

**SISTEMAS AGROFLORESTAIS PARA MANUTENÇÃO
DA INTEGRIDADE ECOLÓGICA DE FLORESTAS NA
AMAZÔNIA ORIENTAL**

HENRIQUE RODRIGUES MARQUES

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

BRASÍLIA / DF: NOVEMBRO DE 2024

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA – UnB**

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

**SISTEMAS AGROFLORESTAIS PARA MANUTENÇÃO
DA INTEGRIDADE ECOLÓGICA DE FLORESTAS NA
AMAZÔNIA ORIENTAL**

HENRIQUE RODRIGUES MARQUES

**ORIENTADOR: PROF. DR. DANIEL LUIS MASCIA VIEIRA
DISSERTAÇÃO MESTRADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS**

BRASÍLIA / DF: NOVEMBRO DE 2024

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**“SISTEMAS AGROFLORESTAIS PARA MANUTENÇÃO DA
INTEGRIDADE ECOLÓGICA DE FLORESTAS NA AMAZÔNIA
ORIENTAL”**

HENRIQUE RODRIGUES MARQUES

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.

APROVADA POR:

Prof. Dr. pesquisador DANIEL LUIS MASCIA VIEIRA – Embrapa CENARGEN/UnB
(ORIENTADOR)

Prof. PhD. JOSÉ ROBERTO RODRIGUES PINTO – UnB/FT-EFL
(EXAMINADOR INTERNO)

Profa. Dra. Pesquisadora JOICE NUNES FERREIRA – Embrapa Amazônia
Oriental/UFPA
(EXAMINADOR EXTERNO)

Prof. Dr. Pesquisador STEEL SILVA VASCONCELOS – Embrapa
Florestas/UFPA/MPEG
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA/DF, 25 de NOVEMBRO de 2024.

FICHA CATALOGRÁFICA

MARQUES, HENRIQUE RODRIGUES

Sistemas Agroflorestais para manutenção da Integridade Ecológica de florestas na Amazônia Oriental. 54 p., 297 mm (ENC/FT/UnB, Mestre, Ciências Florestais, 2024)
Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Florestal

- | | |
|----------------------------|----------------------------|
| 1. Sistemas Agroflorestais | 2. Restauração Ecológica |
| 3. Amazônia | 4. Serviços Ecossistêmicos |
| I. ENC/FT/UnB | II. CIFOR-ICRAF |

REFERÊNCIA

MARQUES, H. R. (2024). Sistemas Agroflorestais para manutenção da Integridade Ecológica de florestas na Amazônia Oriental. Dissertação de Mestrado, Publicação G.DM-001A/90, Programa de Pós-graduação em Ciências Florestais, Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 54 p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Henrique Rodrigues Marques

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO: Sistemas Agroflorestais para manutenção da Integridade Ecológica de Florestas na Amazônia Oriental GRAU / ANO: Mestre / 2024

É concedida à Universidade de Brasília a permissão para reproduzir a dissertação de mestrado e para emprestar ou vender somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem a autorização por escrito do autor.

Henrique Rodrigues Marques

Endereço: Núcleo Rural Euler Paranhos, rua Ant. João, chácara 31, região dos lagos,
Sobradinho
Brasília/DF – Brasil

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO GERAL	10
1.1	QUESTÕES DE PESQUISA	15
1.2	OBJETIVO.....	15
1.2.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
1.3	HIPÓTESES.....	15
1.4	REFERENCIAL TEÓRICO	16
1.4.1	DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA GANHO DE ESCALA NA RESTAURAÇÃO	16
1.4.2	SISTEMAS AGROFLORESTAIS	18
1.4.3	SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS EM SAFS	20
1.4.4	INTEGRIDADE ECOLÓGICA	21
2.	CAPÍTULO 1	23
2.1	RESUMO.....	23
2.2	INTRODUÇÃO	24
2.3	MATERIAIS E MÉTODOS	27
2.3.1	ÁREA DO ESTUDO	27
2.3.2	ANÁLISE DOS DADOS	32
2.4	RESULTADOS	33
2.5	DISCUSSÃO	40
2.6	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	44
3.	REFERÊNCIAS	47

ÍNDICE DE TABELAS E FIGURAS

FIGURAS

- Figura 1. Localização dos SAFs estudados em regiões dos municípios de Tomé-Açu, São Félix do Xingu e Tucumã, na Amazônia Oriental. 27
- Figura 2. Arranjos de SAFs mais comuns adotados pelos agricultores das regiões do NE e SE paraense. SAFSFX: sistemas de São Félix do Xingu, que geralmente incluem cacau, banana, aamandioca, milho e algumas outras frutíferas e espécies florestais de sombreamento; SAFTA: sistemas tradicionais de Tomé-Açu, geralmente com pimenta, arroz, abóbora, maracujá, ccacau ou cupuaçu, açaí, taperebá, andiroba ou frutíferas e espécies florestais..... 31
- Figura 3. Comparativo da evolução temporal dos SAFTA (n=13) região NE e SAFSFX (n = 9) região SE, em relação a integridade ecológica da Regeneração Natural (RN): A) Biomassa acima do solo (AGB) Mg ha⁻¹; B) Área Basal (m² ha⁻¹); C) Riqueza em espécies/100ind.; D) Heterogeneidade estrutural (Gini). Linha de tendência logarítmica dos valores de referência em florestas secundárias em regeneração (REGENERA-AMAZÔNIA, 2023). Diferença não significativa entre SAFTA e SAFSFX, em todos os parâmetros avaliados (p>0,05). 36
- Figura 4. Gráfico 2D resultante do NMDS com a representação visual das relações de similaridade florística entre as 22 áreas de SAFs utilizando o índice de Bray-Curtis, medindo a dissimilaridade entre as áreas com base na composição e abundância das espécies presentes. A idade é representada pelas cores e a região representada pelos símbolos. Triângulo, São Félix do Xingu (SAFSFX); círculo, Tomé-Açu (SAFTA). 38
- Figura 5. Área basal (média ± desvio padrão) das dez espécies mais dominantes amostradas nos SAFSFX na região de São Félix do Xingu (SE) e SAFTA na região de Tomé-Açu (NE). Análise agrupadas por idades, com idades de 0 a 10 anos; de 11 a 20 anos; 21 a 35 anos. 40

TABELAS

- Tabela 2. Principais características dos SAFTA-NE (n=14) e SAFSFX-SE (n=9) relacionados a área basal (AB), idade dos sistemas, número de espécies encontradas (n. spp.), biomassa acima do solo (AGB), número de indivíduos (n. ind.), índice de diversidade de Shannon (H'). 34

AGRADECIMENTOS

O privilégio de uma vida abundante, cercado de uma natureza benevolente, com toda sua forma complexa e singela de ser me traz o sentimento de agradecimento constante. A experiência que nos molda a cada segundo e os desafios que a vida nos traz é o que faz sentido em nossa trajetória. Portanto, meu agradecimento vem em forma de desejar o mesmo à todas as pessoas que fazem parte do meu processo de amadurecimento enquanto ser humano, ser pesquisador e ser profissional.

Agradeço aos meus familiares e antepassados que me inspiram e sempre me trouxeram segurança em minha caminhada, regado de amor que reflete aquilo que busco e que faço. À minha esposa Fabíola Resende e filhos Iasmin Morena e Tainã, que trazem alívio, compreensão e muito carinho, recarregando minhas energias para enfrentar a missão de um futuro digno e sustentável para sociedade.

Aos colegas do trabalho no CIFOR-ICRAF Brasil, que me incentivaram nessa busca e sempre me trouxeram boas reflexões dos caminhos da pesquisa agroflorestal no Brasil, principalmente ao Saulo Souza e Martin Meier por sempre se disporem a colaborar na construção deste trabalho.

Aos colegas bolsistas do núcleo de estudos em Ecologia da Restauração da Embrapa Cenargen, que possibilitaram tantos aprendizados e trocas acadêmicas, além de momentos de descontração e boas risadas, em especial ao Maxmiller Ferreira, Ícaro Abreu e Silvia Rodrigues.

Agradeço muito ao meu amigo, pesquisador e orientador Daniel Vieira, quem me incentiva e me provoca para seguir na pesquisa e ampliar a divulgação do conhecimento agroflorestal. Pela sua capacidade de trazer visões inovadoras e grande contribuição neste trabalho e pela sua paciência em lidar com meus desafios de dedicação ao processo.

Agradeço também a cada técnico/técnica de campo, agricultores e agricultoras e aos colegas que colaboraram na coleta dos dados em campo, nas pesquisas e reflexões durante os projetos e construção de Unidades Demonstrativas em SAFs no CIFOR-ICRAF Brasil. Em especial aos colegas Andrew Miccolis, Maya Terra, Lídia Lacerda, Jimi Amaral, Marcos Lima, Francinete Almeida e Jailson Takamatsu.

E por fim, dedico este trabalho e agradeço aos agricultores e agricultoras familiares e povos e comunidades tradicionais de todo o Brasil, que foram e são os verdadeiros guardiões da natureza, com sua sabedoria, luta por conservação e produção sustentável. Me motivando cada dia mais a se juntar nessa luta e colaborar na missão de lidar com os desafios do desenvolvimento rural sustentável.

