espécies enfermeiras, promovendo a regeneração vegetal em áreas sujeitas a estresses abióticos severos, e indicam seu potencial de aplicação em estratégias de restauração ecológica (LIM et al., 2020, MACHADO et al. 2024).

CARBONO EM SISTEMAS SILVIPASTORIS

O ciclo do carbono é um dos processos biogeoquímicos mais importantes na Terra, desempenhando um papel fundamental na manutenção do equilíbrio climático e na sustentação da vida. Ele descreve a troca contínua de carbono entre os compartimentos terrestres, incluindo a atmosfera, a biosfera, a litosfera e os oceanos. Este ciclo é impulsionado por processos físicos, químicos e biológicos que envolvem a fixação, o armazenamento e a liberação de carbono em diferentes formas químicas. Na atmosfera, o carbono encontra-se predominantemente na forma de dióxido de carbono (CO_2) e, em menor quantidade, como metano (CH_4). Esses gases desempenham um papel crucial no efeito estufa, regulando a temperatura global. Outro processo chave no ciclo do carbono é a fotossíntese, realizada pelas plantas, algas e cianobactérias, que é o principal processo de fixação do carbono atmosférico, por isto a importância de sistemas agrícolas regenerativos para o combate às mudanças climáticas (ADUAN et al., 2004).

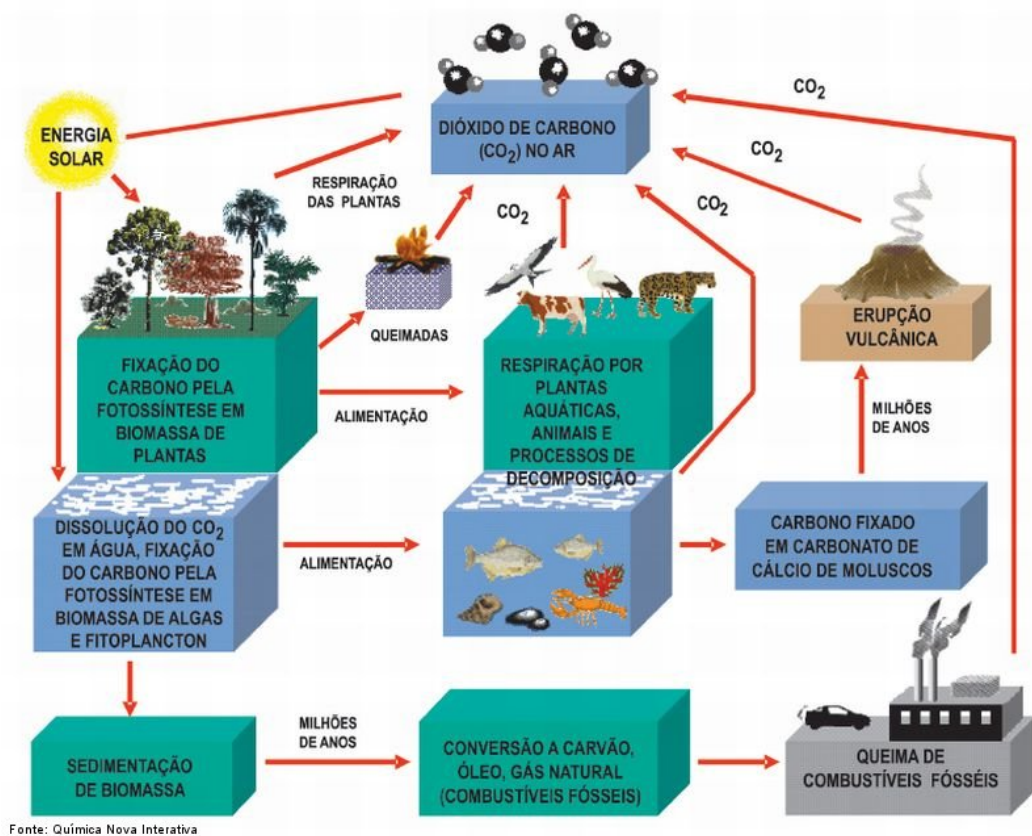


Figura 24 Ciclo do carbono. Fonte: <http://www.repositorio.ppec.ueg.br:8080/handle/123456789/41>

O solo e a biomassa vegetal representam importantes compartimentos de armazenamento de carbono nos ecossistemas terrestres. No solo, o carbono encontra-se majoritariamente na forma de matéria orgânica, cuja dinâmica é regulada por processos como a decomposição e a mineralização. Esses processos liberam CO₂ para a atmosfera por meio da respiração dos organismos e da degradação da matéria orgânica, completando o ciclo local do carbono. Os solos constituem o maior reservatório terrestre de carbono, com cerca de 2344 gigatoneladas (Gt), três a quatro vezes mais que a atmosfera. Já as florestas tropicais, armazenam cerca de 55% do total de carbono florestal do planeta, sendo que 32% desse carbono está no solo, desempenhando um papel central no ciclo global do carbono e na estabilidade climática (MALHI et al., 2014). Esse carbono estocado desempenha um papel central na regulação climática, especialmente em ecossistemas como florestas tropicais, sistemas agroflorestais e silvipastoris, que funcionam como sumidouros de carbono. Entretanto, perturbações nos estoques, de origem natural ou antrópica, podem gerar efeitos expressivos nas concentrações de CO₂ atmosférico, com implicações relevantes para o equilíbrio climático global. (SILVA et al., 2022).

Entre as perturbações de origem antrópica ao carbono estocado, uma das principais ocorre através da mudança no uso da terra, principalmente através do desmatamento para expansão da fronteira agrícola. O desmatamento de uma floresta libera o carbono armazenado na madeira (principalmente quando esta é queimada), e no solo, reduzindo os reservatórios naturais e os sumidouros de carbono, fundamentais para a absorção do dióxido de carbono presente na atmosfera (ODUM, 2007). Além disso, o desmatamento leva à perda de biodiversidade do solo e promove o aumento das emissões de GEE (SINGH et al., 2020). Estima-se que, na década antecessora ao estudo, 12,5% das emissões globais de CO₂ tiveram origem na mudança do uso da terra (LAI et al., 2016), sendo que, entre 2010 e 2014, a expansão agrícola em áreas tropicais geraram emissões líquidas de aproximadamente 2,6 gigatoneladas de CO₂ por ano (PENDRILL et al., 2019). Em uma revisão sobre os impactos da conversão de florestas em áreas agrícolas, (MURTY et al., 2002) demonstraram que essa mudança no uso da terra acarreta, em média, uma perda de aproximadamente 30% do carbono orgânico do solo (SOC), podendo chegar a 50% em casos mais extremos. Além disso, observa-se um aumento de cerca de 35% na emissão de CO₂, acompanhado de alterações negativas em diversos indicadores edáficos e ecológicos, como a composição da vegetação, a atividade microbiana, a taxa de infiltração de água no solo, o teor de nitrogênio total e a fração de argila, todos sensíveis à mudança no uso da terra e indicativos da degradação da qualidade do solo associada à expansão agrícola (AHIRWAL et al., 2021). Tais impactos evidenciam que a substituição de áreas florestais por sistemas agrícolas torna os solos de sumidouros em fontes de emissão de carbono, intensificando os efeitos das mudanças climáticas.

Uma vez perdido, o carbono que estava armazenado no solo e na vegetação pode levar décadas ou até séculos para ser recapturado, pois a recuperação dos estoques de carbono após distúrbios ecológicos, como o desmatamento, é um processo lento e fortemente condicionado pela severidade do impacto. Apesar de a maioria dos compartimentos e fluxos de carbono tender a retornar à um estado relativamente estável, os tempos de recuperação podem ser prolongados, especialmente em ecossistemas florestais. A biomassa total, por exemplo, pode exigir mais de um século (104 ± 33 anos) para se restabelecer, e o tempo médio necessário para a recuperação do carbono perdido após o desmatamento é estimado em cerca de 101 ± 28 anos (FU et al., 2017)

Estes dados evidenciam a urgência em evitar novas formas de degradação e em adotar práticas conservacionistas, como sistemas silvipastoris, que assegurem a manutenção dos estoques de carbono e a estabilidade do ciclo biogeoquímico nos ecossistemas terrestres. Nesse contexto, a expansão agrícola sobre áreas preservadas deve ser fortemente evitada, reforçando o papel da restauração ecológica como estratégia fundamental para o enfrentamento da crise climática global (BUSTAMANTE et al., 2019)

Diante dos desafios impostos pelas mudanças climáticas, torna-se fundamental o desenvolvimento e a adoção de sistemas agrícolas regenerativos, capazes de conciliar produção com conservação ambiental e acúmulo de carbono e biomassa. Neste sentido há diversos artigos publicados que trazem evidências que corroboram com a narrativa acima, e revelam a capacidade deste sistema de acumular carbono, como o de FELICIANO et al. (2018), que coletou dados de 86 estudos publicados e revisados por pares sobre o sequestro de carbono abaixo e acima do solo em sistemas agroflorestais, em diversos climas e regiões do mundo. Os resultados indicam que o sistema que apresenta maior sequestro de carbono no solo são os sistemas silvipastoris ($4,38 \text{ tC ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), e em termos de mudança no uso da terra, e o maior sequestro de carbono no solo resulta da transição de um sistema de pastagem para um sistema silvipastoril ($4,38 \text{ tC ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$).

Uma revisão sistemática da literatura foi realizada com o objetivo de quantificar os efeitos dos sistemas silvipastoris e agroflorestais sobre os estoques de carbono orgânico do solo (COS). A análise comparou áreas sob SSP com pastagens degradadas, monocultivos agrícolas e outros sistemas convencionais, evidenciando aumentos expressivos no COS, atribuídos à presença de árvores com raízes profundas, maior aporte de serapilheira e estabilidade estrutural do solo. Fatores como densidade e diversidade arbórea, tempo de implantação e manejo influenciam diretamente o acúmulo de carbono no solo, especialmente em regiões tropicais e subtropicais. Em complemento, uma metanálise global baseada em 129 estudos primários estimou os estoques médios de carbono em sistemas agroflorestais em $40,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ na biomassa e $159,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ no solo até 1 metro de profundidade, com taxas médias de sequestro de $5,7 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ na biomassa e $1,4 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no solo. Dentre os arranjos avaliados, os sistemas agrossilvipastoris apresentaram os maiores estoques e taxas de sequestro de carbono no solo, reforçando seu potencial para mitigar emissões de gases de efeito estufa associadas ao uso da terra. Esses

resultados fornecem valores de referência úteis para o monitoramento do desempenho de sistemas agroflorestais e o desenvolvimento de políticas baseadas em evidências para a gestão climática e ambiental (MAZUMDER et al., 2025).

Resultados semelhantes foram encontrados em um estudo onde avaliou-se o potencial de sequestro de carbono em sistemas silvipastoris comparado a pastagens convencionais em Chiapas, México, utilizando 20 parcelas de monitoramento de carbono. Os resultados mostraram que os sistemas silvipastoris apresentaram maior acúmulo de carbono na biomassa acima do solo e maior concentração de carbono orgânico no solo, em comparação com as pastagens abertas. A pesquisa também revelou uma correlação positiva entre a biomassa acima do solo e as concentrações de carbono no solo. Esses resultados têm implicações importantes para decisões de uso da terra e manejo de serviços ecossistêmicos (ARYAL et al., 2019)

O estudo de PARRA et al., (2023) discute os SSP como uma alternativa viável para reduzir a pegada ambiental da pecuária, com ênfase especial na mitigação das emissões de carbono. Os autores avaliaram o desempenho ambiental de diferentes sistemas de produção pecuária no departamento de Meta, Colômbia, incluindo sistemas silvipastoris, pastagens melhoradas e pastagens degradadas, com foco na pegada de carbono por quilograma de peso vivo ($\text{kgCO}_2\text{eq.kgPV}^{-1}$). Utilizando uma abordagem de Análise do Ciclo de Vida, os autores estimaram as emissões de GEE associadas à fermentação entérica (CH_4), manejo de esterco (N_2O) e alimentação animal (CO_2). Os resultados mostraram que os SSPs apresentaram as menores emissões líquidas de GEE, variando de -15,3 a -60 $\text{kgCO}_2\text{eq.kgPV}^{-1}$, dependendo da espécie arbórea associada às gramíneas forrageiras, como *Brachiaria decumbens* em combinação com *Acacia mangium*, *Gliricidia sepium*, *Mangifera indica*, *Guadua angustifolia* e citrus. Essas reduções estão diretamente relacionadas ao sequestro de carbono promovido pelas árvores, tanto na biomassa aérea quanto no solo. A taxa de sequestro de carbono no solo variou de -1,72 a 2,46 $\text{tCO}_2\text{.ha}^{-1}\text{.ano}^{-1}$, sendo os SSP os únicos sistemas com saldo negativo consistente. A inclusão de árvores nas pastagens também contribuiu para o aumento da matéria orgânica do solo e melhoria da estrutura e estabilidade dos agregados do solo, fatores que ampliam a capacidade de retenção de carbono e a resiliência ecológica dos sistemas. Dessa forma, os SSPs demonstram ser uma estratégia eficaz para conciliar produtividade pecuária com mitigação climática, reduzindo substancialmente a pegada de carbono da produção de carne bovina em regiões tropicais (PARRA et al., 2023)

O papel dos sistemas silvipastoris (SSP) no armazenamento de biomassa e carbono no solo em comparação com uma monocultura de pastagem (GM) e um sistema agroflorestal diversificado (DTF) no México indicou que os SSP podem armazenar até oito vezes mais carbono em um curto período de tempo, em comparação com os sistemas pecuários em monoculturas de pastagens. As taxas anuais médias de acúmulo de carbono nos SSP foram maiores do que na monocultura de pastagem e nas florestas tropicais decíduas adjacentes, fornecendo insights sobre o potencial de mitigação de GEE. Além disso, a incorporação de serapilheira e raízes mortas no solo, promovidas pelos SSP aumentam a disponibilidade de nitrogênio no solo, aumentando sua capacidade de armazenar carbono por períodos relativamente curtos. (LÓPEZ-SANTIAGO et al., 2019).

Em fazendas de gado em Tabasco, México, foi quantificado e comparado os estoques de carbono, e foi concluído que SSP armazenaram 58,8% mais carbono do que as pastagens de monoculturas de gramíneas, com estoques de carbono de 327,01 Mg C ha⁻¹ e 134,47 Mg C ha⁻¹, respectivamente. (VALENZUELA et al., 2022)

ORTIZ, J. et al. (2023) demonstram que os SSP representam um dos principais usos da terra para a conservação e reabilitação do solo e para a redução e compensação das emissões de C. Este sistema promoveu a formação de matéria orgânica do solo e o sequestro de carbono, melhorando a qualidade do solo e aprimorando os serviços ecossistêmicos, como o ciclo da água e de nutrientes, e o bem-estar animal. Além disso, os valores reportados de fixação de C em sistemas silvipastoris variam de 1 a 5 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, demonstrando o potencial dos SSP.

Na avaliação que quantificou o estoque de carbono da vegetação viva acima do solo em sistemas silvipastoris de regeneração natural manejados por agricultores familiares no Pará a biomassa do componente arbóreo foi estimada utilizando equações alométricas (GUIMARÃES et al., 2021). O cálculo do estoque de carbono baseou-se na biomassa viva acima do solo, utilizando o fator de conversão recomendado pelo IPCC. Os resultados indicaram um estoque de carbono de 14,08 t C/ha, dos quais 0,27 t C/ha foram atribuídos à vegetação arbórea e 13,81 t C/ha à vegetação não arbórea. Esses dados evidenciam o potencial dos SSPs de regeneração natural para o acúmulo de carbono, destacando a importância de pesquisas adicionais focadas nas espécies nativas, como é o caso desta pesquisa com o SSPnu (GUIMARÃES et al., 2021).

Em um estudo no sul do México foi feita uma avaliação comparativa dos estoques de carbono e as taxas de acúmulo entre SSP (*Leucaena leucocephala* + *Cynodon plectostachyus* e *Brachiaria decumbens*) e pastagens convencionais a pleno sol. Nesta pesquisa os estoques de carbono acima e abaixo do solo foram avaliados em 18 parcelas silvipastoris (SSP) com idades de plantio variando de 2 a 10 anos, e em nove parcelas adjacentes de pastagens convencionais, manejadas rotativamente para comparação. Os resultados indicaram que os sistemas silvipastoris são sumidouros de CO₂, com as taxas de acúmulo de biomassa variando de acordo com a idade do SSP, no qual a presença de árvores aumentou o armazenamento total de carbono em 8% nos SSP. O estudo sugere que a idade e a vida útil das árvores são fundamentais para o sequestro de carbono acima do solo, e SSPs representam uma alternativa viável para restaurar pastagens degradadas e moderar os impactos ecológicos da expansão pecuária em áreas críticas de desmatamento (LÓPEZ-HERNÁNDEZ et al., 2024).

Buscando quantificar a biomassa e o carbono armazenado no SSP composto por *Hyparrhenia rufa* e *Guazuma ulmifolia* no Equador, foram utilizados métodos destrutivos e amostragem aleatória em parcelas aninhadas. Assim foi avaliado a biomassa arbórea, subterrânea, necromassa e vegetação herbácea. Modelos foram desenvolvidos para estimar a biomassa total das árvores, seus componentes (tronco, raízes, galhos e folhas) e o volume, revelando uma biomassa arbórea de 16,45 Mg ha⁻¹ e contribuições da vegetação herbácea e necromassa de 1,4 e 1,9 Mg ha⁻¹, respectivamente. Os modelos apresentaram alta precisão, com erros de estimativa inferiores a 3% e ajustes superiores a 96% (R²). Estes resultados indicam a importância dos SSP na mitigação dos impactos da pecuária convencional nas mudanças climáticas (JIMÉNEZ RUIZ et al., 2019).

De acordo com evidências apresentadas na Argentina, SSP bem manejados superam tanto pastagens convencionais quanto florestas naturais em termos de acúmulo de carbono, promovendo o armazenamento simultâneo de C no solo e na biomassa aérea e subterrânea. Na região do Chaco, solos sob SSP com *Prosopis alba* e pastagem de *Chloris gayana* apresentaram estoques de carbono orgânico significativamente maiores do que pastagens adjacentes utilizadas para criação de gado (84,7 vs. 64,6 Mg C ha⁻¹, respectivamente). Esses resultados demonstram o potencial dos SSP para restaurar estoques de carbono em paisagens degradadas, adaptando-se a diferentes biomas e condições edafoclimáticas, e reforçam sua

relevância como solução baseada na natureza frente à crescente concentração atmosférica de CO₂ (PERI et al., 2017).

Os SSP além de contribuírem para o aumento dos estoques de carbono no solo e na biomassa, também se destacam pela sua eficácia na mitigação das emissões de GEE por unidade de produto animal. Esses sistemas promovem maior eficiência zootécnica, resultando na antecipação da idade ao primeiro parto, redução nos intervalos entre partos, elevação dos ganhos de peso e incremento na produção leiteira, fatores que colaboram para a diminuição das emissões por quilograma de carne ou leite produzido. Além disso, a inclusão de leguminosas arbóreas como *Leucaena leucocephala* na dieta dos animais eleva a qualidade nutricional da forragem, e reduz a emissão de CH₄ por kg de matéria seca consumida e por unidade de produto. Modelagens indicam que a substituição parcial da dieta basal por folhas de *Leucaena leucocephala* pode reduzir as emissões associadas à produção de leite e carne em até 57% e 73%, respectivamente (BARAHONA et al., 2014).

Diante do exposto, o SSPnu representa uma alternativa promissora, por integrar estratégias de restauração ecológica em um sistema produtivo, favorecendo a biodiversidade local, o aumento da provisão de serviços ecossistêmicos e bem estar animal, além do acúmulo de biomassa e carbono (SOW et al., 2024, SIMIONI et al. 2023, SILVA et al. 2020, SHMITT FILHO et al. 2023, MACHADO et al. 2024). Logo, SSP representam uma alternativa para recuperação de áreas de pastagem degradadas, especialmente em biomas tropicais como a Mata Atlântica. Apesar do crescente interesse por estratégias produtivas e restauradoras em biomas tropicais, e da existência de diversos artigos que abordam o acúmulo de carbono em sistemas silvipastoris, ainda são escassos os estudos que avaliam, os efeitos de diferentes arranjos espaciais e práticas de manejo sobre o desempenho ecológico e produtivo desses sistemas. Em especial, há pouca compreensão sobre como a densidade de núcleos florestais e a presença de quebra-vento e espécies facilitadoras, como bananeiras e leguminosas, influenciam o crescimento e a sobrevivência das árvores, a acumulação de biomassa e o sequestro de carbono em sistemas silvipastoris recém-implantados. Essa lacuna limita o aprimoramento de modelos regenerativos de uso da terra com maior potencial para conciliar produção pecuária e restauração ecológica em paisagens degradadas do bioma Mata Atlântica. Investigações voltadas à esses aspectos são fundamentais para subsidiar o aperfeiçoamento técnico do SSPnu, contribuindo para sua adoção mais ampla como modelo regenerativo de uso da terra.

ARTIGO 1

QUEBRA-VENTOS E LEGUMINOSAS INCREMENTAM O SEQUESTRO DE CARBONO DURANTE A IMPLANTAÇÃO DOS SISTEMAS SILVIPASTORIS COM NÚCLEOS?

WIND-BREAKS AND LEGUMES INCREASE CARBON SEQUESTRATION DURING THE IMPLEMENTATION OF SILVIPASTORIS SYSTEMS WITH NUCLEI?