"A floresta é um organismo peculiar de bondade e benevolência ilimitadas que não exige seu sustento e estende generosamente os produtos de sua atividade vital; ela oferece proteção a todos os seres, oferecendo sombra até mesmo ao homem com o machado que a destrói."

Gautama Buddha

RESUMO

A restauração ecológica em larga escala é um imperativo global, especialmente no contexto das metas de recuperação da vegetação nativa no Brasil e no mundo, que visam mitigar os impactos das mudanças climáticas. Os sistemas agroflorestais (SAFs) emergem como uma estratégia promissora para a Amazônia, combinando a produção agrícola com a recuperação de ecossistemas florestais e envolvendo ativamente os agricultores nesse processo. Contudo, é essencial avaliar o desempenho dos SAFs na promoção e manutenção da integridade ecológica (IE) de florestas secundárias, considerando aspectos como composição, estrutura e função em comparação com florestas secundárias de idades equivalentes. Este estudo analisou dois tipos de SAFs: os sistemas agroflorestais de Tomé-Açu (SAFTA), com uma abordagem mais tradicional, e os Sistemas Agroflorestais de São Félix do Xingu (SAFSFX), que tendem a ser mais simplificados. Foram coletados dados de 22 SAFs, com idades variando entre 4 e 35 anos, e os indicadores avaliados incluíram diversidade de espécies arbóreas, heterogeneidade estrutural (índice de Gini), área basal e biomassa aérea. Os resultados indicaram que os SAFTA apresentam melhor desempenho em termos de composição de espécies em comparação aos SAFSFX, com ambos os sistemas demonstrando valores de IE similares aos de florestas secundárias íntegras. SAFs com idade ≥ 20 anos apresentam área basal média de $20,3 \text{ m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$ e biomassa aérea de $116,3 \text{ ton} \cdot \text{ha}^{-1}$, porém baixa riqueza de espécies (2 a 7 por 100 ind.) e a predominância de espécies comerciais como *Theobroma cacao* e *Euterpe oleracea* evidenciam a necessidade de diversificação. Assim, projetos de restauração em larga escala devem integrar práticas que favoreçam a biodiversidade, promovendo uma agricultura regenerativa que beneficie tanto a diversidade ecológica quanto os modos de vida dos agricultores familiares.

Palavras-chave: SAF, restauração ecológica, serviços ecossistêmicos, integridade ecológica, ganho de escala

ABSTRACT

Large-scale ecological restoration is a global imperative, especially in the context of targets for recovering native vegetation in Brazil and worldwide, aimed at mitigating the impacts of climate change. Agroforestry systems (AFSs) emerge as a promising strategy for the Amazon, combining agricultural production with the recovery of forest ecosystems and actively involving farmers in the process. However, it is essential to evaluate the performance of AFSs in promoting and maintaining ecological integrity (EI) of secondary forests, considering aspects such as composition, structure, and function in comparison to secondary forests of equivalent ages. This study analyzed two types of AFSs: the agroforestry systems of Tomé-Açu (SAFTA), which have a more traditional approach, and the agroforestry systems of São Félix do Xingu (SAFSFX), which tend to be more simplified. Data were collected from 22 AFSs, with ages ranging from 4 to 35 years, and the indicators assessed included tree species diversity, structural heterogeneity (Gini index), basal area, and aboveground biomass. The results indicated that SAFTA exhibited better performance in terms of species composition compared to SAFSFX, with both systems demonstrating EI values similar to those of integer secondary forests. AFSs ≥ 20 years old showed an average basal area of $20.3 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$ and aboveground biomass of $116.3 \text{ ton}.\text{ha}^{-1}$, however the low species richness (2 to 7 per 100 individuals) and the predominance of commercial species such as *Theobroma cacao* and *Euterpe oleracea* highlight the need for diversification. Therefore, large-scale restoration projects should integrate practices that favor biodiversity, promoting regenerative agriculture that benefits both ecosystems and the livelihoods of family farmers.

Keywords: Agroforestry Systems, Ecological Restoration, Ecosystem Services, Ecological Integrity, Scaling Up

1. INTRODUÇÃO GERAL

Em 2020 a ONU declarou a década da Restauração de Ecossistemas (UNEP; FAO, 2020) com principal objetivo incentivar os países ampliarem esforços na recuperação dos ecossistemas. As ações de restauração de ecossistemas podem contribuir para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) (ONU, 2015), sobretudo objetivos relacionados às mudanças climáticas, erradicação da pobreza, segurança alimentar, segurança hídrica e conservação da biodiversidade. O último relatório do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 2023), aponta os cenários críticos do aquecimento global para as próximas décadas e sugere, dentre as múltiplas soluções baseadas na natureza para mitigação, a restauração de ecossistemas, florestamentos e reflorestamentos, indicando que estas soluções têm um potencial de sequestro de carbono de aproximadamente $3\text{GtCO}_2\text{-eq.ano}^{-1}$.

Neste contexto, é essencial que as ações de restauração sejam um conjunto de estratégias em escala da paisagem (MANSOURIAN; VALLAURI; DUDLEY, 2005), que levem em conta a matriz de uso e ocupação do solo e seus agroecossistemas (KAZEMI; KLUG; KAMKAR, 2018; KREMEN; MERENLENDER, 2018; VAN NOORDWIJK; SUNDERLAND, 2014), e consigam se conectar aos diferentes objetivos da restauração, tal como preconizado nos princípios da Sociedade para a Restauração Ecológica (SER) (GANN et al., 2019). Que além de considerar a restauração da integridade ecológica das áreas (ROSENFELD et al., 2022), precisam incluir também os aspectos sociais e outros serviços ecossistêmicos (ALBA-PATÍÑO et al., 2021; MAZÓN et al., 2019). Isso significa conjugar técnicas que vão desde a restauração passiva, p. ex. regeneração natural (SHONO et al., 2020), como restauração ativa, assim como os Sistemas Agroflorestais (SAFs) (DAGAR; GUPTA; TEKETAY, 2020; MICCOLIS et al., 2019).

A avaliação do contexto é um componente essencial na tomada de decisão para a restauração de paisagens e ecossistemas, exigindo uma compreensão aprofundada tanto do ecossistema em questão quanto das condições socioeconômicas locais. Parâmetros biofísicos e de uso do solo, fornecem dados críticos sobre as espécies, padrões climáticos, qualidade do solo e outros fatores bióticos e abióticos, fundamentais para determinar o sucesso da restauração (GANN et al., 2019; PACTO, 2009).

A regeneração natural, como método passivo, pode ser altamente eficaz em áreas onde o solo ainda possui banco de sementes nativas em quantidade e qualidade, onde as condições ambientais são favoráveis ao crescimento dessas espécies (CHAZDON; GUARIGUATA, 2016). Por outro lado, as condições socioeconômicas e de uso do solo locais desempenham papel vital na escolha dos métodos de restauração. Em regiões onde a agricultura é o principal meio de vida de agricultores, os SAFs podem ser apropriados, pois combinando árvores e processos de restauração

conjugados com as culturas ou pastagens oferecem benefícios econômicos imediatos para as comunidades locais, enquanto contribuem para a restauração ecológica a longo prazo (MCNEELY; SCHROTH, 2006). Abordagens conjugadas são fundamentais para criar incentivos econômicos que garantam a participação e o apoio das comunidades locais, o que é crucial para o sucesso e a sustentabilidade dos projetos de restauração. Observar os fatores contextuais para orientar as opções (métodos) adequados para cada contexto é crucial para a tomada de decisão. O que significa não reproduzir recomendações únicas como solução em escala, mas sim uma heterogeneidade de maneiras que proporcionem uma base sólida para maior adoção de estratégias de restauração produtiva, que são ecologicamente viáveis e socialmente aceitáveis (SINCLAIR; COE, 2019).

Para que se tenha êxito, a restauração ecológica deve ser efetiva, eficiente e participativa, envolvendo as pessoas no processo de estabelecimento das áreas, seja nos aspectos econômicos, ecológicos e no bem-estar social (GANN et al., 2019). Ainda mais quando considerados os desafios de conciliar a produção com a restauração ecológica em propriedades rurais no país.

Estima-se que o tamanho do passivo em Áreas de Reserva Legal (RL) e Preservação Permanente (APP) no Brasil é em torno de 20 milhões de hectares (CSR/UFGM, 2023; SOARES-FILHO et al., 2014). Neste sentido, os SAFs, quando diversificados e bem manejados, são excelentes oportunidades de aliar a conservação com a produção e podem contribuir para ampliar as estratégias de restauração ecológica frente aos desafios de implementação da legislação florestal (MICCOLIS et al., 2019).

No entanto, é essencial compreender se os SAFs que estão sendo adotados em diferentes contextos conseguem contribuir para restauração da integridade ecológica (ROSENFELD et al., 2022), e no sentido mais amplo, se contribuem também para alcançar os objetivos sociais em termos dos serviços ecossistêmicos (JOSE, 2012; VAN NOORDWIJK, 2021). Isso significa avaliar se tais sistemas estão conseguindo contribuir tanto no ganho de biodiversidade, biomassa, provisão de recursos, dentre outros serviços ecossistêmicos.