Resumo - Os sistemas silvipastoris integram árvores, pastagens e animais, e representam uma alternativa sustentável para a pecuária em biomas florestais, como a Mata Atlântica, reabilitando agroecossistemas degradados, além de aumentar o fluxo de serviços ecossistêmicos e o estoque de carbono. O objetivo desta pesquisa foi melhor entender como práticas de manejo como quebra-ventos e plantio de leguminosas se relacionam com o acúmulo de biomassa e sequestro de carbono das essências florestais de rápido crescimento nos sistemas silvipastoris com núcleos durante os primeiros anos de implantação. A pesquisa foi desenvolvida na Unidade de Ensino e Pesquisa em Sistemas Silvipastoris com núcleos da Fazenda Experimental da Ressacada SSPnu/FER/UFSC, Brasil, com medições nos primeiros quatro anos após a inserção das mudas arbóreas no sistema. Foi avaliado o quebra-vento de *Pennisetum purpureum*, leguminosas e todas as plantas dos 94 núcleos que compõe o sistema. A biomassa e o carbono foram estimados por meio de equações alométricas. No quarto ano, o sistema acumulou 2,73 toneladas de biomassa acima do solo por hectare, correspondendo a 1,35 Mg de carbono por hectare. O *Pennisetum purpureum*, utilizado como quebra-vento, apresentou correlação negativa com a biomassa de árvores e bananeiras, sugerindo competição por recursos. No entanto, núcleos com maior biomassa de capim-elefante exibiram maiores taxas de sobrevivência de mudas arbóreas, indicando um possível efeito positivo na fase inicial de estabelecimento. Quanto às leguminosas, não foi observada correlação significativa com o acúmulo de biomassa ou carbono, sugerindo baixa influência

dessas espécies no desempenho das árvores e bananeiras durante o período avaliado.

Palavras chave: Restauração ecológica. Sistemas agroflorestais. Nucleação aplicada.

Abstract - Silvopastoral systems integrate trees, pastures, and livestock, representing a sustainable alternative for livestock farming in forest biomes such as the Atlantic Forest. These systems rehabilitate degraded agroecosystems while enhancing the flow of ecosystem services and increasing carbon stocks. This study aimed to better understand how management practices, such as windbreaks and the planting of leguminous species, relate to the accumulation of biomass and carbon sequestration in fast-growing forest species within nucleus-based silvopastoral systems during the early years of establishment. The research was conducted at the Nucleus Silvopastoral Systems Teaching and Research Unit of the Ressacada Experimental Farm (SSPnu/FER/UFSC, Brazil), with measurements taken over the first four years. Windbreaks, leguminous plants, and all species within the 94 nuclei that comprise the system were evaluated. Biomass and carbon were estimated using allometric equations. By the fourth year, the system had accumulated 2.73 tons of aboveground biomass per hectare, corresponding to 1.35 Mg of carbon per hectare. The elephant grass (*Pennisetum purpureum*), used as a windbreak, showed a negative correlation with the biomass of trees and banana plants, suggesting competition for resources such as light and water. However, nuclei with greater elephant grass biomass exhibited higher tree survival rates, indicating a potential positive effect during the initial establishment phase. As for the leguminous species, no significant correlation was observed with biomass or carbon accumulation, suggesting limited influence of these species on tree and banana performance during the evaluated period.

Keywords: Ecological restoration. Agroforestry systems. Agroecological applied nucleation.

INTRODUÇÃO

A Mata Atlântica é um dos biomas mais biodiversos, mas restam apenas 12% da sua cobertura original, e do que foi desmatado, 25,7% é pastagem, e 87,3% destas pastagens está degradada (MAPBIOMAS, 2021). Esta conversão de florestas em pastagem nos biomas florestais gera passivos ambientais, como a supressão de

habitats para conservação da biodiversidade, além de comprometer a desencadear mudanças no clima e no regime hídrico (CABALLERO et al, 2022).

Neste sentido, a introdução de árvores em pastagens é uma estratégia eficaz para mitigar os impactos negativos da pecuária sem reduzir sua produtividade (OREFICE et al., 2019). Essa prática, conhecida como sistema silvipastoril (SSP), busca integrar pastagem, animais e árvores (PORFÍRIO, 2024). e se apresenta como alternativa sustentável para a agropecuária em biomas florestais, como a Mata Atlântica

Além de recuperar áreas degradadas, os SSP oferecem uma abordagem promissora para conciliar a conservação da biodiversidade com a produção agrícola (KINNEEN et al., 2024). Os SSP contribuem com a conservação de espécies nativas, promovendo a conectividade entre fragmentos florestais na paisagem, atraindo a biodiversidade local (SIMIONI et al., 2022). Além de promoverem uma melhor ambiência em agroecossistemas pastoris (MACHADO et al., 2024) e o acúmulo de biomassa e carbono (MAZUMDER et al., 2025), contribuindo significativamente para estratégias de mitigação das mudanças climáticas (LÓPEZ-HERNÁNDEZ et al., 2024). Em comparação com pastagens sem árvores, os SSP apresentam os menores valores de emissão de gases de efeito estufa por kg de peso vivo (até $-60 \text{ kg CO}_2\text{eq.kg}^{-1}$), contribuindo significativamente para estratégias de mitigação das mudanças climáticas (PARRA; RAMIREZ; MARTÍNEZ, 2023), caso fossem implementados em uma larga escala (SCHMITT FILHO et al., 2023).

Para aumentar o sucesso da restauração, as comunidades vegetais devem ser construídas utilizando uma combinação de espécies facilitadoras (FAGUNDES et al., 2023). A facilitação é um processo ecológico em que uma planta enfermeira modifica condições limitantes do ambiente, tanto acima quanto abaixo do solo, criando um microhabitat mais favorável que permite às plantas vizinhas apresentarem melhor desempenho do que teriam se estivessem isoladas (LOZANO et al., 2020). Mudanças arbóreas enfrentam desafios quando inseridas em pastagens, exigindo estratégias que favoreçam sua adaptação e sobrevivência, como o uso de leguminosas para adubação verde e a implantação de quebra-ventos. Quebra-vento é definido como o plantio de uma ou múltiplas fileiras de árvores ou arbustos para reduzir a velocidade do vento (BRANDLE, et al., 2021). Entre os principais benefícios dos quebra-ventos, destaca-se o aumento da produtividade, pois os quebra-ventos criam um microclima mais favorável por meio da regulação da temperatura, sombreamento, umidade do ar

e do solo, e demanda evaporativa (CLEUGH, 1998). Também oferecem proteção contra estresses climáticos, como ventos fortes e secas, reduzindo perdas de água pelas plantas, danos físicos que favorecem a entrada de patógenos e a erosão eólica (LIM et al., 2020). Além disso, contribuem para a conservação do solo e o aumento da biodiversidade, atuando como elementos facilitadores no sistema (CLEUGH, 1998; DAWID MUME et al., 2021; WENINGER et al., 2021; WRIGHT et al., 2021).

Já a plantio de leguminosas em agroecossistemas oferece inúmeros benefícios, incluindo a fixação de nitrogênio atmosférico, promovendo a fertilidade e estrutura do solo. Essas plantas também contribuem para o acúmulo do carbono orgânico no solo, além de serem benéficas para a biodiversidade do solo, se associando à micorrizas e bactérias, facilitando a recuperação de solos degradados (JHARIYA et al., 2018).

Embora os sistemas silvipastoris apresentem grande potencial para a restauração produtiva e o sequestro de carbono, ainda são escassos os estudos que investigam o uso de manejos específicos, como quebra-ventos e leguminosas, como estratégias para aumentar o sucesso da implantação, aumentando a taxa de sobrevivências das mudas plantadas durante os estágios iniciais de sucessão ecológica, além de promover um maior acúmulo de biomassa e carbono. Diante disso, este trabalho tem como objetivo compreender como práticas de manejo, como o uso de quebra-ventos e o plantio de leguminosas herbáceas, se relacionam com o acúmulo de biomassa e carbono em árvores e bananeiras em sistemas silvipastoris com núcleos (SSPnu) durante os primeiros anos de implantação. A pesquisa parte da hipótese de que essas práticas podem influenciar de forma significativa os processos ecológicos de facilitação nas fases iniciais do sistema, afetando tanto a sobrevivência quanto o desempenho das espécies arbóreas.

METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada na Unidade de Ensino e Pesquisa em Sistemas Silvipastoris com Núcleos (UEP SSPnu) da Fazenda Experimental da Ressacada (FER) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) (Figura 1). A FER está localizada no município de Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, nas coordenadas 27° 41' 06.28" S e 48° 32' 38.81" W, ao nível do mar, inserida dentro da zona climática Subtropical Úmido (Cfa) de acordo com a classificação climática de Köppen (ALVARES et al., 2013).

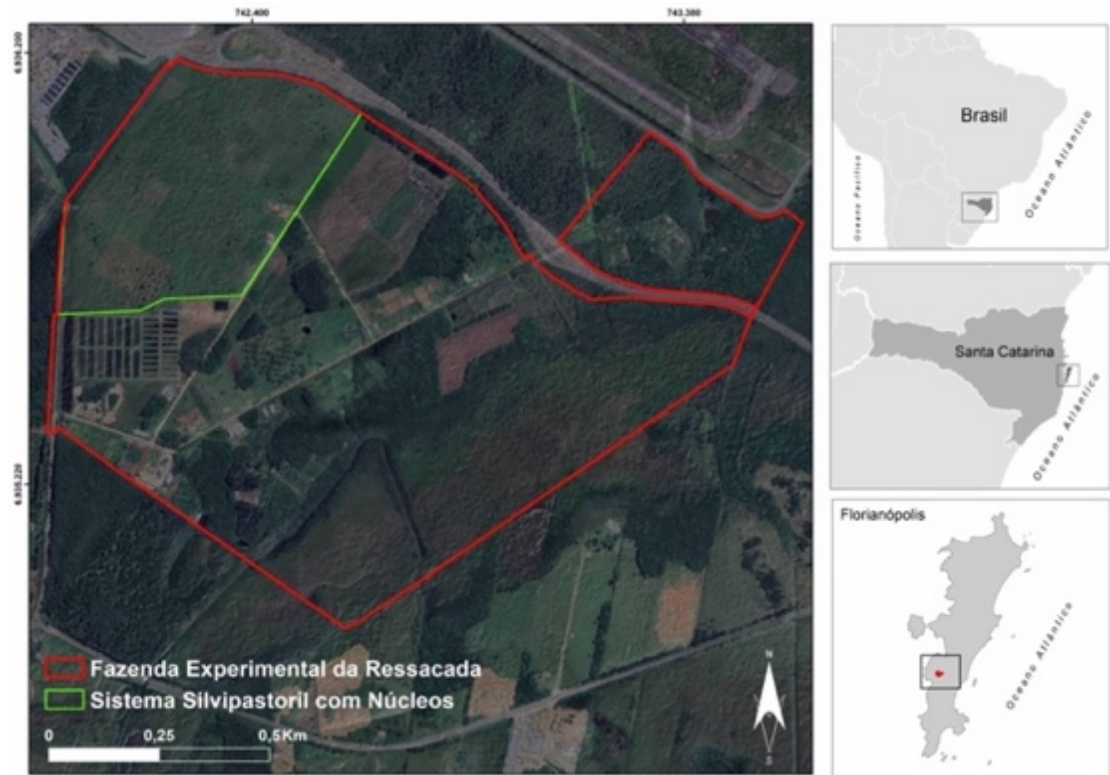


Figura 1 Localização da área de estudo. Unidade de Ensino e Pesquisa em Sistemas Silvopastoris com Núcleos (UEP SSPnu), localizada na Fazenda Experimental da Ressacada (FER), da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), em Florianópolis, SC, Brasil. Em destaque, o perímetro da FER (vermelho) e a área ocupada pela UEP SSPnu (verde). Os mapas à direita indicam a localização geográfica em diferentes escalas. Fonte: Thais Rocha

O SSPnu se caracteriza por ser um sistema silvipastoril sucessional inspirado na teoria da nucleação aplicada (REIS; KAGEYAMA, 2003), sendo composto por núcleos de 5m x 5m, cercados, e dispostos de forma equidistante em cada piquete. No total são 94 núcleos, dispostos em 3 blocos, cada qual com 6 piquetes: dois piquetes com 10% de núcleos, 2 piquetes com 5% de núcleos, e dois sem núcleos. Os núcleos estão direcionados de uma forma que os quatro lados dos núcleos estão voltados para os quatro pontos cardeais (Norte, Sul, Leste e Oeste). Os piquetes têm em média 2500 metros quadrados, e são ocupados com uma carga animal equivalente a 80 unidade de gado maior (UGM) por hectare, por 24 horas.

Em 2018, foi implantado o grupo funcional zero (GF0), compondo um sistema de retomada, constituído pelas espécies pioneiras: *Cajanus cajan* (feijão-guandú), *Penisetum purpurium* (capim-elefante), *Arachis pintoii* (amendoim-forrageiro), *Mucuna pruriens* (mucuna-Preta). Em 2019, com os núcleos apresentando um microclima mais favorável proporcionado pelo GF0, foram inseridas 3 *Musa paradisiaca* (bananeira) e

9 arbóreas pioneiras: sendo 1 *Tibouchina granulosa*, 1 *Citharexylum myrianthum* (tucaneira), 1 *Calophyllum brasiliense* (olandi), 1 *Inga edulis* (ingá), 1 *Mimosa bimucronata* (espinheiro) e 4 *Schinus terebinthifolia* (aroeira). As 4 coletas foram realizadas anualmente, durante o outono, entre 2020 e 2023. Foram mensuradas a altura e o diâmetro à altura do peito (DAP) de todas as árvores e bananeiras presentes nos núcleos do SSPnu, incluindo indivíduos espontâneos. Também foram avaliadas a altura, largura e comprimento das touceiras de capim-elefante, o número de plantas de guandu e mucuna-preta, além da presença de amendoim-forrageiro. A biomassa das árvores foi estimada com a equação $\ln(\text{Biomassa}) = 2,134 + 2,530 \times \ln(\text{DAP})$ (1), com $R^2 = 0,97$ (BROWN, 1997), considerando 50% da biomassa como carbono. Para as bananeiras, utilizou-se $\ln(\text{BAS}) = -6,415 + 2,94 \times \ln(\text{DAP})$ (2), com $R^2 = 0,86$, e carbono correspondente a 48,2% da biomassa (KAMUSINGIZE et al., 2018). Para o capim-elefante, a biomassa foi estimada por $\text{Biomassa} = 47,98 \times H^{0,35}$ (3) e o carbono por $Y = 20,36 \times H^{0,35}$ (4), com $R^2 = 0,93$ (YOUKHANA et al., 2017).

A unidade amostral desta pesquisa é um núcleo do SSPnu. Para a análise das diferenças entre as idades do sistema para cada variável (número e riqueza de árvores, número e riqueza de leguminosas, área de capim elefante, área basal das árvores e, biomassa e carbono das árvores, das bananeiras e do capim elefante), como os dados não apresentam normalidade em sua distribuição, foi utilizada uma abordagem não-paramétrica. Em seguida, foi utilizado o teste Kruskal-Wallis para verificar diferenças significativas entre as medianas das idades (2, 3, 4 e 5 anos), e quando apresentou diferença significativa, foi realizada uma análise post-hoc de comparação múltipla, através do teste de Bonferroni. Esse teste comparou diretamente os grupos dois a dois, identificando quais pares tem diferenças estatisticamente significativas. Para a análise da relação entre biomassa e carbono das árvores e das bananeiras e as variáveis independentes biomassa de capim elefante, riqueza de árvores e densidade de leguminosas foi utilizada regressão. Para verificar a significância do modelo, foi realizado teste de ANOVA. Os resultados da ANOVA forneceram um valor de F e o valor de p associado, indicando a significância do modelo ($p < 0.05$), e o valor de R^2 , mostrando a proporção de variabilidade explicada pelo modelo. As análises foram realizadas no software R. As análises consideraram o auge do capim-elefante (3º ano), das leguminosas (2º ano), e das árvores e bananeiras (5º ano), visando avaliar efeitos cumulativos e interações ecológicas ao longo do tempo no SSPnu. A abordagem considera a dimensão temporal das

interações ecológicas, valorizando os períodos de maior influência potencial das espécies funcionais sobre o acúmulo de biomassa e carbono no processo de estabelecimento do SSPnu.

RESULTADOS

Na implantação do SSPnu, foram estabelecidas 360 mudas arbóreas por hectare. Ao final do quinto ano, a densidade de sobreviventes foi de 264 árvores por hectare, resultando em um acúmulo médio de 2,483 toneladas de biomassa por hectare (DP = 1,737). Esse valor corresponde a 1,241 toneladas de carbono por hectare (DP = 0,869) (Tabela 1).

Tabela 1 Número inicial e sobrevivência de plantas, biomassa e carbono acumulado no quinto ano em diferentes classes de plantas no Sistema Silvipastoril com Núcleos (SSPnu).

Classe de plantas	NP0 (plantas.ha ⁻¹)	NP5 (plantas.ha ⁻¹)	B (ton/ha)	DP	C (ton/ha)	DP
Árvores	360	264	2,483	1,737	1,241	0,869
Banana	120	114	0,059	0,056	0,029	0,027
Capim- elefante	-	60 m ²	0,184	0,192	0,078	0,082
Total	-	-	2,726	-	1,348	-

Número de mudas arbóreas plantadas (NP0), número de plantas sobreviventes no ano 5 (NP5), Biomassa no ano 5 (B), desvio padrão (DP), Carbono no ano 5 (C).

Para as bananeiras (*Musa paradisiaca*), a densidade passou de 120 mudas por hectare no início para 114 plantas por hectare no quinto ano, com biomassa média de 0,059 toneladas por hectare (DP = 0,056), equivalente a 0,029 toneladas de carbono por hectare (DP = 0,027).

O capim-elefante (*Pennisetum purpureum*), implantado por estacas, ocupava 60 m² por hectare no quinto ano. A biomassa acumulada foi de 0,184 toneladas por hectare (DP = 0,192), correspondendo a 0,078 toneladas de carbono por hectare (DP = 0,082). Somando todas as classes de plantas, o sistema acumulou um total de 2,726 toneladas de biomassa e 1,348 toneladas de carbono por hectare até o quinto ano.

Entre o segundo e o quinto ano, a área basal das árvores apresentou incremento significativo e contínuo (Figura 2f). Esse aumento ocorreu mesmo com a redução no número de indivíduos por núcleo, refletindo o crescimento dos indivíduos sobreviventes. A riqueza de espécies arbóreas por núcleo manteve-se estável ao longo do período (Figura 2b), com destaque para alguns núcleos que apresentaram valores atípicos (7 a 8 espécies), possivelmente em função da emergência espontânea de espécies pioneiras como *Baccharis dracunculifolia*, *Psidium guajava* e *Schinus terebinthifolia*. Por outro lado, tanto o número de indivíduos quanto a riqueza de leguminosas diminuíram significativamente durante o período avaliado (Figuras 2c e 2d), indicando um processo de senescência ou exclusão competitiva dessas espécies nos estágios iniciais da sucessão. A área ocupada pelo capim-elefante seguiu um padrão de aumento inicial entre o segundo e o terceiro ano, seguido por uma redução nos anos subsequentes (Figura 2e).

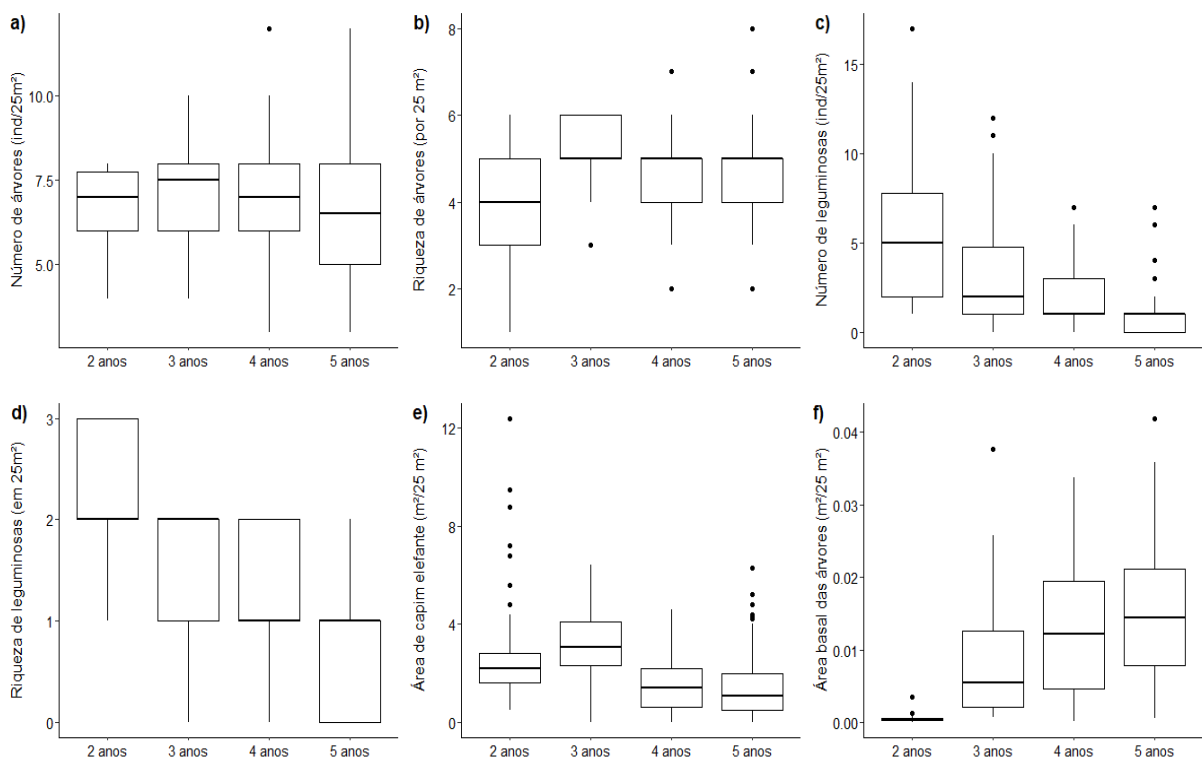


Figura 2 Boxplots de distribuição temporal de parâmetros do SSPnu entre o ano 2 e o ano 5: (a) Número de árvores (ind/25m²); (b) Riqueza de árvores (25m²); (c) Número de leguminosa (ind/25m²); (d) Riqueza de leguminosas (25m²); (e) Área de Capim-elefante (ind/25m²); e (f) Área basal das árvores (m²/25m²).

O acúmulo de biomassa e carbono nas árvores apresentou um aumento consistente ao longo dos quatro anos de monitoramento. Os valores de biomassa

(Figura 3a) e de carbono (Figura 3d) cresceram significativamente a cada ano. Para as bananeiras, a biomassa (Figura 3b) e o carbono (Figura 3e) aumentaram nos três primeiros anos, mas apresentaram queda a partir do quarto ano. O capim-elefante apresentou um padrão semelhante ao observado para sua área ocupada, com aumento expressivo nos primeiros anos, seguido por redução significativa a partir do terceiro ano (Figuras 3c e 3f).

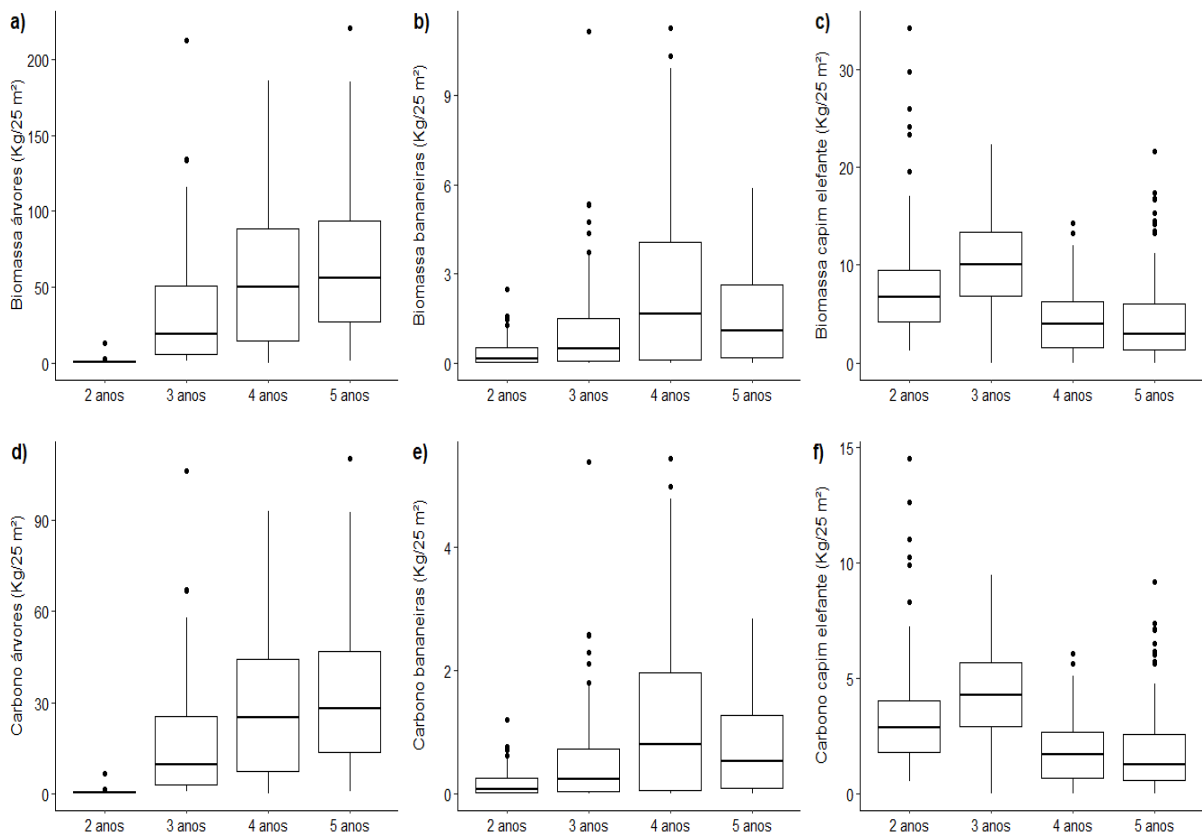


Figura 3 Distribuição temporal dos parâmetros de biomassa e carbono ao longo de 2, 3, 4 e 5 anos no SSPnu: (a) Biomassa das árvores por núcleo (Kg/25m²); (b) Biomassa das bananeiras por núcleo (Kg/25m²); (c) Biomassa do capim-elefante (Kg/25m²); (d) Carbono acumulado nas árvores (Kg/25m²); (e) Carbono acumulado nas bananeiras (Kg/25m²); (f) Carbono acumulado no capim-elefante (Kg/25m²).

As análises de regressão linear indicaram uma relação negativa significativa entre a biomassa de capim-elefante e a biomassa acumulada de árvores ($R^2 = 0,123$; $p < 0,001$) e bananeiras ($R^2 = 0,10$; $p < 0,001$) no quinto ano (Figuras 4a e 4b). Em contrapartida, o número de leguminosas registrado no segundo ano não apresentou relação estatisticamente significativa com a biomassa final das árvores ($R^2 = 0,03$; $p = 0,06$) nem com a das bananeiras ($R^2 = 0,03$; $p = 0,06$) (Figuras 4c e 4d).

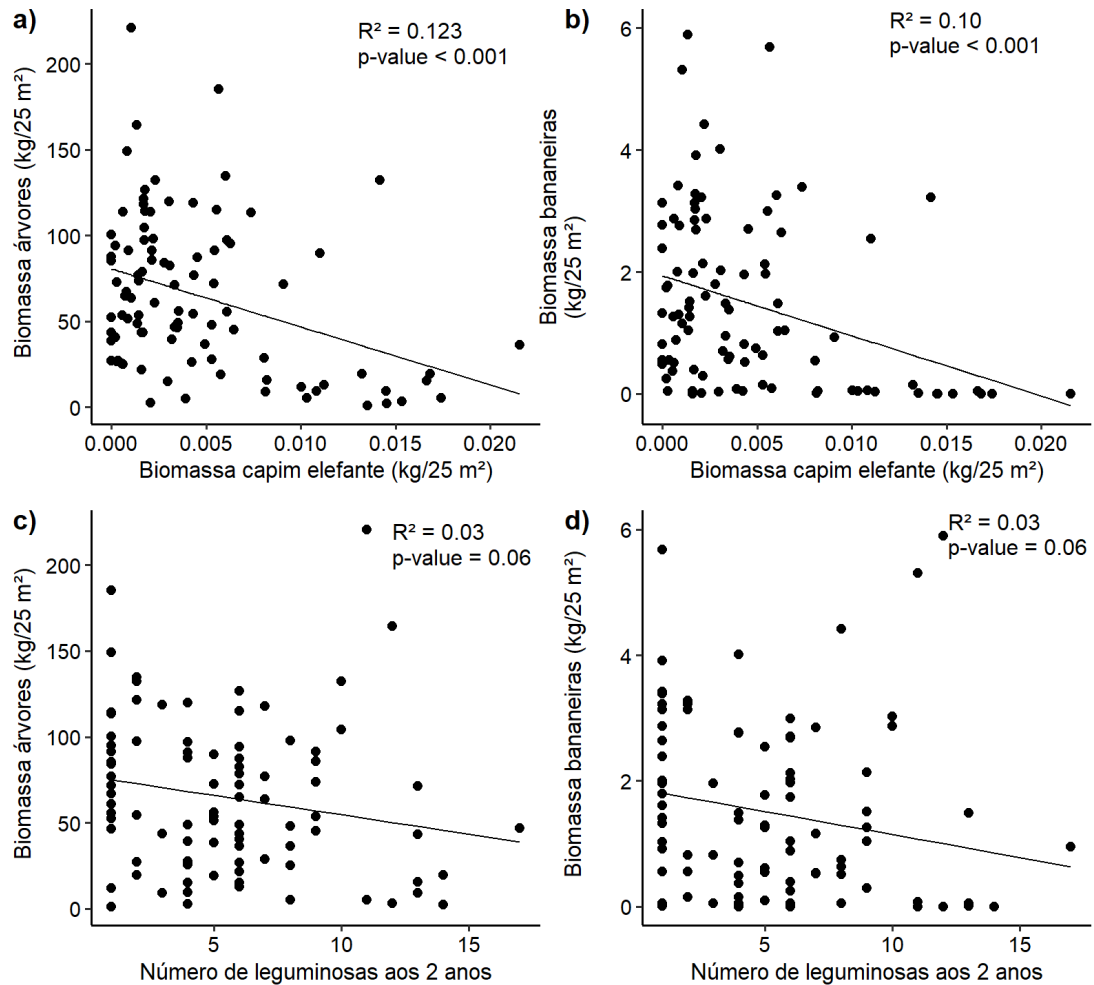


Figura 4 Gráficos de dispersão representando a relação entre (a) Biomassa de árvores (kg/25 m²) e biomassa de capim-elefante (kg/25 m²); (b) Biomassa de bananeiras (kg/25 m²) e biomassa de capim-elefante (kg/25 m²); (c) Biomassa de árvores (kg/25 m²) e número de leguminosas aos 2 anos; (d) Biomassa de bananeiras (kg/25 m²) e número de leguminosas aos 2 anos.

Padrão semelhante foi observado nas análises entre o número de leguminosas e o acúmulo de carbono (Figuras 5c e 5d). Devido à utilização de fatores fixos de conversão de biomassa para carbono (50% para árvores (IPCC, 2003) e 48,2% para bananeiras (KAMUSINGIZE *et al.*, 2018)) os valores de carbono (Figuras 5a e 5b) apresentaram o mesmo padrão de distribuição e significância estatística observados para biomassa.

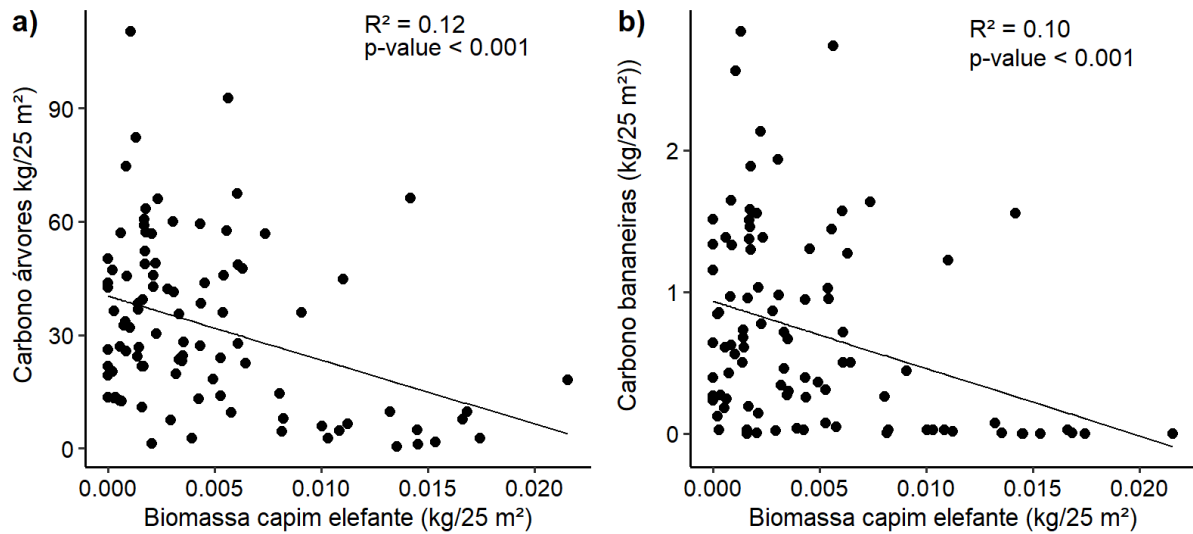


Figura 5 Gráficos de dispersão representando a relação entre (a) Carbono de árvores (kg/25 m²) e biomassa de capim-elefante (kg/25 m²) e (b) Carbono de bananeiras (kg/25 m²) e biomassa de capim-elefante (kg/25 m²).

A comparação entre os grupos de núcleos com maior e menor biomassa de capim-elefante revelou um efeito positivo significativo sobre a sobrevivência das árvores (Figura 6b). Núcleos com maior biomassa de capim-elefante apresentaram maiores taxas de sobrevivência no quinto ano. No entanto, não foram observadas diferenças estatísticas significativas nas variáveis de crescimento das árvores já estabelecidas, como área basal (Figura 6a), incremento em diâmetro (Figura 6c) e carbono acumulado (Figura 6d).

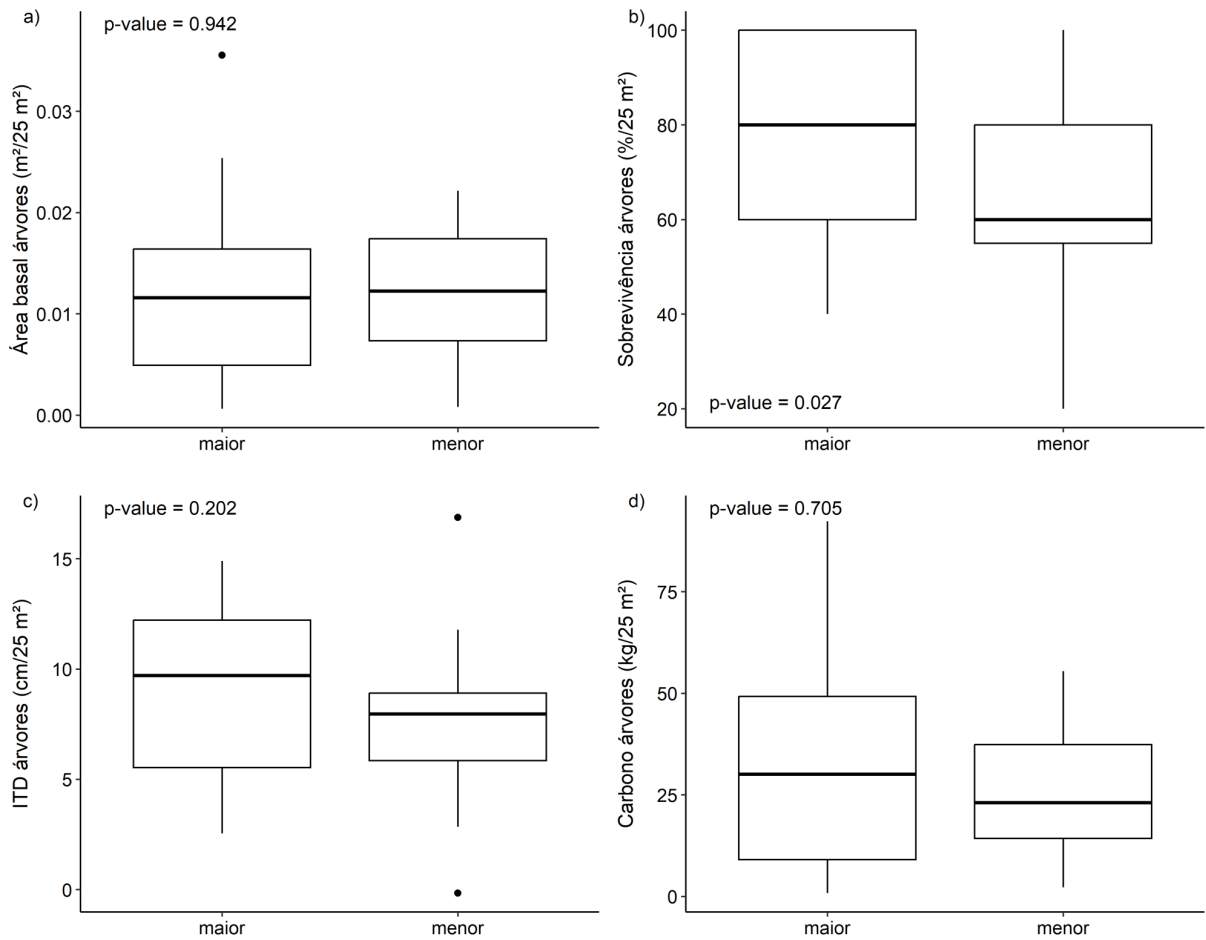


Figura 6 Boxplots comparando variáveis estruturais das árvores de cada núcleo, entre dois grupos de núcleos classificados com base na biomassa total do capim elefante (maior vs. menor). a) Área basal das árvores ($\text{m}^2/25 \text{ m}^2$); b) Sobrevivência das árvores ($\%/25 \text{ m}^2$); c) Incremento em diâmetro das árvores (ITD) ($\text{cm}/25 \text{ m}^2$); d) Carbono acumulado nas árvores ($\text{kg}/25 \text{ m}^2$).

DISCUSSÃO

Ao longo dos anos, observou-se a morte de touceiras de capim-elefante, devido ao apodrecimento radicular, causados pelos frequentes alagamentos do solo (WEN et al., 2024), característicos do local do experimento, que apresenta lençol freático superficial.

A redução do número e da riqueza de leguminosas ao longo do período seguiu uma tendência esperada, uma vez que apenas o *arachis pintoi* é perene. As demais, de ciclo curto, não foram replantadas, o que explica a queda observada nessas populações.

Observações de campo registraram invasões recorrentes de animais nos núcleos, com forrageamento seletivo e intenso sobre as bananeiras, explicando a

redução da biomassa e do carbono a partir do quarto ano e reforçando a necessidade de aprimorar as cercas para minimizar perdas por herbivoria.

A relação negativa entre a biomassa de capim-elefante e o crescimento das árvores é um indicio de competição interespecífica (MUREITHI et al., 1995), por recursos como água, pois gramíneas C4 possuem vantagem fisiológica em relação às árvores, apresentando taxas de transpiração até cinco vezes maiores durante períodos úmidos (XU et al., 2015). Além disso, a sobreposição de sistemas radiculares pode reduzir a disponibilidade de água e nutrientes para as árvores (KESUMA et al., 2020). Outra competição é por luz, pois o capim-elefante pode limitar a entrada de radiação solar nas árvores do interior dos núcleos, restringindo a fotossíntese e o crescimento das árvores (BHATT et al., 2020). Espécies herbáceas de crescimento vigoroso, como o capim-elefante podem impactar negativamente a sobrevivência e o acúmulo de biomassa de mudas arbóreas (MORRISON et al., 2019)

O crescimento vigoroso do capim-elefante pode ter limitado o desenvolvimento das bananeiras por competição, como sugere a relação negativa entre as biomassas das duas espécies (Figura 4b). Resultado semelhante foi observado em campo, com gramíneas reduzindo significativamente o crescimento e a produtividade das bananeiras (ACHARD et al., 2018). Esses achados reforçam que, nos núcleos com maior biomassa de capim-elefante, a competição foi um fator limitante.

Ao final dos cinco anos de monitoramento, o Sistema Silvipastoril com Núcleos (SSPnu) apresentou um acúmulo total de 1,348 toneladas de carbono por hectare, considerando os estoques nas árvores, bananeiras e capim-elefante. Esse resultado reflete o desempenho do sistema durante seu estado inicial de implantação. Uma meta-análise global conduzida estimou que sistemas agroflorestais armazenam, em média, 40,9 Mg ha⁻¹ de carbono na biomassa e 159,1 Mg ha⁻¹ no solo até 1 metro de profundidade. As taxas de sequestro foram de 5,7 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ na biomassa e 1,4 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ no solo. Dentre os arranjos analisados, os sistemas agrossilvipastoris apresentaram os maiores estoques médios de carbono tanto na biomassa quanto no solo, além de destacarem-se pelas maiores taxas de sequestro no solo (MAZUMDER et al., 2025).

Em estudo realizado no Piedemonte, em Cumaral, Colômbia, foi avaliado o impacto . Comparando pastagens degradadas com *Brachiaria brizantha*, pastagens melhoradas com *B. decumbens* e diversos sistemas silvipastoris (SSPs), observou-se que os SSPs apresentaram os maiores valores de sequestro de carbono na biomassa

e no solo, com taxas variando de $-1,72$ a $2,46 \text{ t CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (PARRA; RAMIREZ; MARTÍNEZ, 2023)

Com objetivo avaliar os estoques de carbono e as taxas de acúmulo em sistemas silvipastoris de *Leucaena leucocephala* + *Cynodon plectostachyus* e *Brachiaria decumbens* e compará-los com pastagens convencionais a pleno sol. Conduzido no sul do México, o estudo mediu os estoques de carbono acima e abaixo do solo em 18 parcelas silvipastoris (SSP) com idades de plantio variando de 2 a 10 anos, e em nove parcelas adjacentes de pastagens convencionais, manejadas rotativamente para comparação. Os resultados indicaram que os sistemas silvipastoris são sumidouros de CO_2 , no qual a presença de árvores aumentou o armazenamento total de carbono em 8% nos SSP. O estoque de carbono na biomassa arbórea acima do solo encontrado foi igual a $5,5 \text{ Mg.C.ha}^{-1}$. O estudo sugere que a idade e a vida útil das árvores são fundamentais para o sequestro de carbono acima do solo, e SSP representa uma opção promissora para restaurar pastagens e mitigar impactos ecológicos da pecuária convencional (LÓPEZ-HERNÁNDEZ et al., 2024).