Existem diversas opções de SAFs adotados na Amazônia brasileira, em arranjos que variam em estrutura e diversidade, desde os mais simples até os mais complexos (BRIENZA JÚNIOR et al., 2010). A depender dos seus objetivos, os diferentes tipos de SAFs, podem apresentar um gradiente em termos de serviços ecossistêmicos gerados. Alguns, com maior desempenho e benefícios diretos voltados a prestação de serviços de provisão e aspectos socioeconômicos e culturais (CAMPOS et al., 2022; HOMMA, 2004; PEREIRA NETO, 2012), e outros que apresentam melhor desempenho em termos de serviços de provisão e regulação, tais como SAFs mais diversificados (QUARESMA et al., 2015; SANTOS; KATO; TOURINHO, 2019).

Inúmeros estudos mostram o potencial dos SAFs para geração de serviços ecossistêmicos, seja na sua capacidade de sequestrar carbono da atmosfera e armazená-lo na biomassa e no solo, variando entre 30 a 70 Mg C ha⁻¹ (CELENTANO et al., 2020; JOSE, 2009; NAIR, 2012; RAMOS et al., 2018). Contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas (NAIR, 2012). Na capacidade de retenção de água e fluxo hidrológico (ANDERSON et al., 2009). Ou mesmo para provisão de alimentos, fibras e outros produtos que possam ser consumidos ou comercializados (GARRITY, 2006; MICCOLIS et al., 2019). Além disso, esses sistemas podem ajudar a restaurar a biodiversidade e a integridade ecológica de ecossistemas nativos, fornecendo habitat e recursos para uma ampla gama de espécies (JOSE, 2009, 2012; MILLER; NAIR, 2006; MORTIMER; SAJ; DAVID, 2018).

Devido a este potencial os SAFs tornam-se uma das melhores estratégias de soluções baseadas na natureza, que consegue unir a restauração com a produção agrícola, o que atrai agricultores para regularização ambiental, ao mesmo tempo que promove a geração de renda (PORRO, 2009; PORRO et al., 2012; REY BENAYAS; BULLOCK, 2012).

No entanto, este potencial pode ser limitado em alguns tipos de sistemas, especialmente aqueles que otimizam processos com um viés econômico acentuado. SAFs de cacau da região do sudeste paraense, em São Félix do Xingu, aqui intitulado de SAFSFX e os sistemas da região de Tomé-Açu no nordeste paraense, comumente conhecidos como SAFTA, podem ser considerados exemplos de SAFs adotados em larga escala, que muitas vezes são incentivados e apoiados por instituições privadas e governamentais, com objetivo de contribuir tanto para geração de renda como para ganhos em restauração ecológica. Contudo, a depender da configuração dos arranjos de produção e objetivos dos agricultores, estes SAFs podem ser altamente manejados, e passam por tratamentos culturais intensificados, com a utilização de fertilizantes químicos, e até mesmo agrotóxicos, o que limita a regeneração de espécies espontâneas e o desenvolvimento de organismos desejáveis para a saúde do solo e do ecossistema.

Apesar dessas limitações, os SAFs oferecem oportunidades promissoras para ampliação da escala de restauração, o que tem atraído um número crescente de projetos, especialmente aqueles voltados à compensação e comercialização de créditos de carbono na Amazônia (AGFEED, 2023; HOUGHTON, 2020; MICROSOFT NEWS, 2023; RESET UOL, 2023a). Esses projetos buscam escalar a restauração incentivando modelos de SAFs já consolidados nessas regiões, mas é crucial que considerem os desafios de incentivar sistemas que auxiliem também no provisionamento de outros serviços ecossistêmicos, para além do carbono estocado e retornos econômicos aos agricultores e empresas (FERREIRA et al., 2018).

Ganhar escala na restauração significa ampliar significativamente o impacto de iniciativas

de restauração ecológica, atingindo áreas maiores e resultados mais abrangentes de forma eficiente. Esse conceito está relacionado à capacidade de replicar e expandir práticas de restauração, indo além de pequenos projetos pilotos e alcançando paisagens inteiras ou regiões de grande extensão.

Para que o ganho de escala seja possível, é necessário otimizar recursos, reduzir custos operacionais e integrar diferentes atores e tecnologias, de forma a garantir que a restauração ocorra em larga escala e com a mesma qualidade ambiental observada em projetos menores. Esse processo envolve não apenas a aplicação de técnicas adequadas, mas também o desenvolvimento de políticas públicas, incentivos econômicos e engajamento social que permitam que essas ações de restauração sejam multiplicadas e sustentadas ao longo do tempo.

Contudo, a efetividade dos SAFs na geração de serviços ecossistêmicos pode variar de acordo com os objetivos e motivações dos agricultores, bem como com os incentivos recebidos e as externalidades envolvidas. Dependendo desses fatores, os SAFs podem seguir trajetórias que favorecem a restauração da integridade florestal ou, em contrapartida, levar à simplificação dos ecossistemas. Isso torna fundamental a avaliação dos trade-offs de cada tipo de sistema agroflorestal.

Em alguns casos, o foco pode estar na expansão em larga escala e em ganhos econômicos, como a estocagem de carbono, o que pode limitar a capacidade de promover a diversidade biológica, a heterogeneidade funcional e a qualidade ecológica do solo. Assim, é necessário equilibrar os benefícios da escala com a manutenção de atributos ecológicos críticos para garantir a restauração plena dos ecossistemas.

É possível que existam estratégias combinadas que consigam atender um meio termo, e alcancem os múltiplos objetivos. Mas para isso, é crucial compreender o desempenho dos SAFs, não só comparando com outros usos do solo, mas também avaliando sua capacidade de retornar o mais próximo da integridade ecológica da floresta. Isso é fundamental para garantir que os SAFs contribuam significativamente para a restauração dos ecossistemas da Amazônia, colaborando para resolução de desafios prementes climáticos e a perda de biodiversidade.

O termo "agrossucessional" se refere à capacidade dos SAFs de servir como ponto de partida para a sucessão ecológica, criando um ambiente que pode evoluir em direção à restauração ecológica de maior qualidade (VIEIRA; HOLL; PENEIREIRO, 2009). Os SAFs não apenas integram práticas agrícolas com a conservação ambiental, mas também podem facilitar a transição de áreas degradadas para ecossistemas mais complexos e resilientes. À medida que as intervenções humanas são reduzidas, os SAFs podem se diversificar naturalmente, promovendo o recrutamento de espécies nativas e contribuindo para o aumento da biodiversidade.

Essa trajetória agrossucessional é crucial, pois possibilita que os SAFs se tornem mais do

que meras alternativas de uso do solo; eles podem se transformar em corredores ecológicos que conectam fragmentos de floresta, promovendo a troca genética entre populações e aumentando a robustez dos ecossistemas locais. Assim, os SAFs têm o potencial de gerar renda aos agricultores, ao mesmo tempo que elevam a integridade ecológica, alinhando objetivos econômicos e ambientais.

É viável que existam estratégias combinadas que atendam a esse meio termo, onde os SAFs não apenas sustentem a produção agrícola, mas também impulsionem processos ecológicos que favoreçam a regeneração de florestas. Para que isso aconteça, é essencial avaliar o desempenho dos SAFs em relação a outros usos do solo e, sobretudo, sua capacidade de se aproximar da integridade ecológica das florestas. Essa avaliação não só contribui para a restauração dos ecossistemas da Amazônia, mas também endereça desafios climáticos e a perda de biodiversidade de maneira mais eficaz.

Portanto, o desenvolvimento e a implementação de práticas de manejo que valorizem a diversidade e a complexidade ecológica nos SAFs são fundamentais. Isso inclui o incentivo a um planejamento participativo que considere as características locais e as necessidades dos agricultores, promovendo um equilíbrio entre a produção econômica e a conservação ambiental.

Neste estudo, avaliou-se, por meio de indicadores ecológicos, a contribuição de dois tipos de sistemas agroflorestais (SAFSFX e SAFTA) comumente adotados em duas regiões da Amazônia paraense, para a manutenção da integridade ecológica (IE) de florestas. A análise compara os atributos ecológicos dos SAFs com os de florestas secundárias, discutindo seu potencial para a restauração. A partir dessa comparação, buscamos entender até que ponto os SAFs podem não apenas recuperar a estrutura e funcionalidade ecológica, mas também se alinhar com práticas de restauração que promovam a resiliência e a sustentabilidade dos ecossistemas amazônicos.

É importante ressaltar que os dados coletados neste estudo integram as pesquisas realizadas no âmbito do projeto Acelerador de Agroflorestas e Restauração (ARA)¹. Esse projeto oferece valiosa oportunidade para avaliar o desempenho de diferentes tipos de SAFs, investigados com vistas à ampliação da escala de restauração. O entendimento de como esses SAFs podem contribuir para a recuperação da integridade ecológica da Amazônia é fundamental para o ganho de escala.

Este estudo não apenas avança o conhecimento científico sobre o potencial dos SAFs para a restauração ecológica, mas também oferece implicações práticas relevantes para a gestão

¹ TNC, 2021 – projeto Acelerador de Agroflorestas e Restauração, financiado pela Amazon.com que pretende impulsionar a restauração da Amazônia com agricultores familiares em iniciativa de retorno de investimento em mercado de carbono. <https://www.tnc.org.br/conecte-se/comunicacao/noticias/tnc-e-amazon-impulsionam-restauracao-na-amazonia/>.

sustentável. Seus resultados podem fornecer subsídios estratégicos para a tomada de decisões em projetos de carbono, assim como em programas locais e governamentais voltados para a restauração produtiva e inclusiva. Além disso, o estudo oferece informações essenciais para a regulamentação de estratégias de SAFs, apoiando o cumprimento da legislação ambiental e promovendo práticas que conciliem a restauração ecológica com o desenvolvimento socioeconômico.

Em síntese, é crucial que projetos de larga escala e políticas públicas levem em conta as limitações de determinados tipos de sistemas agroflorestais, considerando tanto as necessidades locais dos agricultores quanto o retorno da biodiversidade e outros serviços ecossistêmicos. Essa perspectiva assegura uma abordagem integradora e sustentável para a restauração da Amazônia, promovendo a recuperação ecológica em harmonia com o desenvolvimento socioeconômico das comunidades envolvidas.

1.1 QUESTÕES DE PESQUISA

A partir das ideias apresentadas, as seguintes perguntas de pesquisa foram formuladas: Os sistemas agroflorestais adotados em algumas regiões da Amazônia oriental contribuem para a restauração ecológica? Há diferenças regionais entre os sistemas agroflorestais analisados? Como os atributos de integridade ecológica mudam com o tempo em cada uma das regiões?

1.2 OBJETIVO

Este estudo pretende avaliar o desempenho de dois diferentes tipos de sistemas agroflorestais na Amazônia Oriental (SAFTA e SAFSFX) em termos da sua integridade ecológica e seu potencial na recuperação dos serviços ecossistêmicos ao longo do tempo.

1.2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- i. Avaliar o desempenho dos sistemas agroflorestais em diferentes idades (cronosequência) com base em indicadores de integridade ecológica, comparando-os com os valores de referência para a regeneração de florestas secundárias.
- ii. Comparar o desempenho dos SAFs das duas regiões entre si, em termos dos parâmetros avaliados de IE.

1.3 HIPÓTESES

Os sistemas agroflorestais destinados ao ganho de escala contribuem significativamente para a obtenção da integridade ecológica em comparação com florestas secundárias.

Os sistemas agroflorestais apresentam variações entre si, e alguns demonstram um desempenho melhor que outros em termos dos atributos de integridade ecológica.

1.4 REFERENCIAL TEÓRICO

1.4.1 DESAFIOS E OPORTUNIDADES PARA GANHO DE ESCALA NA RESTAURAÇÃO

Em 2011, o governo alemão e a União Internacional para Conservação da Natureza (IUCN) lançaram o desafio de Bonn, iniciativa global que visa restaurar 350 milhões de hectares de terras degradadas e desmatadas até 2030. Países do mundo inteiro vem se somando a esta iniciativa e até o momento, instituições e governos de 74 países aderiram ao desafio, se comprometendo a restaurar 210 milhões de hectares até 2030 (IUCN, 2020). No entanto, ainda faltam detalhamentos de como tamanho desafio será alcançado em tão pouco tempo e como serão executadas na prática.

Estimativas realizadas apontam que o passivo de vegetação nativa a ser recuperado no Brasil pode variar de cerca de 19 a 22 milhões de hectares dentre áreas de proteção permanente (APP) e Reserva Legal (RL) (CSR/UFG, 2023; GUIDOTTI et al., 2016; SOARES-FILHO et al., 2014). Após a aprovação da Lei 12.651/2012 a Lei de Proteção da Vegetação Nativa (LPVN), mais conhecida como o “novo código florestal”, o Brasil iniciou esforços para seu cumprimento envolvendo diversas instituições, entre governos estaduais, agências federais, organizações da sociedade civil, academia e empresas privadas, na busca de promover a escala da restauração no país.

Em 2015, o Governo brasileiro, durante a Conferência de Paris (COP 21), lançou a meta da restauração de 12 milhões de hectares de vegetação nativa até 2030, que foi incorporada no Plano Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa o Planaveg em 2016, e posteriormente, referendada no decreto que institui a Política Nacional de Recuperação da Vegetação Nativa (Proveg), Decreto nº 8.972/2017 (BRASIL, 2017). Para se ter uma noção da dimensão do tamanho desse desafio, o Brasil teria que, a partir desses compromissos globais e nacionais, realizar a recuperação de ao menos 920 mil hectares a cada ano. No estado do Pará, a contribuição para a meta nacional de restauração poderia alcançar até 25% do total estimado em cerca de 3 milhões de hectares (NUNES et al., 2017).

A lei orienta que a restauração poderá utilizar diversas técnicas, seja restauração passiva, como a regeneração natural (SHONO et al., 2020), ou métodos mais ativos, tais como o plantio total de mudas, semeadura e os sistemas agroflorestais (EMBRAPA, 2023; MICCOLIS et al., 2016; PACTO, 2009). No entanto, frequentemente existe uma dicotomia entre os objetivos de restauração para conservação e a restauração voltada para a produção. A primeira abordagem busca restaurar ecossistemas para maximizar a qualidade dos serviços ecossistêmicos, priorizando o retorno das condições ecológicas mais próximas da vegetação nativa original. Essa estratégia,

embora eficaz em termos de qualidade ecológica, muitas vezes ignora a inclusão dos agricultores e suas práticas produtivas. Por outro lado, a restauração orientada para a produção considera formas econômicas diversificadas de uso da terra, promovendo não apenas a geração de renda, mas também a provisão de serviços ecossistêmicos. Essa segunda abordagem é crucial para integrar as necessidades dos agricultores e garantir que seus modos de vida sejam respeitados, ao mesmo tempo que contribui para a restauração ecológica em escala. Portanto, é essencial encontrar um equilíbrio entre essas duas perspectivas para promover uma restauração que seja tanto ecologicamente viável quanto socialmente justa.

Dessa forma, os SAFs se encontram nessa interface e podem aliar a conservação/restauração com a sistemas produtivos, associando o plantio de espécies de interesse econômicos com o retorno das funções ecológica, diversidade de espécies, muitas vezes associadas aos meios de vida dos agricultores, incluindo geração de renda e segurança alimentar (EYASU; TOLERA; NEGASH, 2020; MIRANDA; KATO; PIRES, 2011; QUARESMA et al., 2015). Por outro lado, quanto se almeja de forma prioritária os ganhos econômicos, alguns atributos importantes da restauração ecológica como a biodiversidade, por exemplo, ficam a desejar (BRAGA; DOMENE; GANDARA, 2019; KESSLER et al., 2012; NOTARO; GARY; DEHEUVELS, 2020). Essa dualidade existe, uma vez que há o dilema da produtividade e da competição com outras espécies de sombreamento do sistema, como por exemplo, sistemas que tem o cacau (*Theobroma cacao* L.) ou dendê (*Elaeis guineensis* Jacq.) como culturas prioritárias para geração de renda, que necessitam de um certo nível de incidência solar para que possam ter sua produtividade maximizada, não permitindo o sombreamento excessivo proveniente de outras espécies nativas em sistemas diversificados.

A restauração de ecossistemas em larga escala é um tema cada vez mais abordado no meio acadêmico e nas esferas governamentais e privadas (LOPES; CHIAVARI, 2024). No entanto, saber como promover essa restauração de forma a atender os seus múltiplos benefícios é uma questão recorrente. Os debates vão desde a dificuldade de proposição de pacotes adaptados e que possam ganhar escala, até mesmo quais metodologias da restauração são mais adequadas para quais contextos (LOPES; CHIAVARI, 2024), isso evidencia que não existem pacotes fechados e sim opções que devem ser co-desenhadas de acordo com cada realidade (MICCOLIS et al., 2019).

Inúmeros projetos de restauração em larga escala estão surgindo no Brasil (IDESAM, 2024), e parte deles relacionados a geração de carbono *offset*, na modalidade ARR (*Afforestation, Reforestation, and Revegetation*), que são iniciativas voltadas à compensação de emissões de carbono através do plantio de árvores e da revegetação de áreas desmatadas ou degradadas. Esses projetos têm como objetivo remover dióxido de carbono (CO₂) da atmosfera através do sequestro

de carbono pelas plantas, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas.

Projetos na modalidade ARR, consideram os SAFs como uma excelente forma de ganho de escala, e muitas vezes, utiliza-se de experiências e pacotes já estabelecidos culturalmente em localidades onde agricultores interagem com esses modelos. A exemplos de regiões como em São Félix do Xingu e seu entorno, no sudeste paraense, e a região de Tomé-Açu, no nordeste paraense, onde projetos de expansão com SAFs cacau (*Theobroma cocoa*) (SILVA et al., 2021), SAF dendê (*Elaeis guineenses*) (BRAGA et al., 2024; RAMOS et al., 2018) e SAFs Tradicionais (SAFTAS) (HOMMA, 2004) vem se tornando exemplos de SAFs que podem ganhar escala, por projetos de desenvolvimento, incluindo pagamento por serviços ambientais e carbono (AGFEED, 2023; RESET UOL, 2023b, 2023a).