Outro aspecto relevante observado nos resultados foi a relação entre a biomassa de capim-elefante e a sobrevivência das árvores. Os dados indicaram que os núcleos com maior biomassa de capim-elefante apresentaram taxas de sobrevivência arbórea significativamente superiores no quinto ano de avaliação. Esse padrão sugere que a presença do quebra-vento pode contribuir na proteção contra estresses abióticos, como ventos fortes, contribuindo indiretamente para um ambiente mais propício a sobrevivência das plantas, especialmente no estágio inicial de desenvolvimento, que são mais sensíveis (DAWID MUME et al., 2021; WENINGER et al., 2021). Isso sugere que o capim-elefante atua como um elemento de proteção das mudas, possivelmente por reduzir a exposição direta ao sol, diminuir a velocidade do vento, diminuir a amplitude térmica e contribuir para a conservação da umidade do solo dentro do núcleo (DAWID MUME et al., 2021; MACHADO et al., 2024; WENINGER et al., 2021), promovendo um microclima mais favorável à manutenção das plântulas e mudas arbóreas.

Os resultados desta pesquisa corroboram com estudos que destacam o papel do quebra-vento como elemento facilitador nos estágios iniciais de restauração vegetal. Em ambientes subalpinos da Coreia do Sul, cercas vivas formadas por vegetação natural aumentaram significativamente a sobrevivência de mudas de *Pinus pumila*, ao atenuar o impacto de ventos fortes e reduzir a perda de umidade, criando

microambientes mais favoráveis ao estabelecimento das plantas, reforçando que estruturas vegetativas, como quebra-ventos, podem exercer funções ecológicas chave ao mitigar estresses abióticos e facilitar a regeneração em condições adversas (LIM et al., 2020).

Espécies arbóreas de sucessão inicial também podem desempenhar papel importante na regeneração vegetal, ao modificar o microclima e reduzir o estresse abiótico. Em estudo de campo, Observou-se que *Combretum leprosum* e *Cenostigma bracteosum* atuaram como facilitadoras, com redução de até 55% da radiação solar durante a estação chuvosa e aumento expressivo da umidade do solo. Esses efeitos resultaram em maior assimilação de CO₂, condutância estomática, transpiração e crescimento das espécies-alvo. Os achados evidenciam que a eficácia facilitadora está associada às características funcionais da espécie enfermeira (SALES LUCAS, et al., 2022).

CONCLUSÃO

Os resultados indicam que o crescimento progressivo das árvores ao longo do período contribuiu para o aumento da área basal e do estoque de biomassa, mesmo diante das perdas por mortalidade. A análise das interações entre os componentes revelou que os núcleos com as maiores biomassas de capim-elefante apresentaram as maiores taxas de sobrevivência das árvores, indicando um efeito positivo sobre o estabelecimento inicial das mudas, possivelmente devido às condições microclimáticas proporcionadas pelo quebra-vento. Por outro lado, os núcleos que apresentaram as maiores biomassas de capim-elefante, tiveram menores acúmulo de biomassa e carbono nas árvores e nas bananeiras, sugerindo que a competição por luz, água e nutrientes com o *Penisetum purpurium* limitou o desempenho dessas espécies ao longo do tempo. No caso das leguminosas, não foram observados efeitos significativos sobre o acúmulo de biomassa e carbono das árvores e das bananeiras.

O acúmulo total de carbono no sistema, considerando árvores, bananeiras e capim-elefante, foi de 1,348 toneladas por hectare ao final do quinto ano, refletindo o estado inicial de desenvolvimento do SSPnu em condições de baixa fertilidade do solo.

Os resultados obtidos contribuem para a compreensão dos efeitos de práticas de manejo sobre a estrutura e o funcionamento de sistemas silvipastoris em estágio inicial de sucessão ecológica. Além disso, fornecem subsídios para o aprimoramento

de estratégias de implantação, indicando os benefícios de proteção do quebra-vento de *Penisetum purpurium* para o estabelecimento inicial das arbóreas, mas indicando também a importância do manejo de sua biomassa ao longo do tempo, visando minimizar os efeitos competitivos sobre o acúmulo de biomassa e carbono pelas espécies arbóreas e pelas bananeiras.

Os resultados obtidos neste estudo reforçam o papel dos sistemas silvipastoris como estratégias eficazes de mitigação das mudanças climáticas, ao promover o acúmulo de carbono em áreas anteriormente degradadas por pastagens convencionais, mesmo em estágio inicial de implantação e sob condições de baixa fertilidade do solo.

REFERENCIAS

ACHARD, R. et al. Intercropping of Grass Cover Crops in Banana Plantations: Impacts on Banana Growth and Yield. **Tropical Agriculture and Development**, v. 62, n. 1, p. 1–8, 2018.

ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

BHATT, N. et al. Effect of shading treatments on plant growth and physiology: A review. **Acta Ecologica Sinica**, v. 40, n. 6, p. 83–92, 2020.

BRANDLE, James R.; TAKLE, Eugene; ZHOU, Xinhua. Windbreak practices. **North American Agroforestry**, p. 89-126, 2021.

BROWN, S. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. **FAO Forestry Paper**, v. 134, n. 8, p. 55, 1997.

CABALLERO, C. B.; RUHOFF, A.; BIGGS, T. Land use and land cover changes and their impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: A systematic review. **Science of The Total Environment**, v. 808, p. 152134, 2022.

CLEUGH, H. A. Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. **Agroforestry Systems**, v. 41, n. 1, p. 55–84, 1998.

DAWID MUME, I. et al. Review on Windbreaks Agroforestry as a Climate Smart Agriculture Practices. **American Journal of Agriculture and Forestry**, v. 9, n. 6, p. 342–347, 2021.

FAGUNDES, M. V.; MAZZOCHINI, G. G.; GANADE, G. The role of plant diversity and facilitation during tropical dry forest restoration. **Journal of Ecology**, v. 111, n. 6, p.

1231–1241, 2023.

IPCC. **Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry**. 1. ed. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2003. 302 p.

JHARIYA, M. K. et al. Leguminous Trees an Innovative Tool for Soil Sustainability. **Legumes for Soil Health and Sustainable Management**. 1. ed. Singapore: Springer Singapore, 2018. p. 315–345.

KAMUSINGIZE, D. et al. Allometric relationships and carbon content for biomass-carbon estimation of East African Highland Bananas (*Musa* spp. AAA-EAHB) cv. Kibuzi, Nakitembe, Enyeru and Nakinyika. **African Journal of Agricultural Research**, v. 13, n. 36, p. 1865–1873, 2018.

KESUMA, A. et al. Efficiency of urea and land fertilizer in increasing the results of “double row” maize in pump sari plant patterns with soil bean. **Journal of Applied Agricultural Research**, v. 18, n. 31, p. 153- 158., 2020.

KINNEEN, L. et al. Silvopastoral systems benefit invertebrate biodiversity on tropical livestock farms in Caquetá, Colombia. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 26, n. 1, p. 126–134, 2024.

LIM, H.-I. et al. Effects of Windbreak Fences Composed of Natural Vegetation on Dwarf Siberian Pine (*Pinus pumila*) Seedlings. **Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology**, v. 23, n. 4, p. 59–67, 2020.

LÓPEZ-HERNÁNDEZ, J. C. et al. Carbon storage and sequestration rates in *Leucaena leucocephala*-based silvopasture in Southern Mexico. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 5, p. 1105–1121, 2024.

LOZANO, M. et al. Complementarity in nurse plant systems: soil drives community

composition while microclimate enhances productivity and diversity. **Plant and Soil**, v. 450, p. 385-396, 2020.

MACHADO, T. et al. Microclimate and the thermal comfort during the implementation of silvopastoral systems: the windbreak countereffect. **International Journal of Biometeorology**, v. 68, n. 8, p. 1519-1531, 2024.

MAPBIOMAS. **A evolução da pastagem nos últimos 36 anos**. Coleção 6, 2021.

MAZUMDER, S. Y. et al. Variation in biomass and soil carbon storage and sequestration rates in different agroforestry systems with climatic zones and soil types. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 26, n. December 2024, p. 100642, 2025

MORRISON, T. A. et al. Grass competition overwhelms effects of herbivores and precipitation on early tree establishment in Serengeti. **Journal of Ecology**, v. 107, n. 1, p. 216–228, 2019.

MUREITHI, J. G.; TAYLER, R. S.; THORPE, W. Productivity of alley farming with leucaena (*Leucaena leucocephala* Lam. de Wit) and Napier grass (*Pennisetum purpureum* K. Schum) in coastal lowland Kenya. **Agroforestry Systems**, v. 31, n. 1, p. 59–78, 1995.

OREFICE, J.; et al. Forage productivity and profitability in newly-established open pasture, silvopasture, and thinned forest production systems. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 1, p. 51–65, 2019.

PARRA, A. S.; RAMIREZ, D. Y. G.; MARTÍNEZ, E. A. Silvopastoral Systems Ecological Strategy for Decreases C Footprint in Livestock Systems of Piedmont (Meta), Colombia. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 66, p. 1–13, 2023.

PORFÍRIO, V. Silvopastoral system for wood production: opportunities and challenges in tropical and subtropical environments. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p. 2325–2335, 2024.

REIS, A.; KAGEYAMA, P. Y. **Restauração de áreas degradadas utilizando interações interespecíficas**. Botucatu: Fundação de Estudo e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2003.

SALES LUCAS, Diego et al. Evidence of facilitation between early-successional tree species and the regenerating plant community in a tropical seasonally dry environment. **Austral Ecology**, v. 47, n. 3, p. 541-556, 2022.

SCHMITT FILHO, A. L. et al. Applied nucleation under high biodiversity silvopastoral system as an adaptive strategy against microclimate extremes in pasture areas. **International Journal of Biometeorology**, v. 67, p. 1199–1212, 2023.

SIMIONI, G. F. et al. Response of birds to high biodiversity silvopastoral systems: Integrating food production and biodiversity conservation through applied

nucleation in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 324, p. 107709, 2022.

WEN, C. et al. Effects of flooding stress on the growth and photosynthetic characteristics of napier grass (*Pennisetum purpureum* Guimu-1). **Scientific Reports**. 2024.

WENINGER, T. et al. Ecosystem services of tree windbreaks in rural landscapes—a systematic review. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 10, p. 103002, 2021.

WRIGHT, Alexandra J. et al. Biodiversity and ecosystem functioning: Have our experiments and indices been underestimating the role of facilitation? **Journal of Ecology**, v. 109, n. 5, p. 1962-1968, 2021.

XU, X.; MEDVIGY, D.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Relation between rainfall intensity and savanna tree abundance explained by water use strategies. **Proceedings of the**

National Academy of Sciences, v. 112, n. 42, p. 12992–12996, 2015.

YOUKHANA, A. et al. Allometric models for predicting aboveground biomass and carbon stock of tropical perennial C4 grasses in Hawaii. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, n. 34, p. 224–254, 2017.

ARTIGO 2

ESTRUTURA FUNCIONAL E INTERAÇÕES ECOLÓGICAS EM SISTEMAS SILVIPASTORIS COM NÚCLEOS: EFEITOS DA DENSIDADE DE PLANTIO E DA FACILITAÇÃO SOBRE O ACÚMULO DE BIOMASSA E CARBONO

RESUMO

A busca por sistemas agropecuários sustentáveis e resilientes tem estimulado o desenvolvimento de arranjos que integrem produção, restauração ecológica e conservação. Os sistemas silvipastoris (SSPs) se destacam como alternativa promissora por agruparem espécies arbóreas e funcionais em estruturas espacialmente organizadas, potencializando o sombreamento, a biodiversidade e o sequestro de carbono. Este estudo avaliou o efeito da densidade de núcleos (5% e 10% da área do piquete) e da presença de plantas facilitadoras (bananeiras - *Musa paradisiaca*) sobre o crescimento arbóreo, a sobrevivência e o sequestro de carbono no SSP com Núcleos em solos arenosos hidromórficos de baixa fertilidade natural. Para tanto, foram mensuradas variáveis estruturais ao longo de quatro anos iniciais (2020–2023) e realizadas análises não paramétricas e regressões lineares. Os estoques médios de carbono arbóreo durante a fase inicial de implantação variaram de 1,1 a 3,2 Mg ha⁻¹, sem diferenças entre os tratamentos. A biomassa de bananeiras apresentou alta correlação com a biomassa e o carbono arbóreo ($R^2 = 0,85$; $p < 0,001$), evidenciando seu papel como espécie funcional facilitadora. Esses resultados demonstram a relevância de arranjos baseados em atributos funcionais e reforçam a importância de espécies de rápido crescimento para o desempenho produtivo e a reabilitação ecológica dos agroecossistemas através da nucleação aplicada agroecológica inserida nos sistemas silvipastoris biodiversos.

Palavras-chave: pecuária sustentável, restauração agroecológica, facilitação ecológica, agrofloresta funcional, sucessão ecológica.

ABSTRACT

The pursuit of sustainable and resilient agricultural systems has driven the development of arrangements that integrate production, ecological restoration, and conservation. Silvopastoral systems (SPS) stand out as a promising alternative by

combining tree and functional species in spatially organized structures, enhancing shade, biodiversity, and carbon sequestration. This study evaluated the effect of nucleus density (5% and 10% of paddock area) and the presence of facilitator plants (banana trees, *Musa paradisiaca*) on tree growth, survival, and carbon sequestration in a Nucleus-Based Silvopastoral System established on very low fertility soils. Structural variables were measured over the initial four years (2020–2023), and non-parametric tests and linear regressions were conducted. Mean tree carbon stocks during the early establishment phase ranged from 1.1 to 3.2 Mg ha⁻¹, with no significant differences between treatments. Banana biomass showed a strong correlation with both tree biomass and carbon stocks ($R^2 = 0.85$; $p < 0.001$), highlighting its role as a functional facilitator species. These results underscore the relevance of arrangements based on functional traits and reinforce the importance of fast-growing species for the productive performance and ecological rehabilitation of agroecosystems through agroecologically applied nucleation in biodiverse silvopastoral systems.

Keywords: sustainable livestock, agroecological restoration, ecological facilitation, functional agroforestry, ecological succession.

INTRODUÇÃO

O agravamento da crise climática global demanda por estratégias de mitigação e adaptação que combinem a produção de alimentos com a restauração e reabilitação ecológica (Singh, 2023). A elevação contínua das temperaturas médias globais, com 2024 sendo o ano mais quente já registrado (UN, 2025), tem sido impulsionada pela concentração crescente de gases de efeito estufa, decorrente do uso intensivo de combustíveis fósseis, desmatamento e conversão de ecossistemas naturais em pastagens e lavouras (IPCC, 2018). Nesse contexto, soluções baseadas na natureza, como os sistemas silvipastoris (SSPs), surgem como estratégias viáveis para restaurar funções ecossistêmicas e aumentar o sequestro de carbono, integrando árvores à pecuária e promovendo a reabilitação dos agroecossistemas (Agunbiade, 2025; Andrade et al., 2008).

Modelos biodiversos de SSPs com uma multitude de espécies arbóreas, em particular nativas, são raros, apesar de extremamente necessários (Farley and Schmitt-Filho, 2024). Entre estes, está o sistema silvipastoril com núcleos (SSPnu), que incorporando elementos de restauração ecológica, sucessão ecológica e

interações entre espécies (Holl et al., 2020) tem potencializado a produtividade e o desempenho ecológico dos SSPs (Schmitt Filho et al., 2023). Nestes sistemas, espécies arbóreas nativas são agrupadas em núcleos protegidos, inseridos em áreas de pastagem, permitindo o manejo diferenciado da regeneração florestal. Estudos sugerem que sistemas multiestratificados e funcionalmente diversos são mais produtivos e resilientes, pois integram mecanismos como a complementariedade de nicho e a facilitação ecológica, esses mecanismos permitem uma melhor partição dos recursos disponíveis e podem promover maiores taxas de crescimento e acúmulo de biomassa e carbono, além de favorecer a sobrevivência das espécies em estágios iniciais de desenvolvimento (Farley and Schmitt-Filho, 2024; Reich et al., 2012; Wright et al., 2021).

Entre os mecanismos ecológicos relevantes para o sucesso dos sistemas agrícolas biodiversos, destaca-se a facilitação interespecífica, na qual determinadas espécies promovem o crescimento de outras ao modificar positivamente os fatores ecofisiológicos limitantes (Wright et al., 2021). A facilitação pode atenuar estresses ambientais como alta radiação solar, déficit hídrico e variações térmicas, criando microambientes mais favoráveis ao estabelecimento de outras espécies (Verdú, 2021). Esses efeitos são especialmente relevantes nos agroecossistemas degradados, como áreas de pastagem com solos de baixa fertilidade e/ou com dominância plantas não forrageiras. Tais interações ecológicas positivas são fundamentais para aumentar a resiliência do sistema e sua eficiência no uso de recursos naturais (Holl et al., 2020).

A eficiência dos SSPs biodiversos depende não apenas da seleção de espécies, mas também do arranjo espacial e da densidade de plantio (Mubarak, et al., 2022). A densidade dos núcleos agroflorestais e o número de indivíduos por núcleo podem afetar diretamente a competição intra e interespecífica. Estas interações podem influenciar diretamente na taxa de sobrevivência, crescimento das árvores e acúmulo de biomassa. Densidade excessivas podem gerar competição por luz, água e nutrientes, reduzindo a eficiência fotossintética e comprometendo o desempenho do sistema (Postma, 2021). Por outro lado, espaçamentos muito amplos podem reduzir a capacidade de sequestro de carbono e o aproveitamento do espaço produtivo (Holl et al., 2020). Compreender os efeitos dessas variações estruturais é fundamental para orientar o manejo e o planejamento de SSPs (Varela et al., 2024).

Apesar do crescente interesse em sistemas multifuncionais, poucos estudos têm investigado de forma integrada os efeitos da densidade de núcleos e da presença de espécies facilitadoras sobre o crescimento, sobrevivência e acúmulo de carbono em sistemas silvipastoris biodiversos. A maioria dos estudos concentra-se em culturas arbóreas isoladas ou em modelos de plantio homogêneo (Mazunder et al., 2025).

Diante da escassez de estudos que integram estrutura funcional e interações positivas em sistemas silvipastoris (Mazunder et al., 2025), este estudo tem como objetivo compreender como a estrutura dos SSPnu influencia crescimento, sobrevivência das árvores e o acúmulo de biomassa e carbono, considerando variações na densidade de plantio e a presença de interações facilitadoras. Especificamente, o estudo busca responder as seguintes questões de pesquisa: (i) de que forma diferentes densidades de árvores dentro dos núcleos afetam crescimento e sobrevivência das espécies arbóreas; (ii) se espécies com atributos facilitadores (*Musa spp.*) contribui para o acúmulo de biomassa e carbono dos elementos arbóreos; e (iii) qual é a densidade ideal de núcleos por hectare de pastagem para maximizar o desenvolvimento do sistema e seus efeitos na produtividade e sequestra de carbono. A hipótese é que arranjos estruturais que combinam densidades intermediárias de árvores com espécies funcionalmente complementares promovem interações ecológicas positivas que aumentam a eficiência no uso de recursos, e em consequência, favorecem a sobrevivência das mudas, o crescimento das árvores e o acúmulo de carbono no sistema. Os resultados poderão contribuir com evidências sobre como otimizar o desenho de sistemas silvipastoris biodiversos para maximizar sua produtividade e seu potencial de mitigação e adaptação climática.

METODOLOGIA

ÁREA DE ESTUDO

A pesquisa foi conduzida na Unidade de Ensino e Pesquisa em Sistemas Silvipastoris com Núcleos (27°41'06.28" S; 48°32'38.81" W) da Fazenda Experimental da Ressacada (FER). A área está localizada em Florianópolis, Santa Catarina, Brasil, (Figura 1). O clima da região é classificado como subtropical úmido (Cfa) segunda a classificação de Köppen, sem estação seca e com verões quentes, a precipitação anual varia entre 1270 e 1600 mm e umidade relativa anual com média de 82%

(Alvares et al., 2013). O solo da área experimental é classificado como Neossolo Quartzarênico Hidromórfico Típico (Arenosols) de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação dos Solos (Embrapa, 2018). Área experimental é coberta por campo naturalizado polifítico que ocupou área espontaneamente após a retirada da cobertura vegetal original há muitas décadas (Buch et al., 2024).