Ações da restauração ecológica, que consigam conciliar os meios de vida dos agricultores e ao mesmo tempo promover os serviços ecossistêmicos e a geração de renda, são cada vez mais importantes para serem atrativos e promover maior adoção por parte dos agricultores (BARROS et al., 2009; CALVI, 2009). No entanto, é necessário apoiar a discussão sobre a avaliação da integridade ecológica desses tipos de sistemas. Compreender que os SAFs podem ser uma oportunidade para atender esses múltiplos benefícios, mas ao mesmo tempo, a depender da forma como são seus arranjos e manejos, podem causar efeito contrário e avançar no sentido de um balanço negativo no impacto da sua implementação.

1.4.2 SISTEMAS AGROFLORESTAIS

Sistemas de cultivos intercalados, associando espécies vegetais de diferentes funcionalidades até mesmo com espécies animais, pode ter sido a forma mais ancestral de cultivo e alimentos na agricultura. Isso significa que os Sistemas Agroflorestais (SAFs) como chamados pela ciência hoje em dia, é a forma de cultivo da terra milenar adotada por muitos povos no mundo todo (MILLER; NAIR, 2006), que em seus modos de vida praticavam observando e mimetizando processos para soluções baseadas nos processos da natureza.

A ciência agroflorestal começou a ter papel relevante no debate científico a partir da década de 70, quando o termo aparece de forma sistemática apontando a importância de se considerar esses sistemas para as pessoas e seus meios de vida, assim como para soluções ambientais de nosso planeta (BENE; BEALL; CÔTÉ, 1977). Neste sentido, é importante compreender o papel dos SAFs na Restauração Ecológica (RE), e por isso, faz-se necessário entender de que forma os SAFs contribuem para transformações significativas nas paisagens, e quais os arranjos estão contribuindo de forma efetiva para restauração.

A literatura geralmente classifica os Sistemas Agroflorestais (SAFs) em diversas

categorias, conforme suas práticas e estratégias de produção. Essas categorias incluem consórcios de diferentes naturezas, como: cultivos intercalados (cultivos em faixas e outras formas de consorciação de árvores), sistemas multiestratos (hortas domésticas, sistemas perenes sombreados), sistemas de proteção (zonas ribeirinhas, quebra-ventos, cercas vivas), silvopastoris (sistemas de pastagem com árvores forrageiras) e bosques de árvores (cultivos destinados à produção de madeira ou lenha, e recuperação de áreas degradadas) (NAIR; GARRITY, 2012). Além dessas, existem também abordagens mais complexas, como os SAFs biodiversos e os SAFs sintrópicos (GÖTSCH, 1996; PENEIREIRO, 1999), que visam uma integração máxima e buscam imitar os processos naturais de maneira dinâmica e contínua.

Uma das formas mais clássicas de classificação dos SAFs se refere a estrutura e função, que podem variar no tempo e espaço, como por exemplo: agrossilvicultura (culturas agrícolas, incluindo culturas de árvores/arbustos), silvopastoril (pasto/animais com árvores) e agrossilvopastoril (culturas agrícolas + pasto/animais + árvores) (NAIR, 1985). Porém existem abordagens que mostram derivações da classificação mais em relação aos processos de estabelecimento, funcionalidade e estratificação dos SAFs (HASANUZZAMAN, 2009).

Na Amazônia Oriental é possível perceber uma ampla quantidade de estratégias e arranjos de SAFs, podendo ir dos mais simples até os mais complexos (BARROS et al., 2009; CALVI, 2009; CAMPOS et al., 2022; MACHADO, 2016; PEREIRA NETO, 2012). Cada arranjo pode trazer diferentes serviços ambientais e socioeconômicos, como benefícios para produção e conservação, aumento da biodiversidade, infiltração de água no solo, geração renda, redução de efeitos climáticos ou mesmo recreação e serviço culturais.

SAFs mais biodiversos e complexos tendem a proporcionar um aumento dos serviços ecossistêmicos, geralmente colaboram de forma mais significativa para restauração ecológica (GÖTSCH, 1996; MICCOLIS et al., 2016; PENEIREIRO, 1999). Por outro lado, são sistemas que exigem maior conhecimento e manejo das espécies, que podem ser um grande desafio para o ganho de escala. No contraponto, existem sistemas mais simplificados, que muitas vezes utilizam pacotes tecnológicos pré-estabelecidos, muitas vezes adotando insumos químicos no sistema de produção - que apesar de serem uma alternativa às monoculturas e usos degradantes da terra como a pecuária, ou plantio de grãos em escala, etc. - podem ter desempenhos limitados por não conseguirem favorecer a restauração dos processos naturais da floresta e outras formas de vegetação nativa.

Compreender quais fatores influenciam a adoção desses sistemas e o quão benéficos são para restauração, podem ajudar a identificar os trade-offs entre produção e conservação e os caminhos que podem ser mutuamente benéficos nos dois sentidos.

Desta forma, neste estudo serão analisados dois tipos de SAFs bastante adotados na

Amazônia paraense, e em outras regiões da Amazônia oriental. São os SAFs da região de Tomé-Açu (SAFTA), no nordeste paraense, muito conhecidos como SAFs tradicionais e tornaram-se uma importante estratégia para os meios de vida, tanto de agricultores patronais como familiares dessa região. Além dos SAFs da região de São Félix do Xingu (SAFSFX), no sudeste paraense, sistemas com cacau que se têm tornado uma excelente alternativa econômica, devido ao seu potencial de recuperação de áreas degradadas e na adequação às exigências ambientais aliadas a geração de renda. Ambos serão descritos a seguir na sessão de materiais e métodos.

1.4.3 SERVIÇOS ECOSSISTÊMICOS EM SAFS

Os serviços ecossistêmicos (SE), classificados em serviços de provisão, suporte, regulação e culturais, desempenham papéis cruciais para a sustentabilidade e o bem-estar humano (MEA, 2005). Os SE de provisão fornecem recursos materiais essenciais como alimentos e água potável, enquanto os SE de regulação mantêm processos naturais vitais, como a purificação do ar e a regulação climática. Os SE culturais contribuem para o enriquecimento espiritual, recreativo e educacional. A oferta, entrega, contribuição para o bem-estar e valor desses SE podem ser monitorados em escalas que vão do global ao local, permitindo uma gestão mais eficaz dos recursos naturais (BALVANERA et al., 2017; EGOH et al., 2012). Esse monitoramento é fundamental para identificar mudanças e impactos decorrentes das atividades humanas, além de subsidiar políticas de conservação e uso sustentável dos ecossistemas, garantindo assim a manutenção dos benefícios ecológicos e sociais para as gerações presentes e futuras.

Existem muitos estudos que avaliam os benefícios dos SAFs em diversos ecossistemas no mundo (NAIR; GARRITY, 2012; PORRO, 2009), porém, ainda existe uma lacuna do conhecimento a respeito de avaliar quais tipos de sistemas são mais adequados para restauração em cada contexto, e se estão contribuindo efetivamente para restauração ecológica. É importante destacar que, embora os SAFs possam gerar diversos SE, como a melhoria da qualidade do solo, a regulação do ciclo da água e o aumento da biodiversidade, isso não garante, por si só, a restauração das funções ecológicas e estruturais necessárias para a recuperação plena dos ecossistemas. Portanto, é fundamental investigar como esses sistemas podem ser projetados e geridos de maneira a maximizar não apenas a geração de SE, mas também os impactos diretos e mensuráveis na restauração ecológica.

A literatura tem apontado os benefícios dos SAFs para fornecimento de SE, colaborando para a provisão de produtos florestais e agrícolas como, madeiras, fibras, frutos, resinas, e outros alimentos (GARRITY, 2006; HAEGGMAN; LUNDBERG; MOBERG, 2020; VAN NOORDWIJK; SUNDERLAND, 2014). Bem como SE de suporte, em termos de formação do

solo, ciclagem de nutrientes, além de abrigo para fauna, polinizadores e dispersão de sementes (NAIR, P., K., 2004; SANTOS; KATO; TOURINHO, 2019). SE de regulação por meio de sequestro de carbono e biomassa, redução da temperatura local, infiltração da água no solo, equilíbrio de doenças, dentre outros (ANDERSON et al., 2009; KUYAH et al., 2019; QUANDT; NEUFELDT; GORMAN, 2023). Além de aspectos relacionados a questões culturais e meios de vida, como recreação e bem-estar das pessoas (FAGERHOLM et al., 2016; SANOU et al., 2019; SILVA-GALICIA et al., 2023).