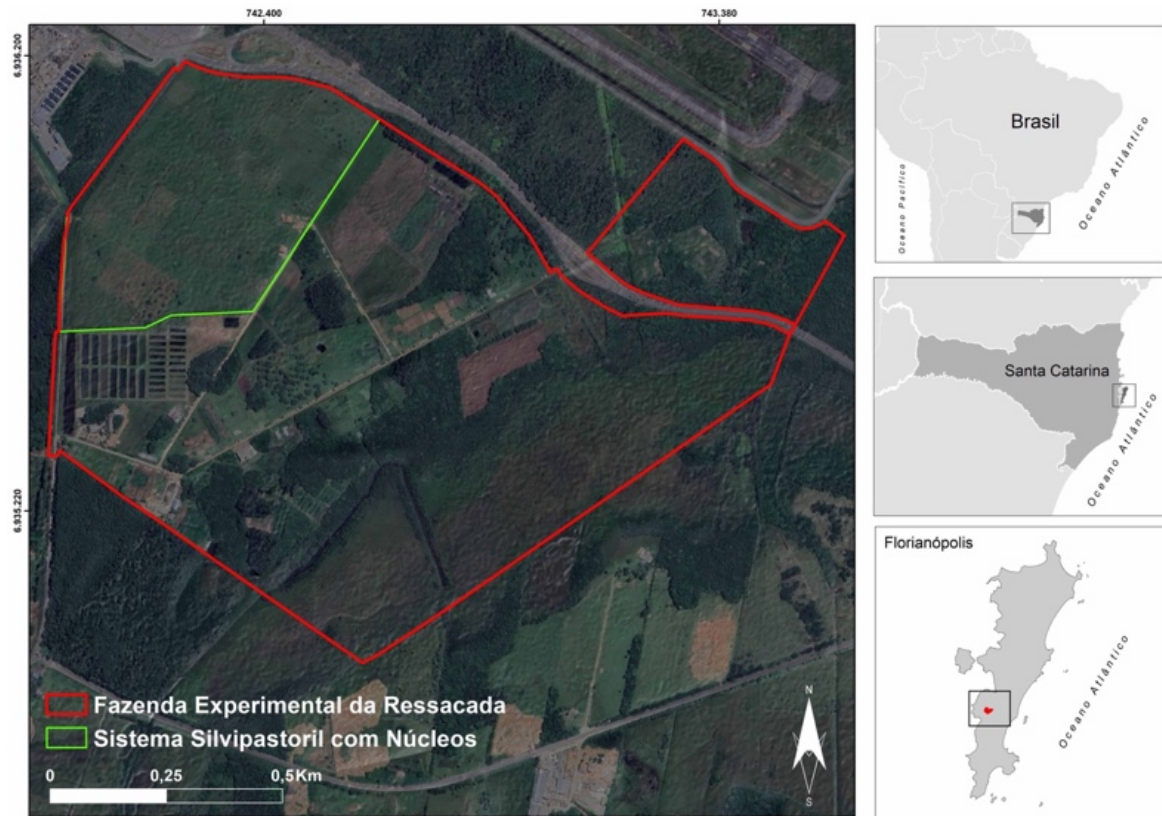


Figura 1 Localização da Fazenda Experimental da Ressacada (FER/UFSC) Fonte: Thais Rocha.

O SSPnu é constituído por núcleos agroflorestais de 5m x 5m cercados e distribuídos de forma equidistante na pastagem naturalizada manejada rotativamente com PRV. As espécies arbóreas que compõem estes núcleos são *Tibouchina granulosa*, *Citharexylum myrianthum*, *Calophyllum brasiliense*, *Inga edulis*, *Mimosa bimucronata* e *Schinus terebinthifolia*, além da *Musa paradisíaca*. Ao final da implantação do sistema são 12 árvores, 8 palmeiras e 4 bananeiras. Para viabilizar a implantação de arbóreas em uma pastagem 'limpa' e degradada se fez necessário a preparação dos núcleos com plantas ruderais como primeiro estágio sucessional. Este grupo de plantas facilitadoras que preparou o sistema para o plantio das arbóreas pioneiras em cada núcleo foi denominado grupo funcional zero (GF0) e é composto pela *Musa paradisíaca*, *Cajanus cajan*, *Penisetum purpureum*, *Arachis pintoi* e *Mucuna pruriens*. O Grupo funcional zero foi implantado em 2018, já as arbóreas em

2019. A área experimental é composta por 3 blocos de 4 piquetes. Cada piquetes têm cerca de 2500 m². Em cada bloco, são dois piquetes com 10% da área com núcleos e dois com 5% da área com núcleos, totalizando 94 núcleos.

COLETA DE DADOS

As coletas foram realizadas anualmente, sempre durante o outono, nos anos de 2020, 2021, 2022 e 2023, foram medidas a altura e o diâmetro à altura do peito (DAP) de todas as árvores e bananeiras em cada núcleo. A biomassa aérea das árvores foi estimada com a equação de (Brown 1997) para florestas tropicais da América do Sul: $\ln(\text{Biomassa, kg}) = -2,134 + 2,530 \times \ln(\text{DAP})$, com R² de 0,97, onde DAP representa a medida do diâmetro à altura do peito de cada indivíduo arbóreo. Para calcular a produção de biomassa nas bananeiras, foi utilizada a equação $\ln \text{BAS} = -6,415 + 2,94 \times \ln(\text{DAP})$, com R² de 0,86, onde BAS é a biomassa acima do solo e DAP é o diâmetro na altura do peito (Kamusingize et al., 2018). A estimativa do carbono considerou 50% da biomassa seca para as árvores (IPCC, 2003) e 48,2% para bananeiras (Kamusingize et al., 2018). Como medida complementar de crescimento, foi calculado o Incremento Total em Diâmetro (ITD) para cada núcleo, considerando o somatório dos incrementos individuais das árvores com DAP ≥ 5 cm entre dois períodos de medição consecutivos: $\text{ITD} = \sum (\text{DAP}_{2i} - \text{DAP}_{1i})$ onde DAP_{1i} e DAP_{2i} são, respectivamente, os diâmetros da árvore i nos dois períodos avaliados. O ITD foi expresso por parcela de 25 m², refletindo o acúmulo total de crescimento em diâmetro nas condições experimentais. Essa métrica foi adotada por sua sensibilidade em contextos de baixa densidade arbórea, como é típico em SSPs. Além do DAP e da altura total, foram também mensuradas a área basal das árvores, a densidade de indivíduos por núcleo (número de árvores vivas por núcleo de 25 m²) e a taxa de sobrevivência (% de indivíduos vivos em relação ao total plantado por núcleo de 25 m²). A área basal foi calculada com base no DAP de cada indivíduo, e os valores foram expressos em m² por 25m². A densidade de árvores por núcleo foi obtida a partir da contagem do número de indivíduos vivos registrados em cada campanha de medição a campo. Essa abordagem permite acompanhar a dinâmica populacional ao longo do tempo, refletindo tanto a mortalidade de mudas quanto o eventual surgimento de indivíduos espontâneos. Ao considerar uma unidade fixa de 25 m², correspondente à área de cada núcleo, esse método fornece uma medida precisa da ocupação arbórea, facilitando a análise do desempenho do sistema em diferentes condições de manejo

e ao longo da sucessão ecológica. Já a sobrevivência foi estimada a partir da razão entre o número de árvores vivas e o número total originalmente plantado por núcleo, sendo expressa em porcentagem.

ANÁLISE DE DADOS

O delineamento experimental é Blocos Casualizados e cada núcleo foi considerado uma unidade amostral. Análises descritivas e boxplots foram utilizados para examinar a distribuição, dispersão e presença de outliers. Como os dados não atenderam aos pressupostos de normalidade, foram aplicados testes não-paramétricos para a comparação entre os tratamentos de densidade (5% e 10%). O teste de Kruskal-Wallis foi usado para identificar diferenças entre os grupos seguido por comparações múltiplas com correção de Bonferroni quando necessário. Para analisar as relações as variáveis estruturais e funcionais, como biomassa, carbono, ITD, sobrevivência, densidade de árvores e biomassa de bananeiras, foram ajustados modelos de regressão linear simples. Cada modelo incluiu a verificação da significância pelo teste F (ANOVA) e interpretação do coeficiente de determinação (R^2). A significância estatística foi considerada para $p < 0,05$. As análises foram realizadas no ambiente RStudio (R Core Team, 2023), usando pacotes complementares para a visualização e testes de hipóteses.

RESULTADOS

EFEITO DA DENSIDADE ESTRUTURAL SOBRE O DESEMPENHO DAS ÁRVORES

A densidade de núcleos, 40 núcleos/ha (10% da área com núcleos) ou 20 núcleos/ha (5% da área com núcleos) não teve efeito sobre o crescimento das árvores e o acúmulo de carbono no SSPnu (Tabela 1; Figura 1). Em ambos os tratamentos, todas as variáveis analisadas: DAP, altura total, área basal e estoque de carbono nos 2 e 4 anos de implantação das arbóreas não foram influenciadas pela maior ou menos densidade de núcleos na pastagem. Estes resultados sugerem que, nos primeiros quatro anos de desenvolvimento do sistema, a variação na densidade de núcleos por hectare não exerce influência significativa sobre o desempenho arbóreo.

Tabela 1 Efeito das densidades de núcleos no piquete (5% e 10%) sobre variáveis arbóreas em sistema silvipastoril com núcleos (SSPnu): diâmetro à altura do peito (cm), altura das árvores (m), área basal (m²/ha) e estoque de carbono (Mg/ha).

Variável	Tratamento			
	5% por hectare		10% por hectare	
	Chi quadrado	p-value	Chi quadrado	p-value
Diâmetro (cm)	0,78008	0,3771	3,3372	0,06773
Altura (cm)	0,038543	0,8444	0,11781	0,7314
Área basal (m ² /ha)	2,0635	0,1509	0,53291	0,4654
Carbono (Mg/ha)	1,9827	0,1591	0,72533	0,3944

GI = 1 para todas as análises

Há aumento progressivo dos valores de diâmetro e altura das árvores, acúmulo de carbono e área basal ao longo do tempo, indicando crescimento contínuo das árvores independentemente da densidade de núcleos por hectare (Figura 2). Em um período de 4 anos, é possível observar o crescimento das árvores dentro dos núcleos. Dessa maneira, as diferenças estão relacionadas as idades e não entre a densidade de núcleos dentro do piquete. Esses dados reforçam que durante os estágios iniciais de estabelecimento do SSPnu, a densidade de núcleos não foi um fator limitante para o crescimento ou para o acúmulo de carbono arbóreo.

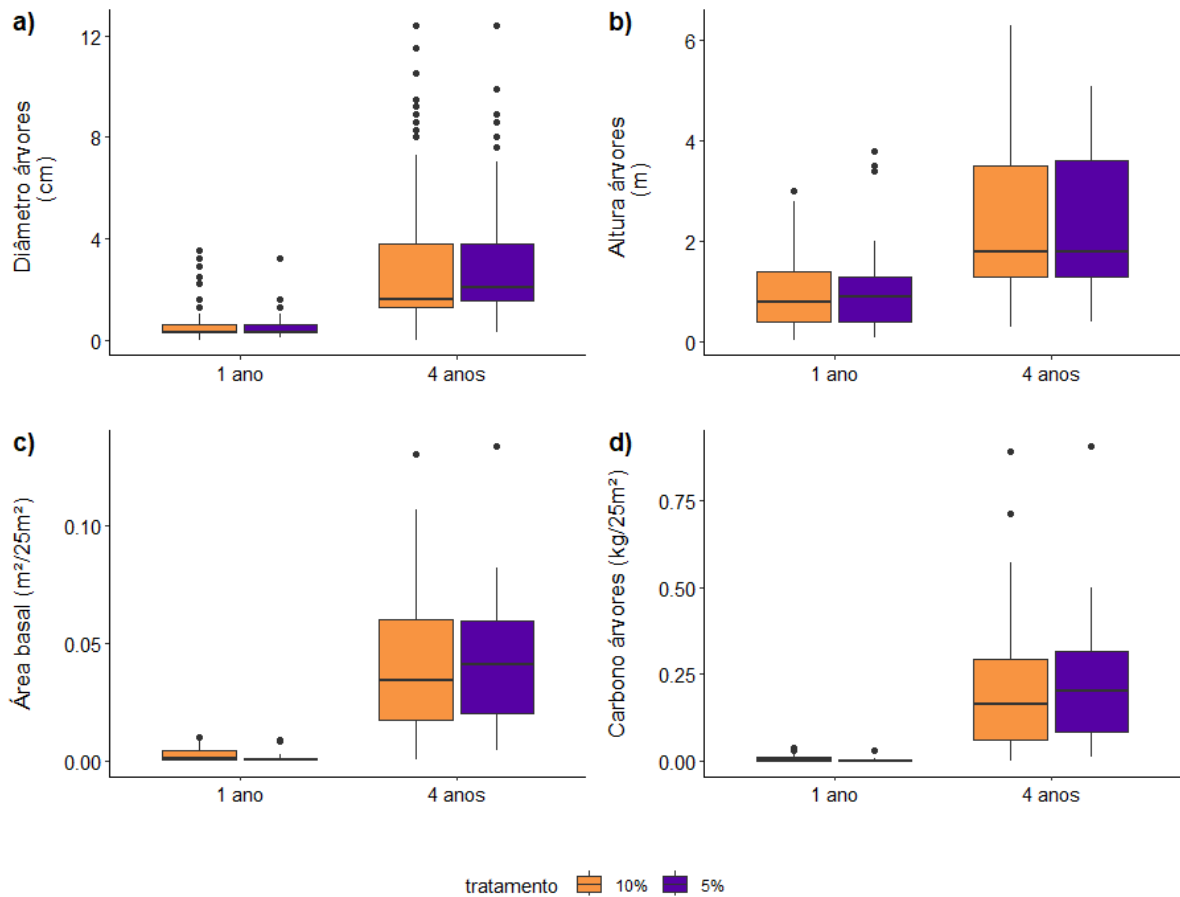


Figura 2. Distribuição das variáveis arbóreas nos sistemas SSPnu ao longo do tempo (2 e 5 anos), comparando densidades de núcleos de 5% e 10% por hectare. (a) Diâmetro de árvores por núcleo (25m²); (b) Altura de árvores por núcleo (25m²); (c) Área basal das árvores por núcleo (25m²); (d) Carbono arbóreo por núcleo (25m²).

Avaliando a densidade de árvores nos núcleos, observou-se que não está associada ao acúmulo de biomassa e carbono arbóreo (Figura 3a, 3b). Há ausência de relação linear entre essas variáveis ($R^2 = 0,05$), e valores de p não significativos ($p = 0,013$). Embora o poder preditivo dos modelos seja baixo, os resultados indicam uma tendência de aumento no acúmulo de biomassa e carbono com o aumento da densidade arbórea. Essa tendência pode estar associada ao uso mais eficiente do espaço e à ocupação vertical do dossel em estágios iniciais, antes que ocorra sombreamento significativo entre indivíduos (Roy et al., 2021). O ITD das árvores também apresentou relação positiva com o número de indivíduos por núcleo ($R^2 = 0,09$; $p = 0,002$; Figura 3c), reforçando a ideia de que a maior densidade promove não apenas o acúmulo estrutural, mas também um crescimento mais acelerado em diâmetro, sem sinais de competição negativa (Roy et al., 2021). Esse padrão sugere que, nos primeiros anos do SSPnu, a disponibilidade de recursos como luz, água e nutrientes ainda é suficiente para maximizar o crescimento mesmo em núcleos mais

densos. Por outro lado, a taxa de sobrevivência das árvores não apresentou relação com o estoque de carbono ($R^2 = -0,01$; $p = 0,536$; Figura 3d), o que indica que a variação no desempenho funcional das árvores não é explicada por diferenças na sobrevivência, possivelmente devido à alta taxa de sobrevivência geral observada ou à influência de outros fatores, como a presença de espécies facilitadoras ou o manejo prévio da área.

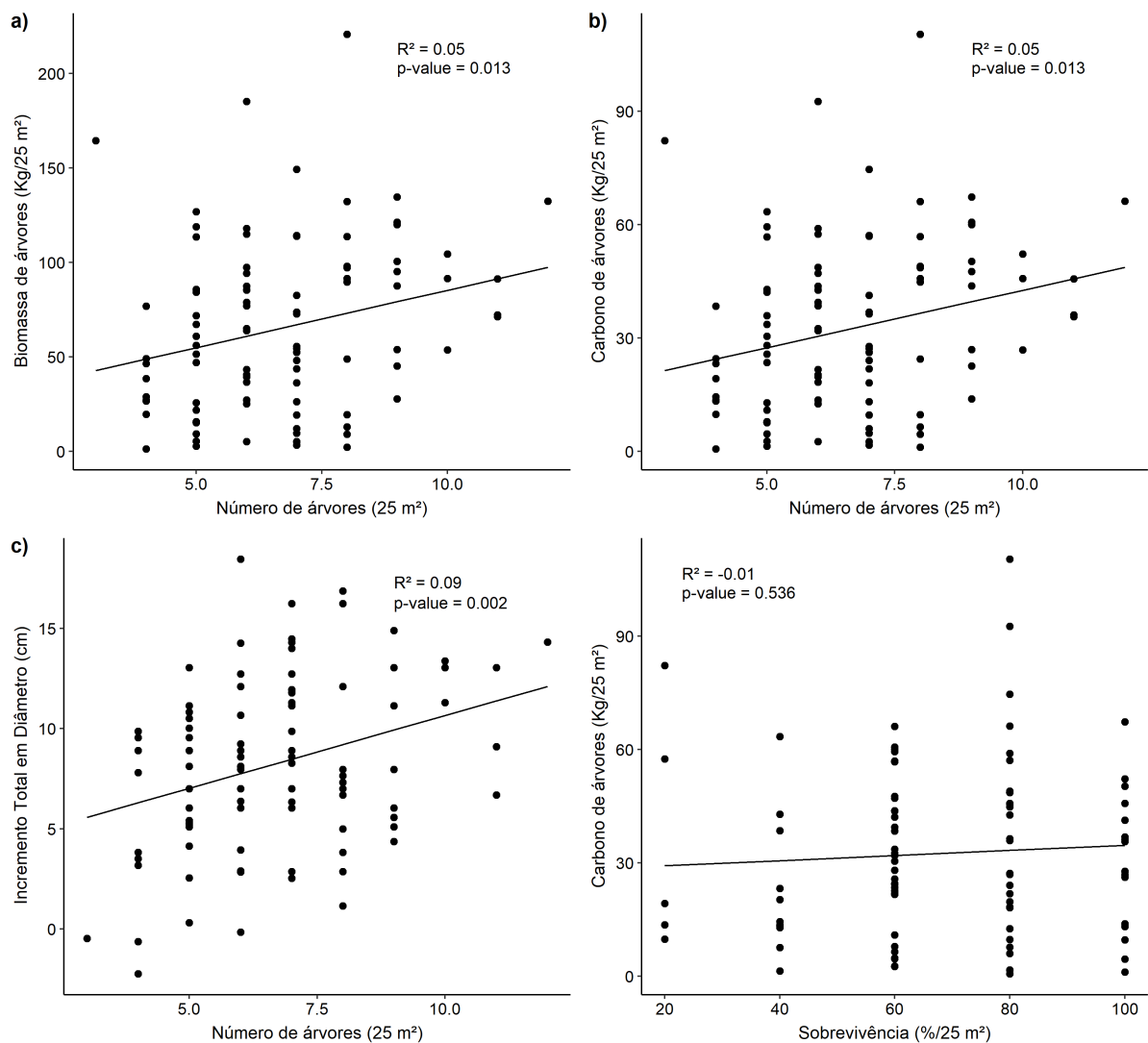


Figura 3. Relações entre o número de árvores por núcleo (25 m²) e (a) Biomassa aérea total das árvores (kg/25 m²), (b) Carbono na parte aérea das árvores (kg/25 m²), (c) Incremento total em diâmetro das árvores (cm), e (d) Relação entre o acúmulo de carbono aéreo das árvores em relação à taxa de sobrevivência (%) nos núcleos do sistema silvipastoril com núcleos (SSPnu).

CONTRIBUIÇÃO FUNCIONAL DA BANANEIRA PARA O DESEMPENHO DO SSPNU

A biomassa da bananeira apresenta correlação positiva e altamente significativa com a biomassa aérea das árvores ($R^2 = 0,85$; $p < 0,001$; Figura 4a) e com o estoque de carbono arbóreo ($R^2 = 0,85$; $p < 0,001$; Figura 4b). Essas associações indicam que o aumento da biomassa da bananeira está fortemente relacionado ao desempenho estrutural das espécies arbóreas nos núcleos, sugerindo que a bananeira exerce influência funcional direta sobre a produtividade do sistema. A magnitude elevada dos coeficientes de determinação reforça o papel central dessa espécie como elemento facilitador no SSPnu, possivelmente por modificar o microclima, aumentar a retenção de umidade e favorecer a ciclagem de nutrientes (Jesus et al., 2025).

A relação entre a biomassa da bananeira e o ITD também foi significativa ($R^2 = 0,04$; $p = 0,025$; Figura 4c), indicando uma tendência de maior crescimento diamétrico das árvores em núcleos com maior biomassa de bananeiras. Entretanto, a baixa capacidade explicativa do modelo sugere que o crescimento em diâmetro pode estar condicionado a outros fatores, como características específicas das espécies arbóreas, heterogeneidade edáfica ou variações microambientais não capturadas pelo modelo. Por outro lado, a biomassa da bananeira não apresentou correlação significativa com a taxa de sobrevivência das árvores ($R^2 = -0,001$; $p = 0,056$; Figura 4d), indicando que a variação na produtividade da bananeira não é explicada por diferenças na sobrevivência arbórea. Esse resultado sugere que o papel facilitador da bananeira atua principalmente sobre o crescimento das árvores e o acúmulo de biomassa, sem exercer influência direta sobre a mortalidade ou estabelecimento inicial das espécies.