A relação entre os SE em SAFs e a integridade dos ecossistemas, dentre os diferentes tipos de SAFs, ainda devem ser aprofundadas, como por exemplo, quais relações existem entre aumento dos serviços de provisão em detrimento de diminuição de outros serviços de suporte ou regulação, e vice-versa. Ou seja, se existem relações entre alguns fatores de manejo nos sistemas, p.ex. aumento de biodiversidade e estoque de carbono nos modelos de SAFs, etc. (BEILLOUIN et al., 2021; STEFFAN-DEWENTER et al., 2007). Avaliar os diferentes aspectos dos SE em SAFs e as motivações dos agricultores que os adotam, pode trazer informações valiosas para estratégias de ganho de escala e orientar tanto novos investidores como os formuladores de políticas a alcançarem suas metas ambiciosas, evidenciando quais sistemas podem alcançar os objetivos da restauração e dos meios de vida dos agricultores ao mesmo tempo.

1.4.4 INTEGRIDADE ECOLÓGICA

A Integridade Ecológica (IE) se configura como conceito crucial para avaliar o sucesso de projetos de restauração florestal, especialmente no contexto das florestas secundárias. No entanto, a definição tradicional de IE, que se baseia na comparação com um estado de referência estático (floresta primária), apresenta limitações ao não considerar a dinâmica temporal dos ecossistemas em recuperação (ROHWER; MARRIS, 2021; ROSENFELD et al., 2023). Para superar essa lacuna foi proposta uma abordagem inovadora que incorpora a trajetória sucessional ótima como referência adicional (ROSENFELD et al., 2023). Essa trajetória representa o potencial máximo de IE que pode ser alcançado em cada estágio sucessional em uma região específica, permitindo uma avaliação mais precisa da integridade em qualquer classe de idade da floresta secundária.

A implementação dessa abordagem exige a utilização de um conjunto abrangente de indicadores que capturem as diversas dimensões da IE. Para isso foram propostas categorias de indicadores que estão relacionados a composição, estrutura, função, além de indicadores relacionados ao contexto da paisagem (ROSENFELD et al., 2023).

Alguns dos principais indicadores são: diversidade e riqueza de espécies, incluindo a presença de espécies indicadoras de diferentes nichos ecológicos, indicadores que analisam a

estrutura física da floresta, como área basal, heterogeneidade estrutural e cobertura do dossel, fornecendo informações sobre a organização espacial e a complexidade da floresta, além de indicadores que avaliam os processos ecológicos, como crescimento e mortalidade de árvores, refletindo a capacidade da floresta de se manter e se renovar ao longo do tempo.

A coleta e análise desses indicadores fornecem uma avaliação abrangente da qualidade e do progresso da floresta secundária em recuperação. Além disso, esses indicadores estão diretamente relacionados à provisão de serviços ecossistêmicos, como sequestro de carbono, regulação do clima, conservação da biodiversidade e produção de madeira e outros produtos florestais não madeireiros.

Parte desses indicadores estão descritos no estudo realizado no projeto Regenera-Amazônia (REGENERAR-AMAZÔNIA, 2023), que trazem recomendações de indicadores e valores de referência que permitem classificar a IE da floresta Amazônica ao longo da sucessão ecológica.

Ao incorporar a dinâmica temporal e utilizar um conjunto abrangente de indicadores, é possível avaliar a IE de florestas secundárias em recuperação, e no mesmo sentido avaliar se outras estratégias de restauração, assim como os SAFs, também estão contribuindo para tais ganhos. Essa avaliação é fundamental para garantir que os esforços de restauração florestal sejam eficazes, sustentáveis e contribuam para a conservação da biodiversidade, e a provisão de serviços ecossistêmicos.

2. CAPÍTULO 1

AGROFLORESTAS PARA GANHO DE ESCALA CONTRIBUEM PARA MANUTENÇÃO DA INTEGRIDADE ECOLÓGICA DA AMAZÔNIA?

2.1 RESUMO

A promoção de estratégias que ampliem a restauração ecológica tornou-se um imperativo frente às metas de recuperação da vegetação nativa no Brasil e no mundo, visando a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Os sistemas agroflorestais (SAFs) destacam-se como uma das principais abordagens de restauração para a Amazônia, integrando a produção agrícola com a recuperação de fisionomias florestais e envolvendo os agricultores no processo. Entretanto, é crucial avaliar o desempenho dos SAFs na promoção e manutenção da integridade ecológica (IE) de florestas secundárias. Neste estudo, analisamos indicadores de IE de dois tipos de SAFs de cacau, os sistemas agroflorestais de Tomé-Açu (SAFTA), adotados por agricultores tradicionais no nordeste paraense, e os Sistemas Agroflorestais de São Félix do Xingu (SAFSFX), geralmente mais simplificados e implementados no sudeste paraense. Compararam-se esses sistemas com valores de referência obtidos em florestas secundárias de alta integridade. Avaliamos os indicadores diversidade de espécies arbóreas, heterogeneidade estrutural (índice de Gini), área basal e biomassa aérea, em 22 SAFs com idades entre 4 e 35 anos. As análises mostraram que os SAFTA apresentam melhor desempenho em composição de espécies em relação aos SAFSFX, e ambos os SAFs alcançaram valores de integridade ecológica semelhantes aos de florestas secundárias bem conservadas. SAFs com idade ≥ 20 anos exibiram um coeficiente de Gini de $0,32 \pm 0,09$, área basal de $20,3 \pm 6,5 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$ e biomassa aérea de $116,3 \pm 37,7 \text{ ton}.\text{ha}^{-1}$. Contudo, observou-se uma baixa riqueza de espécies (~ 2 a 7 por 100 ind.), com forte dominância das espécies comerciais *Theobroma cacao* (45,9%), *Euterpe oleracea* (7,1%), *Carapa guianensis* (6,8%) e *Bertholetia excelsa* (6,7%). Projetos de restauração em larga escala, especialmente aqueles voltados para a produção sustentável em parceria com agricultores familiares, devem considerar estes resultados e lançar mão de SAFs mais diversos e agrossucessionais para a manutenção da integridade ecológica da Floresta Amazônica.

Keywords: indicadores de restauração ecológica, desenvolvimento rural sustentável, SAF, biodiversidade

2.2 INTRODUÇÃO

Em um contexto global marcado pela crise climática e pela perda de biodiversidade, a restauração de ecossistemas se apresenta como ferramenta crucial para a mitigação dos impactos ambientais e a promoção do desenvolvimento sustentável (FISCHER et al., 2021; UNEP; FAO, 2020). Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) despontam como uma estratégia promissora para a restauração ecológica ganhar escala, combinando produção agrícola, integridade ecológica de florestas e provisão de serviços ecossistêmicos (GARRITY et al., 2006; HAEGGMAN; LUNDBERG; MOBERG, 2020; JOSE, 2009; VIEIRA; HOLL; PENEIREIRO, 2009; MCNEELY; SCHROTH, 2006). Os SAFs integram árvores exóticas e nativas, culturas agrícolas de modo a promover interações de facilitação entre os componentes arbóreo e agrícola, otimizando o uso dos recursos, e proporcionando benefícios socioeconômicos e ecológicos (ERDMANN, 2005; HAEGGMAN; LUNDBERG; MOBERG, 2020; MICCOLIS et al., 2019; VAN NOORDWIJK et al., 2020).

SAFs são bastante variáveis em relação a estrutura, função e composição de espécies, gerando sistemas com maior ou menor contribuição para provimento de serviços ecossistêmicos e a manutenção da integridade ecológica (DA CRUZ SILVA et al., 2023; FLORENCIA MONTAGNINI, 2020; SANTOS; CROUZEILLES; SANSEVERO, 2019; SOMARRIBA et al., 2013). No entanto, ainda não existem estudos que avaliam o quanto os SAFs auxiliam na recuperação da integridade ecológica (IE), utilizando atributos de estrutura da vegetação, função ecossistêmica e composição de espécies, e que relacionem com valores de referência de florestas. A maioria dos estudos se concentram em avaliar a contribuição dos SAFs em termos da geração de serviços ecossistêmicos e a maioria avaliam atributos de composição de espécies, comparando-os com outros sistemas de produção e florestas adjacentes (FLORENCIA MONTAGNINI, 2020; JOSE, 2012; SCHROTH et al., 2004; UDAWATTA; RANKOTH; JOSE, 2019).

É importante avaliar se os SAFs servem como opção de restauração ecológica, submetendo-os aos valores de referência ótimos de integridade ecológica da regeneração natural, a principal forma de regeneração da floresta Amazônica (NUNES et al., 2020). Recentemente, o conceito de Integridade Ecológica, *i.e.* a distância ecológica entre o ecossistema em avaliação e o ecossistema maduro de referência, foi aplicado a florestas em regeneração, considerando-se indicadores e valores de referência para cada idade e região da Amazônia. Esta integridade é definida pela estrutura, composição e função dentro dos limites da variação natural ou histórica e para cada faixa de idade (ROSENFELD et al., 2023). Florestas em regeneração natural podem recuperar atributos da vegetação em taxas muito variáveis, de acordo com variáveis biofísicas,

intensidade e frequência de uso e cobertura florestal na paisagem. Uma integridade ecológica ótima é desejável para florestas em restauração (ROSENFELD et al., 2023).