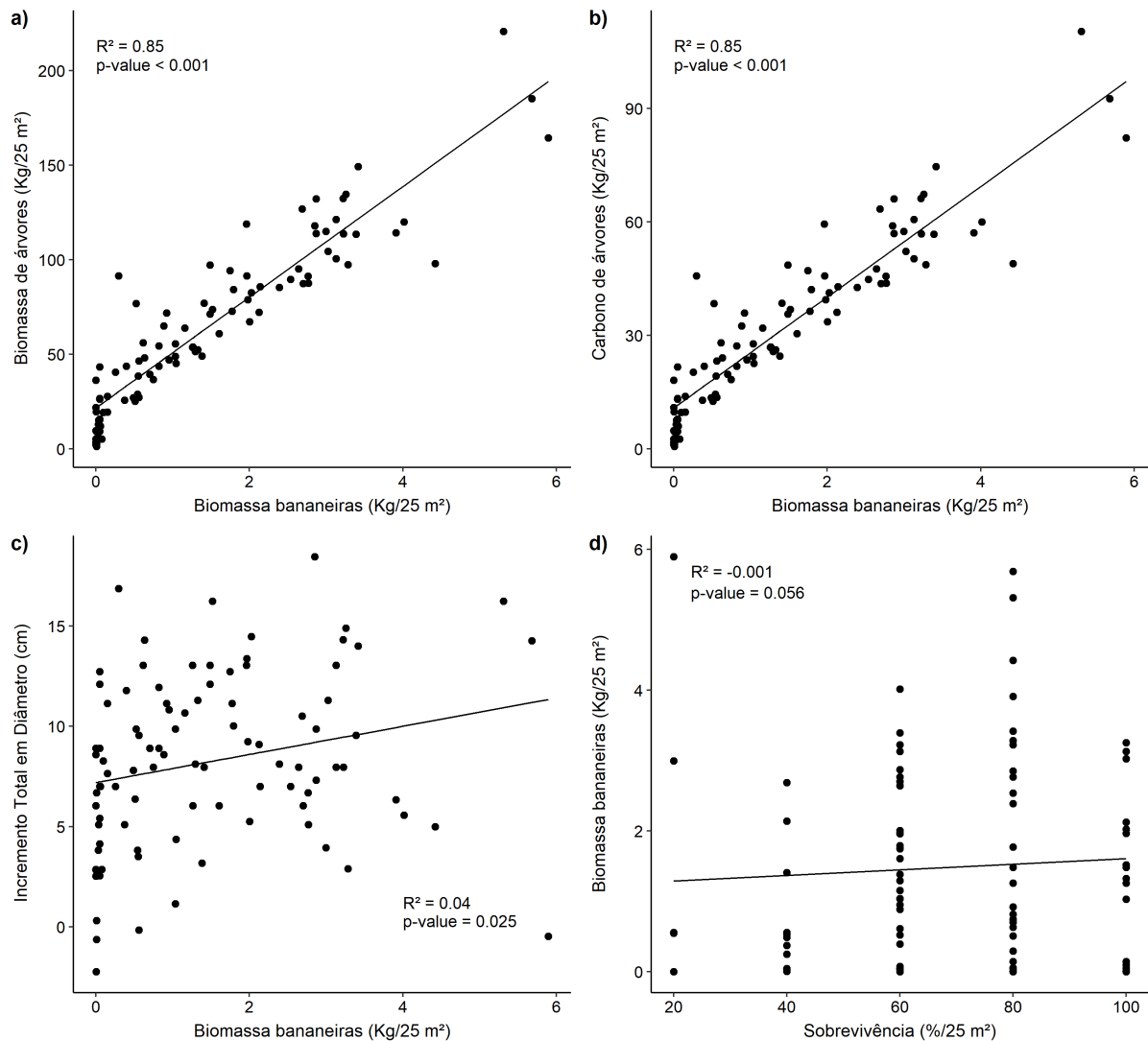


Figura 4. Relações entre a biomassa das bananeiras (kg/25 m²) e (a) biomassa arbórea (kg/25 m²), (b) carbono arbóreo (kg/25 m²), (c) Incremento Total em Diâmetro de árvores (cm), e (d) taxa de sobrevivência (%) das árvores nos núcleos do sistema silvipastoril com núcleos (SSPnu).

DISCUSSÃO

EFEITOS DA ESTRUTURA DO SISTEMA SOBRE O CRESCIMENTO E O CARBONO ARBÓREO

A densidade de núcleos não foi um fator limitante para o desenvolvimento arbóreo nos quatro primeiros anos após a implantação das arbóreas no SSPnu. Isso indica que, nas condições avaliadas, não houve competição significativa entre os indivíduos nos diferentes tratamentos de densidade. Três fatores podem explicar esse resultado: (i) o espaçamento entre núcleos, que pode ter sido suficiente para evitar interações competitivas por luz e recursos (Postma, 2021); (ii) a complementariedade

funcional entre as espécies presentes, reduzindo sobreposição de nichos e otimizando o uso dos recursos (Reich et al., 2012); e (iii) a idade jovem do sistema mantendo baixa a competição por luz até o fechamento do dossel (Farooq et al., 2021).

A ausência de diferenças no acúmulo de carbono entre as densidades indica que, nos estágios iniciais, a produtividade arbórea é mais influenciada pelo desenvolvimento das plantas do que pela densidade de núcleos. O acúmulo de biomassa depende da taxa de crescimento e da eficiência fotossintética, moduladas por fatores morfológicos e ambientais. Com o avanço sucessional, a competição por recursos, como luz e nutrientes, tende a aumentar, podendo evidenciar diferenças entre os tratamentos (Mubarak et al., 2022). Em fases posteriores, pode ocorrer uma maior densidade de plantas com competição mais intensa por luz, e reduzir o crescimento de indivíduos dominados com efeito negativo no sub-bosque, resultando na redução da produtividade do sistema (Richards et al., 2010). No entanto, se a densidade e o espaçamento forem planejados com base na complementariedade funcional entre espécies, esses efeitos podem ser minimizados (Reich et al., 2012).

Apesar da ausência de diferenças estatísticas, a densidade de 40 núcleos por hectare (10%) mostra-se promissora, pois não comprometeu o crescimento das árvores nos primeiros anos e oferece benefícios adicionais, como maior produção de produtos florestais não-madeireiros, maior sequestro de carbono (Silva et al., 2020), sombreamento para o conforto térmico do gado (Schmitt Filho et al., 2023), incremento da biodiversidade (Simioni et al., 2022) e mitigação dos efeitos climáticos (Hanberry, 2021).

Por outro lado, os resultados das regressões indicam que a densidade de árvores por núcleo tem relação significativa com o ITD, ainda que a capacidade explicativa seja moderada ($R^2 = 0,09$). Esse padrão sugere que, mesmo em densidades mais altas, o crescimento em diâmetro não foi prejudicado, o que corrobora a hipótese de que, nos estágios iniciais do SSPnu, a disponibilidade de recursos é suficiente para sustentar o desenvolvimento das árvores sem competição limitante (Petrea et al., 2024).

PAPEL FUNCIONAL DA BANANEIRA COMO FACILITADORA NO DESEMPENHO ARBÓREO

Em sistemas biodiversos, interações planta-planta desempenham um papel regulador essencial na produtividade e acúmulo de carbono, principalmente por meio de mecanismos como facilitação, complementariedade de nicho e redução da competição intraespecífica (Duchene et al., 2017). Neste contexto, a bananeira (*Musa spp.*) surge como uma espécie funcional estratégica para o desenho de sistemas agroflorestais biodiversos, especialmente em estágios iniciais de desenvolvimento. Seu rápido crescimento, ciclo curto e elevada biomassa favorecem tanto o retorno econômico quanto a criação de um microclima adequado ao crescimento de espécies arbóreas de interesse (Lopes Costa et al., 2024).

No SSPnu, os resultados demonstram que a biomassa das bananeiras está fortemente associada ao aumento de biomassa e carbono arbóreo, sugerindo que a presença da bananeira exerce um efeito facilitador direto. A capacidade da bananeira de atuar como planta-mãe, promovendo sombreamento, retenção de umidade e maior estabilidade térmica, pode reduzir a evapotranspiração, atenuar extremos de temperatura e favorecer o desempenho de espécies arbóreas vizinhas (Abdala-Roberts et al., 2016).

Estudos de caso como o conduzido na Ilha de Socotra no Iêmen, reforça o papel ecológico das plantas-mãe, que promovem maior diversidade e regeneração de lenhosas ao criar micro-habitat benéficos em ambientes adversos (Montagna et al., 2025). De forma similar, evidências em sistemas agroflorestais com cacau demonstraram que maiores densidades de bananeiras aumentam significativamente o rendimento das árvores principais, reforçando a importância do arranjo funcional e da diversidade vertical como estratégia de manejo (Deheuvels et al., 2012).

Além de sua função ecológica, a bananeira também tem se mostrado vantajosa em termos econômicos. Sistema consorciado com banana e café, por exemplo, apresentaram melhor desempenho econômico do que os monocultivos, com maior renda líquida e segurança alimentar para pequenos produtores (Van Asten et al., 2011). Embora em alguns consórcios a produtividade da bananeira possa ser inferior à obtida em cultivo exclusivo, análises indicam maior relação custo-benefício devido à diversificação produtiva (Almeida et al., 2019). O desempenho produtivo da bananeira, no entanto, depende de compatibilidades funcionais entre as espécies

associadas. Em sistemas mal planejados, como consórcios de banana e feijão, a bananeira pode exercer dominância competitiva, reduzindo o rendimento da espécie associada devido ao sombreamento e à competição por nutrientes (Wortmann et al., 1992). Essa dualidade evidencia a importância de avaliar o porte, exigências nutricionais e arquitetura das espécies ao compor os núcleos do sistema.

A literatura também demonstra que sistemas biodiversos, incluindo bananeiras e outras espécies funcionais, aumentam o rendimento total do sistema, melhoram a eficiência na absorção de recursos e reforçam a estabilidade ecológica, mesmo quando a cultura principal apresenta produtividade reduzida em comparação a monocultivos (Niether et al., 2019). Experimentos com cerejeiras no Chile, pinheiros nas Ilhas Britânicas e leguminosas tropicais na Índia demonstram a sinergia dos consórcios bem planejados favorecendo o crescimento de espécies lenhosas, aumentando a biomassa aérea e otimizando o uso da terra, especialmente em solos pobres (Ahirwal et al., 2021).

Similarmente foi observado no nordeste do Brasil quando avaliou-se o crescimento inicial e o acúmulo de biomassa de *Khaya senegalensis* em plantio puro e em sistema agroflorestal consorciado com banana e milho. Embora a biomassa aérea acumulada tenha sido 144% maior no plantio puro, não houve diferença no crescimento individual das árvores entre os sistemas, o que reforça o potencial dos consórcios para uso eficiente da terra, especialmente quando o objetivo é integrar produção agrícola e florestal em contextos de agricultura familiar (Silva et al., 2023) sem comprometer a viabilidade econômica. Para isso, é essencial que o planejamento relacione a diversidade funcional de cada espécie com o espaçamento, a densidade e o desempenho conjunto (Gendy et al., 2017).

No SSPnu, os resultados corroboram a hipótese de que a bananeira desempenha papel multifuncional, promovendo tanto ganhos ecológicos quanto produtivos. Sua inclusão estratégica no arranjo de núcleos pode ser decisiva para aumentar o rendimento geral, acelerar o crescimento arbóreo e favorecer o sequestro de carbono, além de melhorar a viabilidade econômica. As análises evidenciaram que a biomassa das bananeiras está fortemente associada à biomassa e ao carbono arbóreo, com coeficientes de determinação elevados ($R^2 = 0,85$). Esses resultados reforçam o papel funcional da bananeira como espécie facilitadora, capaz de modificar o microambiente nos núcleos por meio da regulação térmica, retenção de umidade e adição de matéria orgânica ao solo (Silva et al., 2020). O aumento no desempenho

arbóreo em núcleos com maior biomassa de bananeira corrobora estudos prévios que destacam a importância de espécies pioneiras de rápido crescimento em sistemas agroflorestais biodiversos (Abdala-Roberts et al., 2016).

A facilitação ecológica promovida por plantas-mãe tem sido documentada em diferentes contextos ecológicos, incluindo ambientes áridos, tropicais e montanhosos (Montagna et al., 2025; Kaur et al., 2024). Esses efeitos positivos tendem a ser mais expressivos em sistemas jovens ou em áreas degradadas, onde a criação de micro habitats favoráveis é determinante para o estabelecimento e crescimento de espécies arbóreas. No SSPnu, a bananeira atua como planta-mãe ao favorecer condições edáficas e microclimáticas, o que contribui diretamente para o desempenho do componente arbóreo. Em sistemas naturais, interações semelhantes também são observadas. Um estudo sobre a relação entre *Retama sphaerocarpa* e *Marrubium vulgare* demonstrou facilitação mútua, com melhorias na biomassa, acúmulo de nitrogênio e status hídrico de ambas as espécies. Esses efeitos foram atribuídos a modificações microambientais promovidas pelas copas e à maior disponibilidade de nutrientes no sub-bosque, destacando o potencial das interações positivas no aprimoramento da eficiência ecológica de sistemas consorciados (Verdú, 2021).

Além do desempenho ecológico, a presença da bananeira tem se mostrado vantajosa também do ponto de vista agrônomo e econômico. Estudos em sistemas consorciados (banana com café, cacau, feijão ou culturas hortícolas) apontam ganhos na produtividade total, diversificação da renda e eficiência no uso da terra. Em muitos casos, mesmo quando a produtividade de uma cultura principal é ligeiramente reduzida, o rendimento total do sistema e sua resiliência ecológica são ampliados, o que é particularmente relevante para sistemas de pequenos agricultores e agricultura familiar (Van Asten et al., 2011; Almeida et al., 2019).

Contudo, é necessário atentar para possíveis efeitos competitivos em sistemas mal planejados. O desempenho inferior do feijão em consórcio com banana, por exemplo, revela que o porte e as exigências nutricionais das espécies devem ser considerados (Wortmann et al., 1992). O equilíbrio entre facilitação e competição depende de aspectos como densidade, espaçamento, arquitetura das espécies e características edafoclimáticas.

A variabilidade nas respostas também foi observada para o ITD, em que a biomassa de bananeiras apresentou relação significativa, porém com baixa capacidade explicativa. Isso sugere que, embora a bananeira contribua para o

crescimento estrutural das árvores, outros fatores - como características intrínsecas das espécies arbóreas, condições do solo ou manejo - também desempenham papel importante na determinação do crescimento diamétrico (Holl et al., 2020).

Por fim, o desempenho do SSPnu em função da presença da bananeira reforça a importância de arranjos com diversidade funcional (Holl et al., 2020). A escolha adequada de espécies companheiras, aliada à definição estratégica da densidade e do espaçamento, pode maximizar os efeitos positivos da facilitação e reduzir a competição indesejada, tornando o sistema mais produtivo, resiliente e eficiência ecológica, econômica e climática (Gendyet al., 2017). A bananeira, nesse contexto, emerge como um componente-chave no desenho de agroflorestas tropicais e subtropicais sustentáveis, com benefícios comprovados tanto no desempenho arbóreo quanto na viabilidade agronômica dos sistemas integrados.

CONCLUSÃO

A densidade de núcleos por hectare (5% ou 10%) não influenciou significativamente no crescimento, na taxa de sobrevivência nem no acúmulo de carbono das árvores durante os primeiros quatro anos. Esses resultados sugerem que, em estágios iniciais, o sistema apresenta baixa competição por recursos, favorecido por espaçamentos adequados e pela complementariedade funcional entre espécies pioneiras.

Embora os efeitos da densidade estrutural não tenham se manifestado nos primeiros anos, o arranjo com 10% de núcleos tem maior potencial produtivo por hectare, sem comprometer o crescimento individual das árvores. Esta densidade dobraria o rendimento dos produtos florestais não-madeireiros em relação a densidade 5%, além de incrementar o sequestro de carbono, a ciclagem de nutrientes e a cobertura arbórea para conforto térmico animal.

Em contrapartida, a biomassa de bananeiras mostrou forte correlação com a biomassa e o carbono arbóreo, evidenciando seu papel como espécie funcional e potencial facilitadora. A presença da bananeira contribui para a melhoria das condições microclimáticas e do solo, promovendo ganhos diretos no desempenho estrutural das arbóreas.

Os resultados apontam que variáveis funcionais, como o papel facilitador de espécies pioneiras, exercem influência mais decisiva sobre o desempenho do sistema

do que a densidade de plantio em si. A continuidade do monitoramento será essencial para compreender como essas relações evoluem com o fechamento do dossel e a intensificação da competição por luz e nutrientes.

A adoção de arranjos funcionais, com combinações de espécies planejadas e manejo adequado da densidade, pode tornar os SSPnu mais eficientes, resilientes e alinhados às demandas de sustentabilidade, produção integrada e adaptação climática.

REFERÊNCIAS

Abdala-Roberts, L.; Xoaquín, S.; Víctor, P.; Kailen, A., 2016. Test of biotic and abiotic correlates of latitudinal variation in defences in the perennial herb *ruellia nudiflora*. *Journal of Ecology*, v. 104 (2), 580–90. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.12512>.

Agunbiade, G.; Sahoo, D.; O'Halloran, L.; Silva, L.; Malcomson, H., 2025. Impact of silvopasture on soil health and water quality in the Southeast USA: a review. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, v. 59, p. 102448. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102448>.

Ahirwal, J.; Sneha, K.; Ashutosh, K.; Adarsh, K.; Subodh, K., 2021. Changes in soil properties and carbon fluxes following afforestation and agriculture in tropical forest. *Ecological Indicators*, v. 123 (4), 107354. <https://doi.org/10.1016/J.ECOLIND.2021.107354>.

Almeida, U.; Andrade Neto, R.; Lunz, A.; Cades, M.; Costa, D.; Araújo, J.; Teixeira Júnior, D.; Rodrigues, M., 2019. Production of banana, cultivar d'angola, intercropped with açaí single in different planting arrangements. *Revista Brasileira de Agropecuária Sustentável*, v. 9 (1), 80-89. <https://www.cabidigitallibrary.org/doi/full/10.5555/20219940022>.

Alvares, C.; Stape, J.; Sentelhas, P.; Gonçalves, J.; Sparovek G., 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift* v. 22 (6): 711–28. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>.

Andrade, J.; Brook, R.; Muhammad, I., 2008. Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of costa rica. *Plant and Soil*, 308 (1–2): 11–22. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9600-x>.

Brown, S., 1997. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: A primer. *FAO Forestry*, 134 p.

Buch, R.; Schmitt Filho, A.; Thaines, L.; Battisti, L.; Dewes, C.; Kazama, D., 2024. Sistema silvipastoril com núcleos arbóreos: produção e qualidade da pastagem. *Cadernos de Agroecologia*, v. 19 (1). <https://cadernos.abagroecologia.org.br/cadernos/article/view/7788>.

Deheuvels, O.; Avelino, J.; Somarriba, E.; Malezieux, E., 2012. Vegetation structure and productivity in cocoa-based agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 149, p. 181–188. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.003>.

Duchene, O.; Vian, J.; Celette, F., 2017. Intercropping with legume for agroecological cropping systems: complementarity and facilitation processes and the importance of soil microorganisms. A review. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 240, p. 148–161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.02.019>.

Embrapa, 2018. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS). Centro Nacional de Pesquisa de Solo, Rio de Janeiro.

Farley, J.; Schmitt-Filho, A., 2024. Building a restorative agricultural economy: insights from a case study in Santa Catarina, Brazil. *Sustainability*, v. 16 (11), p. 4788. <https://doi.org/10.3390/su16114788>.

Farooq, T.; Shakoar, A.; Rashid, M.; Zhang, S.; Wu, P.; Yan, W., 2021. Annual growth progression, nutrient transformation, and carbon storage in tissues of *Cunninghamia lanceolata* monoculture in relation to soil quality indicators influenced

by intraspecific competition intensity. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, v. 21 (4), p. 3146–3158. <https://doi.org/10.1007/S42729-021-00595-W>.

Gendy, S.; Nosir, W.; Nawar, A., 2017. Evaluation of competitive indices between roselle and cowpea as influenced by intercropping system and bio-fertilization type. *Middle East Journal of Agriculture Research*, v. 6 (1), p. 199–207. <https://doi.org/10.1007/S49729-044-06762-W>

Hanberry, B., 2021. Timing of tree density increases, influence of climate change, and a land use proxy for tree density increases in the eastern United States. *Land*, v. 10 (11), p. 1121. <https://doi.org/10.3390/land10111121>.

Holl, K.; Reid, J.; Cole, R.; Oviedo-Brenes, F.; Rosales, J.; Zahawi, R., 2020. Applied nucleation facilitates tropical forest recovery: lessons learned from a 15-year study. *Journal of Applied Ecology*, v. 57 (12), p. 2316–2328. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.13684>.

IPCC., 2003. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Institute for Global Environmental Strategies, Kanagawa, 593 p.

IPCC., 2018. Global warming of 1.5°C: An IPCC special report. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), New York, p. 393.

Jesus, P.; Leonel, S.; Leonel, M.; Cândido, H.; Tecchio, M., 2025. Variability, sustainability and productivity of banana and lemongrass intercropping based on yield components and competitive indices. *Scientia Horticulturae*, v. 340, p. 113946. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113946>.

Kamusingize, D.; Jackson, M.; Everline, K.; Susan, T.; Kephas, N.; Priver, N.; Jerome, K., 2018. Allometric relationships and carbon content for biomass-carbon estimation of East African highland bananas (*Musa* spp. AAA-EAHB) cv. Kibuzi, Nakitembe, Enyeru and Nakinyika. *African Journal of Agricultural Research*, v. 13 (36), p. 1865–1873. <https://doi.org/10.5897/AJAR2016.11960>.

Kaur, R.; Chauhan, M.; Dhyani, K.; Puri, S., 2024. Evaluation of growth and production behaviour of *Brassica campestris* L. under an existing agroforestry system in mid hills of Himachal Pradesh. *International Journal of Research in Agronomy*, v. 7 (6), p. 97–101. <https://doi.org/10.33545/2618060X.2024.V7.I6B.803>.

Lopes Costa, A.; Ferri, A.; Trugilho, G.; Rangel, O.; Vieira, R.; Souza, M., 2024. Contribuições da cultura da banana em sistemas agroflorestais no Espírito Santo. In: *Tópicos em Gestão Ambiental*, v. 2, p. 194–213. <https://doi.org/10.69570/mp.978-65-84548-23-7.c7>.