Na Amazônia Oriental há grande variedade de SAFs, desde os mais simples, com poucas espécies ocupando o dossel e uma espécie carro-chefe no sub-bosque, até SAFs multiestratos, com dezenas de espécies no dossel com diferentes funções e estratos (CAMPOS et al., 2022; CARDOZO et al., 2022; MILLER; PENN; VAN LEEUWEN, 2006; PORRO et al., 2012). Sistemas mais simplificados, muitas vezes utilizam pacotes tecnológicos pré-estabelecidos, adotando insumos químicos no sistema de produção (BRAGA, 2015). SAFs simples são uma alternativa a monoculturas, porém é possível que favoreçam apenas parcialmente a restauração dos processos ecossistêmicos naturais da floresta. Por outro lado, SAFs mais biodiversos e multiestratificados tendem a proporcionar um aumento dos atributos ecológicos da floresta, geralmente colaborando de forma mais significativa para restauração (GÖTSCH, 1996; MICCOLIS et al., 2016; VIEIRA; HOLL; PENEIREIRO, 2009). Estes, embora exijam maior conhecimento e manejo das espécies, podem ser um grande desafio para o ganho de escala, pela sua complexidade e sua exclusividade de composição de espécies e forma de manejo.

A diversidade nos SAFs é um fator crucial para a manutenção da integridade ecológica e a provisão de serviços ecossistêmicos. SAFs mais diversificados tendem a apresentar níveis de integridade ecológica próximos aos das florestas nativas (JOSE, 2009; MORTIMER; SAJ; DAVID, 2018; VAN NOORDWIJK, 2021). No entanto, a diversidade dos SAFs pode variar significativamente de acordo com o contexto sociocultural (MICCOLIS et al., 2019). Portanto, é essencial considerar essas especificidades ao promover SAFs adequados, a fim de maximizar seu potencial na geração de múltiplos serviços ecossistêmicos, incluindo serviços de provisão, regulação e culturais (BRAGA et al., 2024)

Diversas empresas em parcerias com ONGs têm investido em SAFs em projetos de restauração para geração de créditos de carbono, na modalidade ARR (*Afforestation, Reforestation, and Revegetation*), com a promessa de alavancar a restauração na Amazônia, gerando renda para as famílias e estocando grandes quantidades de carbono a longo prazo (AGFEED, 2023; AMAZON NEWS, 2021; MICROSOFT NEWS, 2023; RESET UOL, 2023a, 2023b, 2023c). O aumento de projetos de restauração em larga escala, impulsionados pelo mercado de carbono (IDESAM, 2024), pode ser questionado quanto a qualidade dos SAFs e sua capacidade de gerar serviços ecossistêmicos de forma sustentável.

A busca por ganhos rápidos em escala pode levar à simplificação dos SAFs, e consequentemente não contribuindo para a recuperação da integridade ecológica da floresta amazônica. Compreender quais sistemas são mais adequados para restauração, levando em conta

a integridade da floresta, podem ajudar a identificar caminhos para produção com conservação.

Neste estudo são analisados dois tipos de SAFs amplamente adotados na Amazônia. Os SAFs da região de Tomé-Açu (SAFTA), no nordeste paraense, são conhecidos como SAFs tradicionais e tornaram-se uma importante estratégia para os meios de vida, tanto de agricultores patronais como familiares dessa região (HOMMA, 2004, 2016). Em contraste, os SAFs da região de São Félix do Xingu (SAFSFX), localizados no sudeste paraense, consistem em sistemas que cultivam cacau sobre pastagens, utilizando poucas espécies que rapidamente proporcionam sombra ao cacau, além de gerar renda nos primeiros anos por meio da combinação com espécies arbóreas madeireiras. Nesse contexto, os SAFSFX têm se destacado como excelentes alternativas econômicas, devido ao seu potencial para a recuperação de áreas degradadas, adaptação às exigências ambientais e geração de renda (BRAGA; DOMENE; GANDARA, 2019; IEB; ECOOIDEIA, 2014).

Os dois modelos de SAF foram identificados para serem disseminados e implantados em diversas partes da Amazônia com o foco em geração de renda e restauração florestal (AMAZON NEWS, 2021; WRI, 2017). Esses SAFs são exemplos de práticas que, ao longo de muitos anos, foram adotadas pelos agricultores e, cada vez mais, se consolidam como estratégias eficazes de geração de renda em seus respectivos contextos, contribuindo para a sustentabilidade econômica e ambiental da região.

A restauração ecológica em larga escala demanda recursos financeiros e técnicos, e estratégias para superar gargalos institucionais e sociais, e que esteja alinhada a políticas públicas de desenvolvimento das comunidades rurais (LOPES; CHIAVARI, 2024). Desta forma, quando se pretende ampliar a escala da restauração, é fundamental considerar o contexto local e da paisagem (GUERRA et al., 2020; SINCLAIR; COE, 2019; UNEP; FAO, 2020) para proposição de métodos e estratégias adequadas.

A regeneração natural, ou restauração passiva, é eficaz em áreas que tiveram intensidade e frequência de uso amenas (CHAZDON; GUARIGUATA, 2016). Todavia, o contexto socioeconômico, as condições de uso do solo, além do estado de degradação da área, fornecem informações valiosas na escolha dos métodos de restauração.

Em regiões onde há populações que dependem da agricultura e de outras formas de uso da terra para sua subsistência, os SAFs podem ser bastante apropriados, pois oferecem benefícios econômicos para as comunidades locais, enquanto contribuem para a restauração ecológica a longo prazo (DAGAR; GUPTA; TEKETAY, 2020; MCNEELY; SCHROTH, 2006). Mas para que isso possa ser possível é fundamental a manutenção da integridade ecológica da floresta.

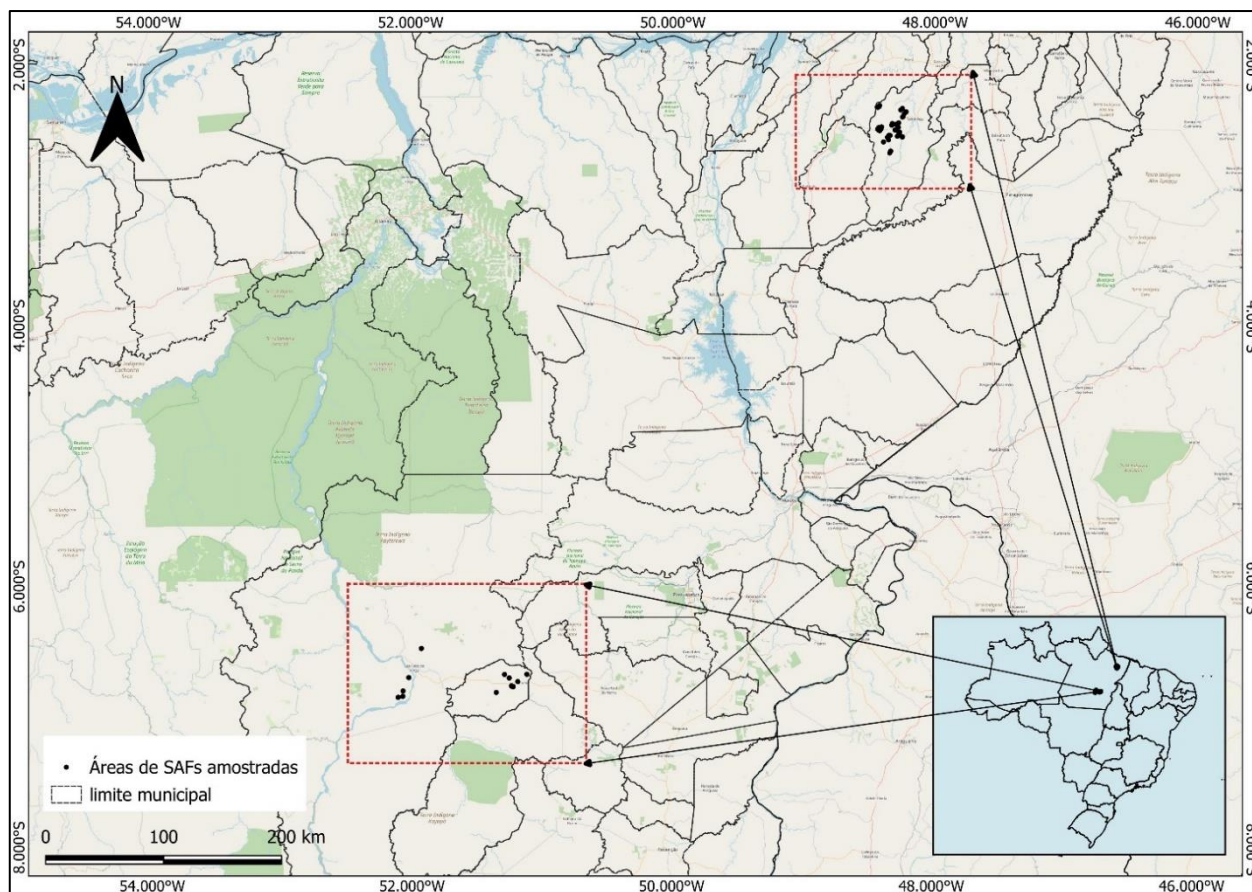
Neste estudo, avaliamos a integridade ecológica dos SAFTA e SAFSFX em uma

cronossequência de até 35 anos, comparando a evolução dos atributos da integridade ecológica entre os dois SAFs e com a referência de regeneração natural com alta integridade ecológica.