Machado, T.; Schmitt-Filho, A.; Daros, R.; Farley, J.; Sinisgalli, P.; Kazama, D., 2024. Microclimate and the thermal comfort during the implementation of silvopastoral systems: the windbreak countereffect. *International Journal of Biometeorology*, v. 68 (8), p. 1519–1531. <https://doi.org/10.1007/s00484-024-02681-x>.

Mazumder, S.; Bania, J.; Sileshi, G.; Paul, M.; Das, A.; Nath, A., 2025. Variation in biomass and soil carbon storage and sequestration rates in different agroforestry systems with climatic zones and soil types. *Environmental and Sustainability Indicators*, v. 26, p. 100642. <https://doi.org/10.1016/j.indic.2025.100642>.

Montagna, D.; De Sanctis, M.; Maděra, P.; Van Damme, K.; Hamdiah, S.; Attorre, F.; Malatesta, L., 2025. Shrubs as nurse species for plant communities in arid environments: a case study from Socotra Island (Yemen). *Journal of Vegetation Science*, v. 36 (2), p. e70020. <https://doi.org/10.1111/JVS.70020>.

Mubarak, A.; Musthapha, M.; Roshana, M.; Kumara, A., 2022. Influence of canopy architecture on the light interception, photosynthetic and biomass productivity in irrigated elite Sri Lankan rice varieties. *Journal of Agricultural Sciences*, v. 17 (1), p. 148–160. <https://doi.org/10.4038/jas.v17i1.9616>.

Niether, W.; Schneidewind, U.; Fuchs, M.; Schneider, M.; Armengot, L., 2019. Below and aboveground production in cocoa monocultures and agroforestry systems. *Science of The Total Environment*, v. 657, p. 558–567. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.050>.

Washington State Department of Ecology, 2020. Washington Geospatial Open Data Portal (Accessed November 15, 2019) at: <http://geo.wa.gov/datasets>.

UN, United Nations, 2025. World Meteorological Organization (Accessed may 15, 2025) at: <https://wmo.int/news/media-centre/wmo-confirms-2024-warmest-year-record-about-155degc-above-pre-industrial-level>;

Petrea, S.; Radu, G.; Braga, C.; Cucu, A.; Serban, T.; Zaharia, A.; Pepelea, D.; Ienasioiu, G.; Petritan, I., 2024. The role of wood density variation and biomass allocation in accurate forest carbon stock estimation of European beech (*Fagus sylvatica* L.) mountain forests. *Forests*, v. 15 (3), p. 404. <https://doi.org/10.3390/f15030404>.

Postma, J.; Hecht, V.; Hikosaka, K.; Nord, E.; Pons, T.; Poorter, H., 2021. Dividing the pie: a quantitative review on plant density responses. *Plant, Cell & Environment*, v. 44 (4), p. 1072–1094. <https://doi.org/10.1111/pce.13968>.

R Core Team. 2023. R: A Language and Environment for Statistical Computing.

Reich, P.; Tilman, D.; Isbell, F.; Mueller, K.; Hobbie, S.; Flynn, D.; Eisenhauer, N., 2012. Impacts of biodiversity loss escalate through time as redundancy fades. *Science*, v. 336 (6081), p. 589–592. <https://doi.org/10.1126/science.1217909>.

Richards, A.; Forrester, D.; Bauhus, J.; Scherer-Lorenzen, M., 2010. The influence of mixed tree plantations on the nutrition of individual species: a review. *Tree Physiology*, v. 30 (9), p. 1192–1208. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq035>.

Roy, S.; Mudi, S.; Das, P.; Ghosh, S.; Shit, P.; Bhunia, G.; Kim, J., 2021. Estimating Above Ground Biomass (AGB) and Tree Density Using Sentinel-1 Data. In: Shit, P.; Pourghasemi, H.; Das, P.; Bhunia, G. (Eds.), *Spatial Modeling in Forest Resources Management. Environmental Science and Engineering*. Springer, Cham. pp 259–280. https://doi.org/10.1007/978-3-030-56542-8_11

Schmitt Filho, A.; Kretzer, S.; Farley, J.; Kazama, D.; Sinisgalli, P.; Deniz, M., 2023. Applied nucleation under high biodiversity silvopastoral system as an adaptive strategy against microclimate extremes in pasture areas. *International Journal of Biometeorology*, v. 67, p. 1199–1212. <https://doi.org/10.1007/s00484-023-02488-2>.

Silva, R.; Hakamada, R.; Sousa, M.; Santos, G., 2023. Banana and corn interplanting did not reduce the initial growth of individual *Khaya senegalensis* (Desr.) A. Juss. trees in a dry region of Brazil. *Agroforestry Systems*, v. 97 (6), p. 1041–1054. <https://doi.org/10.1007/S1>.

Silva, A.; Schmitt Filho, A.; Kazama, D.; Loss, A.; Souza, M.; Piccolo, M.; Farley, J.; Sinisgalli, P., 2020. Carbon and nitrogen stocks in the high biodiversity silvopastoral system: applied nucleation enabling low carbon livestock production. *Research, Society and Development*, v. 9 (10), p. e2799108589. <https://doi.org/10.33448/rsd-v9i10.8589>.

Simioni, G.; Schmitt Filho, A.; Joner, F.; Farley, J.; Fantini, A.; Moreira, A., 2022. Response of birds to high biodiversity silvopastoral systems: integrating food production and biodiversity conservation through applied nucleation in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 324, p. 107709. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107709>.

Singh, B.; Delgado-Baquerizo, M.; Egidi, E.; Guirado, E.; Leach, J.; Liu, H.; Trivedi, P., 2023. Climate change impacts on plant pathogens, food security and paths forward. *Nature Reviews Microbiology*, v. 21, p. 640–656. <https://doi.org/10.1038/s41579-023-00900-7>.

Van Asten, L.; Wairegi, D.; Mukasa, N.; Uringi, N., 2011. Agronomic and economic benefits of coffee–banana intercropping in Uganda’s smallholder farming systems. *Agricultural Systems*, v. 104 (4), p. 326–334. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2010.12.004>.

Varela, F.; Bussoni, A.; Dieguez, F., 2024. Designing silvopastoral systems: a simulation model approach. *Agroforestry Systems*, v. 98 (7), p. 2353–2368. <https://doi.org/10.1007/s10457-024-01060-0>.

Verdú, M.; Gómez, J.; Valiente-Banuet, A.; Schöb, C., 2021. Facilitation and plant phenotypic evolution. *Trends in Plant Science*, v. 26 (9), p. 913–923. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2021.04.005>.

Wortmann, C.; Sengooba, T.; Kyamanywa, S., 1992. Banana and bean intercropping: factors affecting bean yield and land use efficiency. *Experimental Agriculture*, v. 28 (3), p. 287–294. <https://doi.org/10.1017/S0014479700019888>.

Wright, A.; Barry, K.; Lortie, C.; Callaway, R., 2021. Biodiversity and ecosystem functioning: have our experiments and indices been underestimating the role of facilitation? *Journal of Ecology*, v. 109 (5), p. 1962–1968. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.13665>.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo evidenciou o potencial dos sistemas silvipastoris com núcleos (SSPnu) como estratégia eficaz para a reabilitação ecológica de áreas degradadas no bioma Mata Atlântica, integrando produção agropecuária à restauração ecológica. A abordagem baseada em nucleação, aliada à seleção de espécies facilitadoras e ao manejo adequado, demonstrou ser capaz de promover o acúmulo inicial de biomassa e carbono em árvores e bananeiras, mesmo sob condições edáficas e climáticas desafiadoras.

Os dados obtidos ao longo dos quatro anos de monitoramento indicaram que a densidade de núcleos não afetou significativamente o crescimento arbóreo nem o acúmulo de carbono, sugerindo que o cenário de maior cobertura arbórea pode ser viável sem prejuízo ao desempenho individual das espécies. Por outro lado, a presença da bananeira teve papel determinante como planta facilitadora, estando positivamente correlacionada à biomassa arbórea e ao sequestro de carbono nos núcleos. Já o capim-elefante desempenhou um papel facilitador importante ao promover o aumento da sobrevivência das mudas arbóreas, protegendo-as dos fortes

ventos durante a fase inicial de implantação. No entanto, também apresentou efeitos negativos sobre o crescimento e a biomassa das árvores e bananeiras. Isso indica que sua influência envolve tanto mecanismos de facilitação quanto de competição por recursos.

Os resultados reforçam que a inclusão de espécies facilitadoras com diferentes atributos pode aumentar a resiliência e a multifuncionalidade dos SSPnu. A nucleação aplicada mostrou-se promissora para criar condições propícias à sucessão ecológica, à diversificação estrutural e ao incremento do estoque de carbono. Isso contribui para a mitigação das mudanças climáticas e para a transição para os sistemas agropecuários de baixa emissão.

Conclui-se que os SSPnu representam uma alternativa concreta para conciliar a produção agropecuária com a conservação ambiental, desde que suas particularidades ecológicas e de manejo sejam devidamente compreendidas e adaptadas a cada contexto. Estudos de longo prazo serão essenciais para acompanhar a dinâmica sucessional, os efeitos cumulativos das interações entre espécies e o desempenho produtivo e ecológico dos sistemas ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRAMOVAY, Ricardo et al. Regenerative cattle farming in Latin America and the Caribbean, far beyond the oxymoron. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 63, 2025.

ACHARD, Raphael et al. Intercropping of Grass Cover Crops in Banana Plantations: Impacts on Banana Growth and Yield. **Tropical Agriculture and Development**, v. 62, n. 1, p. 1–8, 2018.

ADUAN, RE; VILELA, MF; JÚNIOR, FB Dos Reis. **Os grandes ciclos biogeoquímicos do planeta**. 2004.

AHIRWAL, Jitendra et al. Changes in soil properties and carbon fluxes following afforestation and agriculture in tropical forest. **Ecological Indicators**, v. 123, p. 107354, 2021.

ALVARES, Clayton Alcarde et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 1 dez. 2013.

ALVEZ, Juan P. et al. Transition from Semi-Confinement to Pasture-Based Dairy in Brazil: Farmers' View of Economic and Environmental Performances. **Agroecology and Sustainable Food Systems**, v. 38, n. 9, p. 995–1014, 2014.

AMOAK, Daniel; LUGINAAH, Isaac; MCBEAN, Gordon. Climate Change, Food Security, and Health: Harnessing Agroecology to Build Climate-Resilient Communities. **Sustainability** (Switzerland). Multidisciplinary Digital Publishing Institute. 2022

ANDRADE, Hernán J; BROOK, Robert; IBRAHIM, Muhammad. Growth, production and carbon sequestration of silvopastoral systems with native timber species in the dry lowlands of Costa Rica. **Plant and Soil**, v. 308, n. 1–2, p. 11–22, 2008.

ARYAL, Deb R. et al. Carbon stocks and tree diversity in scattered tree silvopastoral systems in Chiapas, Mexico. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 1, p. 213–227, 2019.

BAI, Yongfei; COTRUFO, M. Francesca. Grassland soil carbon sequestration: Current understanding, challenges, and solutions. *Science*, v. 377, n. 6606, 2022.

BARAHONA, R et al. Contribución de la *Leucaena leucocephala* Lam (de Wit) a la oferta y digestibilidad de nutrientes y las emisiones de metano entérico en bovinos pastoreando en sistemas silvopastoriles intensivos. En: Premio Nacional de Ganadería José Raimundo Sojo Zambrano. **Revista Carta Fedegán**, n.140, p. 66–69, 2014.

BATTISTI, Luiz F. Zin et al. Densidade do solo nos múltiplos pontos de sombra do sistema voisin silvipastoril com núcleos (voisin ssp+núcleos). **Memorias IV Convención Internacional AGRODESARROLLO 2016**. Estación Experimental de Pastos y Forrajes Indio Hatuey. Matanzas. Cuba. 2016.

BHATT, N. et al. Effect of shading treatments on plant growth and physiology: A review. **Acta Ecologica Sinica**, v. 40, p. 83–92, 2020.

BICKSLER, Abram J. et al. The 10 Elements of Agroecology interconnected: Making them operational in FAO's work on agroecology. **Elem Sci Anth**, v. 11, n. 1. 2023.

BRIGHAM, Laurel M.; N. SUDING, Katharine. Cross-scale facilitation: a framework for microclimate moderation of climate change. **Oikos**, v. 2, n. 8, p. 10241, 2024

BROWN, S. Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer. FAO Forestry Paper, v. 134, n. August, p. 55, 1997.

BUSTAMANTE, Mercedes M.C. et al. Ecological restoration as a strategy for mitigating and adapting to climate change: lessons and challenges from Brazil. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 24, n. 7, p. 1249–1270, 2019.

CABALLERO, Cassia Brocca; RUHOFF, Anderson; BIGGS, Trent. Land use and land cover changes and their impacts on surface-atmosphere interactions in Brazil: A systematic review. **Science of The Total Environment**, v. 808, p. 152134, 2022.

CHARÁ, J. et al. Silvopastoral Systems and their Contribution to Improved Resource Use and Sustainable Development Goals: Evidence from Latin America, 2019.

CLEUGH, H. A. Effects of windbreaks on airflow, microclimates and crop yields. **Agroforestry Systems**, v. 41, n. 1, p. 55–84, 1998a.

DANET, Alain et al. Species diversity promotes facilitation under stressful conditions. **Oikos**, v. 2024, n. 9, p. e10303, 2024.

DAWID MUME, Ibsa; WORKALEMAHU, Sisay; MARZO, Clay; et al. Review on Windbreaks Agroforestry as a Climate Smart Agriculture Practices. **American Journal of Agriculture and Forestry**, v. 9, n. 6, p. 342–347, 2021.

DAWID MUME, Ibsa; WORKALEMAHU, Sisay; PETER, John; et al. Review on Windbreaks Agroforestry as a Climate Smart Agriculture Practices. **American Journal of Agriculture and Forestry**, v. 9, n. 6, p. 342–347, 2021.

DENIZ, Matheus et al. High biodiversity silvopastoral system as an alternative to improve the thermal environment in the dairy farms. **International Journal of Biometeorology**, v. 63, n. 1, p. 83–92, 2019.

DÍAZ, Sandra; CABIDO, Marcelo. Vive la différence: plant functional diversity matters to ecosystem processes. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 16, n. 11, p. 646–655, 2001.

DITTMER, Kyle M. et al. Agroecology Can Promote Climate Change Adaptation Outcomes Without Compromising Yield In Smallholder Systems. **Environmental Management**, v. 72, n. 2, p. 333–342, 2023.

EKKA, Pawan et al. Land degradation and its impacts on biodiversity and ecosystem services. **Land and Environmental Management through Forestry**, p. 77–101, 2024.

ESPÍNDOLA, JAA; ALMEIDA, DL de; GUERRA, JGM. Estratégias para utilização de leguminosas para adubação verde em unidades de produção agroecológica. 2004.

FAGUNDES, Marina Vergara et al. Nurse-target functional match explains plant facilitation strength. **Flora**, v. 292, p. 152061, 2022.

FAGUNDES, Marina V.; MAZZOCHINI, Guilherme G.; GANADE, Gislene. The role of plant diversity and facilitation during tropical dry forest restoration. **Journal of Ecology**, v. 111, n. 6, p. 1231–1241, 2023.

FARLEY, Joshua; SCHMITT-FILHO, Abdon. Building a Restorative Agricultural Economy: Insights from a Case Study in Santa Catarina, Brazil. **Sustainability**, v. 16, n. 11, p. 4788, 2024.

FELICIANO, Diana et al. Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 254, p. 117–129, 2018.

FIKE, John et al. Creating silvopastures: some considerations when planting trees in pastures. CSES-185P. Blacksburg, VA: Virginia Cooperative Extension., p. 1-8, 2017.

FISHER, A. D. et al. Effects of shade provision on the behaviour, body temperature and milk production of grazing dairy cows during a New Zealand summer. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v. 51, n. 2, p. 99–105, 2008.

FRANKS, Andrew J.; YATES, Colin J.; HOBBS, Richard J. Defining plant functional groups to guide rare plant management. **Plant Ecology**, v. 204, n. 2, p. 207–216, 2009.

FRIEDLINGSTEIN, Pierre et al. Global Carbon Budget 2023. **Earth System Science Data**, v. 15, n. 12, p. 5301–5369, 2023.

FU, Zheng et al. Recovery time and state change of terrestrial carbon cycle after disturbance. **Environmental Research Letters**, v. 12, n. 10, p. 104004, 2017.

SOS MATA ATLÂNTICA. Evento na COP15 apresenta Mata Atlântica como um dos 10 territórios mais promissores para a restauração no planeta. Notícias, 14 dez. 2022. Disponível em: <https://www.sosma.org.br/noticias/evento-na-cop15-apresenta-mata-atlantica-como-um-dos-10-territorios-mais-promissores-para-a-restauracao-no-planeta/>. Acesso em: 4 abril. 2025.

GANN, George D. et al. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. **Restoration Ecology**, v. 27, n. S1, p. S1–S46, 2019.

GLIESSMAN, Steve. Defining agroecology. **Agroecology and Sustainable Food Systems**, v. 42, n. 6, p. 599-600, 2018.

GLIESSMAN, Steve. Transforming food systems with agroecology. **Agroecology and sustainable food systems**, v. 40, n. 3, p. 187-189, 2016.

GOU, Xiaomei et al. Leguminous plants significantly increase soil nitrogen cycling across global climates and ecosystem types. **Global Change Biology**, v. 29, n. 14, p. 4028–4043, 2023.

GUIMARÃES, TP et al. Sequestro de carbono em sistemas silvipastoris de regeneração natural da agricultura familiar, São Domingos do Araguaia-PA. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v. 4, n. 3, p. 4721–4728, 2021.

HART, Simon P. How does facilitation influence the outcome of species interactions? **Journal of Ecology**, v. 111, n. 10, p. 2094–2104, 2023.

HECK, Ana Claudia et al. Ecological Rehabilitation Through Agroecological Applied Nucleation: Ant Richness and Diversity in Silvopastoral System with Nuclei. Available at SSRN 4593555, 2023.

HLPE. Agroecological and other innovative approaches A report by The High Level Panel of Experts on Food Security and Nutrition of the Committee on World Food Security, Rome. 2019.

HOLMES, Marion A.; KUEBBING, Sara E. Species-specific facilitation shapes primary successional communities under nurse trees in an abandoned slag dump. **Urban Ecosystems**, v. 25, n. 5, p. 1445–1453, 2022.

HOU, Mengyang et al. Does large-scale ecological restoration threaten food security in China? A moderated mediation model. **Ecological Indicators**, v. 143, p. 109372, 2022.

IPCC. Climate Change 2021 – The Physical Science Basis: Cambridge University Press, 2021.

_____. Global warming of 1.5°C: An IPCC Special Report. Ipcc - Sr15, v. 2, n. October, 2018.

_____. Good Practice Guidance for Land Use, Land-Use Change and Forestry. Institute ed. Kanagawa: Institute for Global Environmental Strategies, 2003.

JHARIYA, M. K. et al. Leguminous Trees an Innovative Tool for Soil Sustainability. Legumes for Soil **Health and Sustainable Management**. Singapore: Springer. p. 315–345, 2018.

JIMÉNEZ RUIZ, Edwin Rolando; FONSECA GONZÁLEZ, William; PAZMIÑO PESANTEZ, Leticia. Sistemas Silvopastoriles y Cambio climático: Estimación y predicción de Biomasa Arbórea. **La Granja**, v. 29, n. 1, p. 44–55, 2019.

KAMUSINGIZE, Daphine et al. Allometric relationships and carbon content for biomass-carbon estimation of East African Highland Bananas (*Musa* spp. AAA-EAHB) cv. Kibuzi, Nakitembe, Enyeru and Nakinyika. **African Journal of Agricultural Research**, v. 13, n. 36, p. 1865–1873, 2018.

KESUMA, A. et al. Efficiency of urea and land fertilizer in increasing the results of “double row” maize in pump sari plant patterns with soil bean. **Journal of Applied Agricultural Research**, v. 18, p. 153- 158., 2020.

KINNEEN, Lois et al. Silvopastoral systems benefit invertebrate biodiversity on tropical livestock farms in Caquetá, Colombia. **Agricultural and Forest Entomology**, v. 26, n. 1, p. 126–134, 2024.

KOTHARI, Shan; MONTGOMERY, Rebecca A.; CAVENDER-BARES, Jeannine. Physiological responses to light explain competition and facilitation in a tree diversity experiment. **Journal of Ecology**, v. 109, n. 5, p. 2000–2018, 2021.

LAI, Li et al. Carbon emissions from land-use change and management in China between 1990 and 2010. **Science Advances**, v. 2, n. 11, 2016.

LAVOREL, S. et al. Plant functional classifications: from general groups to specific groups based on response to disturbance. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 12, n. 12, p. 474–478, 1997.

LAVOREL, S.; GARNIER, E. Predicting changes in community composition and ecosystem functioning from plant traits: revisiting the Holy Grail. **Functional Ecology**, v. 16, n. 5, p. 545–556, 2002.

LIANCOURT, Pierre; DOLEZAL, Jiri. Community-scale effects and strain: Facilitation beyond conspicuous patterns. **Journal of Ecology**, v. 109, n. 1, p. 19–25, 2021.

LIM, Hyo-In; et al. Effects of Windbreak Fences Composed of Natural Vegetation on Dwarf Siberian Pine (*Pinus pumila*) Seedlings. **Journal of the Korean Society of Environmental Restoration Technology**, v. 23, n. 4, p. 59–67, 2020.

DE LIMA FILHO, Oscar Fontão. Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática. 2014.

LIU, Huaqing et al. Intercropping increases plant water availability and water use efficiency: A synthesis. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 379, p. 109360, 2025.

LÓPEZ-HERNÁNDEZ, Juan Carlos et al. Carbon storage and sequestration rates in *Leucaena leucocephala*-based silvopasture in Southern Mexico. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 5, p. 1105–1121. 2024.

LÓPEZ-SANTIAGO, José G. et al. Carbon storage in a silvopastoral system compared to that in a deciduous dry forest in Michoacán, Mexico. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 1, p. 199–211, 2019.

LYYTIMÄKI, Jari et al. Progress and Prospects of Ecosystem Disservices: An Updated Literature Review. **Sustainability**, v. 14, n. 16, p. 10396. 2022.

MACHADO, Thiago Mombach Pinheiro et al. Microclimate and the thermal comfort during the implementation of silvopastoral systems: the windbreak countereffect. **International Journal of Biometeorology**, 2024.

MALHI, Gurdeep Singh; KAUR, Manpreet; KAUSHIK, Prashant. Impact of Climate Change on Agriculture and Its Mitigation Strategies: A Review. **Sustainability**, v. 13, n. 3, p. 1318, 2021.

MALHI, Yadvinder et al. Tropical Forests in the Anthropocene. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 39, n. 1, p. 125–159, 2014.

MAPBIOMAS. A evolução da pastagem nos últimos 36 anos. Disponível em: https://mapbiomas-br-site.s3.amazonaws.com/Fact_Sheet_PASTAGEM.pdf. Acesso em: 3 abr. 2023a.

MAZUMDER, Sabiha Yeasmin et al. Variation in biomass and soil carbon storage and sequestration rates in different agroforestry systems with climatic zones and soil types. **Environmental and Sustainability Indicators**, v. 26, n. p. 100642, 2025.

MCGRODDY, Megan E. et al. Carbon Stocks in Silvopastoral Systems: A Study from Four Communities in Southeastern Ecuador. **Biotropica**, v. 47, n. 4, p. 407–415, 2015.

MEA. Ecosystems and Human Well-being. 1: Island Press. v. 5, 2005.

MORAIS, Joicy Martins; CIANCIARUSO, Marcus Vinicius. Plant functional groups: scientometric analysis focused on removal experiments. **Acta Botanica Brasilica**, v. 28, n. 4, p. 502–511, 2014.

MORRISON, Thomas A. et al. Grass competition overwhelms effects of herbivores and precipitation on early tree establishment in Serengeti. **Journal of Ecology**, v. 107, n. 1, p. 216–228, 2019.

MUNFORD, Kimber E. et al. Native plants facilitate vegetation succession on amended and unamended mine tailings. **International Journal of Phytoremediation**, v. 24, n. 9, p. 963–974, 2022.

MUREITHI, J. G.; TAYLER, R. S.; THORPE, W. Productivity of alley farming with leucaena (*Leucaena leucocephala* Lam. de Wit) and Napier grass (*Pennisetum purpureum* K. Schum) in coastal lowland Kenya. **Agroforestry Systems**, v. 31, n. 1, p. 59–78, 1995.

MURTY, Danuse et al. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? a review of the literature. **Global Change Biology**, v. 8, n. 2, p. 105–123, 2002.

MYERS, Norman et al. Biodiversity hotspots for conservation priorities. **Nature**, v. 403, n. 6772, p. 853–858, 2000.

NASA. Extreme Weather - NASA Science. Disponível em: <<https://science.nasa.gov/climate-change/extreme-weather/>>. Acesso em: 28 maio 2025.

NCEI. Monthly Climate Reports | Global Climate Report | Annual 2024. . Boulder, Colorado: 2025. Disponível em: <<https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/monthly-report/global/202413>>. Acesso em: 4 jun. 2025.

NEWTON, Adrian C. et al. Ecological restoration of agricultural land can improve its contribution to economic development. **PLOS ONE**, v. 16, n. 3, p. 0247850, 2021.

NOAA. Trends in Atmospheric Carbon Dioxide. Disponível em: <<https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>>. Acesso em: 28 maio 2025.

O'BRIEN, Michael J. et al. Facilitation mediates species presence beyond their environmental optimum. **Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics**, v. 38, p. 24–30, 2019.

ODUM, E P. Fundamentos de Ecologia. **Journal of Anthropological Archaeology**, 2007

ONU. 17 objetivos para transformar o nosso mundo. Disponível em: <<https://www.un.org/en/climatechange/17-goals-to-transform-our-world>>. Acesso em: 15 nov. 2024a.

_____. A Década das Nações Unidas da Restauração de Ecossistemas. Disponível em: <<https://www.decadeonrestoration.org/pt-br/sobre-decada-da-onu>>.

_____. Causas e Efeitos das Mudanças Climáticas. Disponível em: <[https://www.un.org/pt/climatechange/science/causes-effects-climate-change#:~:text=As mudanças climáticas afetam a,aumentando a vulnerabilidade dos ecossistemas.>](https://www.un.org/pt/climatechange/science/causes-effects-climate-change#:~:text=As%20mudanças%20climáticas%20afetam%20a,aumentando%20a%20vulnerabilidade%20dos%20ecossistemas.>)>.

OREFICE, Joseph et al. Forage productivity and profitability in newly-established open pasture, silvopasture, and thinned forest production systems. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 1, p. 51–65, 2019.

ORTIZ, Andrea et al. A review of the interactions between biodiversity, agriculture, climate change, and international trade: research and policy priorities. **One Earth**. Cell Press. 2021

PAGIOLA, Stefano et al. Paying for the environmental services of silvopastoral practices in Nicaragua. **Ecological Economics**, v. 64, n. 2, p. 374–385. 2007.

PARRA, Amanda Silva; RAMIREZ, Dayra Yisel García; MARTÍNEZ, Edgar Alejo. Silvopastoral Systems Ecological Strategy for Decreases C Footprint in Livestock Systems of Piedmont (Meta), Colombia. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v. 66, p. 1–13, 2023.

PARROTTA, John A. The role of plantation forests in rehabilitating degraded tropical ecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 41, n. 2, p. 115–133, 1992.

PENDRILL, Florence et al. Agricultural and forestry trade drives large share of tropical deforestation emissions. **Global Environmental Change**, v. 56, p. 1–10, 2019.

PERI, Pablo L. et al. Carbon Sequestration in Temperate Silvopastoral Systems, Argentina. Springer, p. 453–478. 2017.

POORTER, L et al. Diversity enhances carbon storage in tropical forests. **Global Ecology and Biogeography**, v. 24, n. 11, p. 1314–1328, 2015.

PORFÍRIO, V. Sistema Silvopastoril e seus Benefícios para a Sustentabilidade da Pecuária. Embrapa, Minas Gerais, 2004.

PORFÍRIO, Vanderley. Silvopastoral system for wood production: opportunities and challenges in tropical and subtropical environments. **Agroforestry Systems**, v. 98, n. 7, p. 2325–2335, 2024.

R MATOS, Fabio A et al. Secondary forest fragments offer important carbon and biodiversity cobenefits. **Global Change Biology**, v. 26, n. 2, p. 509–522, 2020.

REICH, Peter B. et al. Impacts of biodiversity loss escalate through time as redundancy fades. **Science**, v. 336, n. 6081, p. 589–592, 2012.

REIS, Ademir; KAGEYAMA, Paulo Yoshio. Restauração de áreas degradadas utilizando interações interespecíficas. Botucatu: Fundação de Estudo e Pesquisas Agrícolas e Florestais, 2003.

RICHARDSON, Katherine et al. Earth beyond six of nine planetary boundaries. **Science Advances**, v. 9, n. 37, p. 1–16, 2023.

ROCKSTRÖM, Johan et al. Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. **Ecology and Society**, v. 14, n. 2, 2009.

RODRIGUES, Ricardo R. et al. On the restoration of high diversity forests: 30 years of experience in the Brazilian Atlantic Forest. **Biological Conservation**, v. 142, n. 6, p. 1242–1251. 2009.

ROSENZWEIG, Cynthia et al. Climate change responses benefit from a global food system approach. **Nature Food**, v. 1, n. 2, p. 94–97, 2020.

SALES LUCAS, Diego et al. Evidence of facilitation between early-successional tree species and the regenerating plant community in a tropical seasonally dry environment. **Austral Ecology**, v. 47, n. 3, p. 541–556, 2022.

SANTOS, Diego. Complementaridade de nichos e multifuncionalidade de sistemas agroflorestais sucessionais. 2020.

SANTOS, Robério Ferreira dos. Análise crítica da interpretação neoclássica do processo de modernização da agricultura brasileira. **Brazilian Journal of Political Economy**, v. 8, n. 3, p. 465-483, 1988.

SCHMITT, Abdon et al. Integrating agroecology with payments for ecosystem services in Santa Catarina's Atlantic Forest. In: *Governing the Provision of Ecosystem Services*. Dordrecht: Springer Netherlands, p. 333-355. 2013.

SCHMITT FILHO, A. L. et al. Nucleation theory inspiring the design of High Biodiversity Silvopastoral System in the Atlantic Forest Biome: ecological restoration, family farm livelihood and agroecology. In: *World Conference on Ecological Restoration*. Foz do Iguaçu. p. 450. 2017.

SCHMITT FILHO, Abdon; FARLEY, Joshua. Transdisciplinary Case Study Approaches to the Ecological Restoration of Rainforest Ecosystems. **Ecological Economic and Socio Ecological Strategies for Forest Conservation**. Cham: Springer International Publishing. p. 185–212. , 2020

SCHMITT FILHO, Abdon L et al. Applied nucleation under high biodiversity silvopastoral system as an adaptive strategy against microclimate extremes in pasture areas. **International Journal of Biometeorology**, v. 67, p. 1199–1212, 2023.

SEOANE, Carlos Eduardo Sícoli et al. Restauração ecológica em sistemas agroflorestais sucessionais do Vale do Ribeira, São Paulo. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 43, 30 abr. 2023.

SER. Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. The SER International Primer on Ecological Restoration, v. 2, n. 2, p. 206–207, 2004.

SILVA, ANDRÉ DE ALMEIDA; DINÂMICA. Dinâmica do carbono e nitrogênio no sistema silvipastoril com núcleos: a pecuária de baixo carbono mitigando os impactos da produção convencional. 2020.

SILVA, Maria et al. A relevância da matéria orgânica para a manutenção da qualidade solo. **Tópicos em recuperação de áreas degradadas** Vol. 3. Canoas, RS, Brazil: Mérida Publishers, 2022.

SIMIONI, Gisele Francioli et al. Response of birds to high biodiversity silvopastoral systems: Integrating food production and biodiversity conservation through applied nucleation in southern Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 324, p. 107709. 2022.

SINGH, Ashutosh Kumar et al. Biological indicators affected by land use change, soil resource availability and seasonality in dry tropics. **Ecological Indicators**, v. 115, p. 106369, 2020.

SNAPP, Sieglinde et al. Agroecology and climate change rapid evidence review: Performance of agroecological approaches in low-and middle-income countries. 2021.

SOLECKI, William; ROBERTS, Debra; SETO, Karen C. Strategies to improve the impact of the IPCC Special Report on Climate Change and Cities. **Nature Climate Change**, v. 14, n. 7, p. 685–691, 2024.

S.O.S MATA ATLÂNTICA. Relatório Anual 2022. Disponível em: <https://cms.sosma.org.br/wp-content/uploads/2023/05/SOSMARelatorio-Anual-22_dig-pt.pdf>. Acesso em: 3 maio 2023.

SOW, Sumit et al. Sustainable fodder production in South Asia through silvopastoral systems. **Current Science**, v. 126, n. 10, 2024.

STEFFEN, Will et al. The Anthropocene: conceptual and historical perspectives. **Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, physical and engineering sciences**, v. 369, n. 1938, p. 842-867, 2011.

TILMAN, D et al. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 108, n. 50, p. 20260–20264, 2011.

TILMAN, David; ISBELL, Forest; COWLES, Jane M. Biodiversity and ecosystem functioning. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 45, n. Volume 45, 2014, p. 471–493, 2014.

UN. Strategy | UN Decade on Restoration. Disponível em: <<https://www.decadeonrestoration.org/pt-br/estrategia>>. Acesso em: 29 maio 2025.

UNIVERSITY OF MINNESOTA. Selecting Trees & Shrubs in Windbreaks. Minnesota, USA. Disponível em: <[https://www.google.com/search?q=UM \(University of Minnesota\)%2C 2012%3A Selecting Trees%26 Shrubs in Windbreaks. Minnesota%2C USA.>](https://www.google.com/search?q=UM+(University+of+Minnesota)%2C+2012%3A+Selecting+Trees%26+Shrubs+in+Windbreaks.+Minnesota%2C+USA.>)>. Acesso em: 23 jul. 2024.

VALENZUELA, Fabiola G. et al. Silvopastoral systems improve carbon stocks at livestock ranches in Tabasco, Mexico. **Soil Use and Management**, v. 38, n. 2, p. 1237–1249. 2022.

VIOLLE, Cyrille et al. Let the concept of trait be functional! **Oikos**, v. 116, n. 5, p. 882–892, 2007.

WANG, Wei et al. Plant facilitation improves carbon production efficiency while reducing nitrogen input in semiarid agroecosystem. **CATENA**, v. 230, p. 107247, 2023.

WATERS, Colin N.; TURNER, Simon D. Defining the onset of the Anthropocene. **Science**, v. 378, n. 6621, p. 706–708, 2022.

WEN, Chenjie et al. Effects of flooding stress on the growth and photosynthetic characteristics of napier grass (*Pennisetum purpureum* Schum. Guimu-1). 2 ago. 2024. (PREPRINT)

WENINGER, T. et al. Ecosystem services of tree windbreaks in rural landscapes—a systematic review. **Environmental Research Letters**, v. 16, n. 10, p. 103002, 2021.

WRIGHT, Alexandra J. et al. Biodiversity and ecosystem functioning: Have our experiments and indices been underestimating the role of facilitation? **Journal of Ecology**, v. 109, n. 5, p. 1962–1968, 2021.

XU, Xiangtao; MEDVIGY, David; RODRIGUEZ-ITURBE, Ignacio. Relation between rainfall intensity and savanna tree abundance explained by water use strategies. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 112, n. 42, p. 12992–12996, 2015.

YOUKHANA, Adel H. et al. Allometric models for predicting aboveground biomass and carbon stock of tropical perennial C4 grasses in Hawaii. **Frontiers in Plant Science**, v. 8, 2017.

ZHENG, Liting et al. Effects of plant diversity on productivity strengthen over time due to trait-dependent shifts in species overyielding. **Nature Communications**, v. 15, n. 1, p. 1–14, 2024.

ZIN BATTISTI, Luiz Fernando et al. Soil chemical attributes in a high biodiversity silvopastoral system. **Acta Agronómica**, v. 67, n. 4, p. 486–493, 2018.

MATERIAIS COMPLEMENTARES

CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

FONTE DE FINANCIAMENTO:

Esta pesquisa foi financiada pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) por meio do "Projeto Sinergias entre Serviços Ecosistêmicos e Agroecologia na Mata Atlântica (PVE/CNPq 71/2013)", no âmbito da cooperação internacional entre o Laboratório de Sistemas Silvopastoris e Restauração Ecológica (LASSre/UFSC) do Programa de Pós-Graduação em Agroecossistemas da Universidade Federal de Santa Catarina (PPGA/UFSC), o Gund Institute for the Environment da Universidade de Vermont (GUND IE/UVM EUA) e o Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo (IEE/USP). Esta pesquisa também foi financiada pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), por meio do Programa de Excelência Acadêmica (PROEX), Brasil. A bolsa de doutorado de Luiz Fernando Zin Battisti contou com apoio financeiro da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Programa de demanda social – DS, processo nº 88882.438842/2019-01).

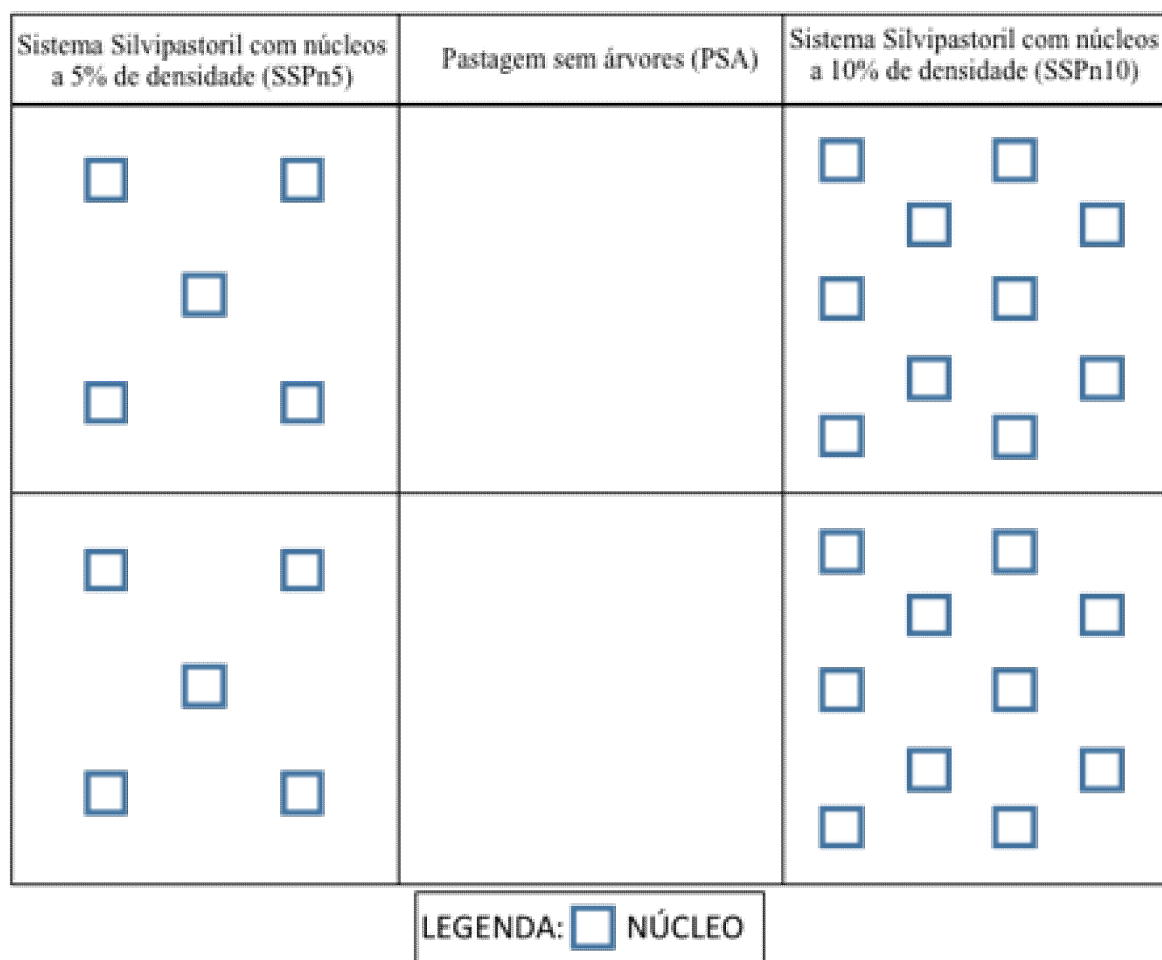


Figura 25 Representação de um bloco, que contém 3 piquetes e 3 tratamentos, PSA, SSPn5 e SSPn10.

Tabela 1 Resultados dos testes de Kruskal-Wallis para variáveis estruturais e produtivas do sistema silvipastoril com núcleos ao longo de quatro anos de monitoramento

Variável	Chi-quadrado	Graus de liberdade	p-value
Número de leguminosas	122.45	3	< 0.001
Biomassa árvores	213.55	3	< 0.001
Biomassa bananeiras	49.518	3	< 0.001
Biomassa capim-elefante	105,67	3	< 0.001
Carbono árvores	213,55	3	< 0.001
Carbono Bananeiras	213.55	3	< 0.001
Carbono capim-elefante	105,67	3	< 0.001
Número de árvores	17,635	3	< 0.001
Riqueza árvores	47,512	3	< 0.001
Número de leguminosas	122.45	3	< 0.001
Riqueza de leguminosas	124,86	3	< 0.001
Área de capim elefante	96.598	3	< 0.001
Área basal das árvores	220,45	3	< 0.001

Tabela 2 Resultados dos modelos lineares ajustados para avaliar os efeitos da biomassa de capim-elefante e do número de leguminosas sobre a biomassa e o carbono de árvores e bananeiras.

Modelo	Coeficientes	Estimativa	Erro padrão	t-value	p-value	R ²
Biomassa árvores ~ Biomassa capim- elefante	Intercept	80,552	5,999	13,427	<0,001	0,12
	Biomassa capim- elefante	-3379,31	900,59	-3,752		
Biomassa bananeiras ~ Biomassa capim- elefante	Intercept	1,9359	0,1919	10,087	<0,001	0,10
	Biomassa capim- elefante	-98,5016	28,812	-3,419		
Biomassa árvores ~ número de leguminosas	Intercept	77.319	7.977	9.692	0,062	0,02
	Número de leguminosas	-2.260	1.199	-1.886		
Biomassa bananeiras ~ Número de leguminosas	Intercept	1.88165	0.2520	7.464	0,056	0,02
	Número leguminosas	-0.07322	0.0378	-1.933		
Carbono árvores ~ Biomassa capim- elefante	Intercept	40.28	3.00	13.427	<0,001	0,12
	Biomassa capim- elefante	-1689.65	450.30	-3.75		
Carbono bananeiras ~ Biomassa capim- elefante	Intercept	0.93310	0.0925	10.087	<0,001	0,10
	Biomassa capim- elefante	-47.4777	13.887	-3.419		