2.3 MATERIAIS E MÉTODOS

2.3.1 ÁREA DO ESTUDO

O estudo se concentrou em duas regiões, uma no município de Tomé-Açu, no nordeste paraense, e a segunda, em áreas dos municípios de São Félix do Xingu e Tucumã, no sudeste do Pará (Figura 1). Nessas regiões há uma expansão agroflorestal, principalmente impulsionada pela cacaucultura, apoiada por projetos de desenvolvimento governamentais em parceria com organizações do terceiro setor. Os modelos de SAF (SAFSFX e SAFTA) adotados nessas regiões foram desenvolvidos há décadas, melhorados a partir da experiência local e são amplamente aceitos e difundidos como pacotes tecnológicos a serem amplamente adotados (CEPLAC, 2020; HOMMA, 2004; IDEFLOR-BIO, 2021; SILVA et al., 2021).



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 1. Localização dos SAFs estudados em regiões dos municípios de Tomé-Açu, São Felix do Xingu e Tucumã, na Amazônia Oriental.

SAFs de Tomé-Açu (SAFTA)

O Município de Tomé-Açu, está situado na mesorregião do nordeste paraense (01 °57'38"S e 03 11 6'37"S; 47°53'32"O e 48°49'15"O). A média anual de precipitação é de 2300 mm, com o clima quente e úmido, que se caracteriza como chuvoso, com um intermeio de período seco, ocorrendo, em geral, entre agosto e setembro (PACHECO; BASTOS, 2001). A topografia é plana e os solos predominantes são Latossolos Amarelo de textura pesada, Latossolos Amarelos, Podzólicos e Latossolos Concrecionários Alaranjados (FALESI; DOS SANTOS; VIEIRA, 1964).

A vegetação dominante em Tomé-Açu é caracterizada por Floresta Ombrófila Densa, atualmente bastante alteradas, por ser uma fronteira agrícola antiga, com a ocorrência de florestas secundárias em processos de regeneração, intercaladas com áreas de pousio. O município se destaca na agricultura e nos SAFs devido à colonização japonesa nos anos 30 (HOMMA, 2016) e pelos povos ribeirinhos que migraram vindo principalmente da fronteira leste com o estado do Maranhão (PACHECO; BASTOS, 2001).

Em 1929 os colonos japoneses introduziram a pimenta-do-reino (*Piper nigrum*) como principal cultura da região. Após o declínio dessa cultura, devido a infestação da doença podridão seca, causada pela *Fusarium solani*, os agricultores buscaram alternativas econômicas (HOMMA, 2004). Por meio da observação das culturas tradicionais e povos que já habitavam a região, os agricultores japoneses começaram a implementação de sistemas consorciados, com a rotação de culturas e de forma sequencial e sucessional, visando reduzir os impactos de dependência de uma só cultura e aproveitar as áreas antes, durante e após o plantio da pimenta-do-reino (HOMMA, 2016). Assim, os sistemas agroflorestais tornaram-se importante estratégia para os meios de vida, tanto de agricultores patronais como familiares dessa região. Esse processo resultou na disseminação dos SAFs em inúmeras propriedades em diferentes fases de expansão e com diferentes arranjos de espécies florestais e culturas agrícolas, tornando Tomé-Açu um dos principais municípios agrícolas do estado do Pará (HOMMA, 2004, 2016).

Os SAFs adotados nessa região geralmente incluem o cultivo da pimenta-do-reino (*Piper nigrum*), seguida por maracujá (*Passiflora edulis*), árvores frutíferas nativas, tais como cacau (*Theobroma cocoa*), cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), andiroba (*Carapa guianensis*) e ingás (*Inga edulis*), além de palmeiras, como o açaí (*Euterpe Oleracea*). Por fim, árvores madeireiras, principalmente ipê (*Tabebuia serratifolia*) e mogno (*Swietenia macrophylla*) (SANTOS; KATO; TOURINHO, 2019).

SAFs de São Félix do Xingu (SAFSFX)

O município de São Félix do Xingu (06°38'41"S; 51°59'42"O), faz parte da Mesorregião do Sudeste paraense, que inclui 39 municípios, pertencendo à Microrregião de São Félix do Xingu, que inclui outros quatro municípios: Bannach, Tucumã, Ourilândia e Cumaru do Norte (BRAGA, 2015). Está localizado a uma altitude de 220m acima do nível do mar (IEB; ECOOIDEIA, 2014). O clima predominante nesta região é do tipo equatorial/tropical úmido, com 3 meses de seca, geralmente de junho a agosto, e uma temperatura média acima de 26° C, com precipitação média de 1680mm ao ano (IEB; ECOOIDEIA, 2014).

A região está localizada na bacia do Rio Xingu, com área total de cerca de 531.250 km², pertencente à grande bacia amazônica, com a predominância de Argissolos de cores vermelhas e amarelas, com horizonte B textural, distróficos de média a baixa fertilidade, além de grandes manchas de Neossolos Flúvicos e Litólicos com presença de cascalho (BRAGA, 2015; IEB; ECOOIDEIA, 2014). Sua vegetação predominante são Florestas Ombrófilas Densas a Abertas, possuindo manchas de savanas entre grandes áreas desmatadas principalmente na porção norte do município (IEB; ECOOIDEIA, 2014).

A dinâmica de exploração dos recursos naturais na região de SFX e seu entorno ocorreu com maior intensidade após o projeto de construção da PA 279 nos anos 80 (SCHMINK et al., 2019), que trouxe maior acesso, expandindo a logística de usos do solo na região. Porém, assim como em outras regiões Amazônicas, sua ocupação teve grande destaque a partir dos anos 70, sempre associada a ondas de desmatamentos, com expulsão dos povos e comunidades tradicionais para colonização das terras (SCHMINK et al., 2019; SOUSA et al., 2016). O município foi recordista em vários anos consecutivos no desmatamento da Amazônia, principalmente ocasionado pela grilagem de terras para exploração madeireira e conversão para pastagens (SCHMINK et al., 2019). E continua sendo uma das principais formas de uso e ocupação do solo na região.

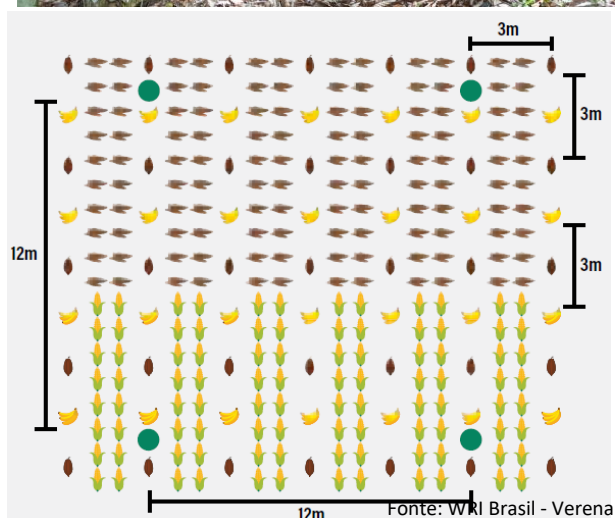
A partir dos anos 90 a cultura do cacau (*Theobroma cacao*) iniciou uma nova frente de oportunidades econômicas, especialmente adotada por agricultores familiares (SILVA et al., 2021), muitas vezes consorciado com espécies arbóreas para sombreamento do cacaueiro em sistemas agroflorestais, podendo ser alguns mais e outros menos diversificados (IDEFLOR-BIO, 2021; IEB; ECOOIDEIA, 2014). Sistemas agroflorestais com cacau na região têm-se tornado uma excelente alternativa econômica, devido ao seu potencial de recuperação de áreas degradadas e na adequação às exigências ambientais aliadas a geração de renda (CEPLAC, 2020; IEB; ECOOIDEIA, 2014; MENDONÇA; PEDROZA FILHO, 2018). A principal características dos

SAFs dessa região é o cultivo de espécies de ciclo curto e semi-perenes, para sombreamento provisório do cacau nos estágios iniciais, sendo feito principalmente pela banana (*Musa sp.*) e poucas espécies frutíferas e madeiras nos consórcios para sombreamento ao longo do tempo (BRAGA, 2015).

COLETA DE DADOS

A seleção das áreas amostradas partiu de um banco de dados de projetos já realizados nesses territórios, como o projeto Cacau Floresta, conduzidos pela The Nature Conservancy (TNC), no sudeste paraense, e áreas de agricultores parceiros dos projetos do Centro Internacional de Pesquisa Florestal e Agroflorestal (CIFOR-ICRAF), no nordeste paraense. Foram amostrados 13 SAFTA e 9 SAFSFX, totalizando 22 SAFs em diversos arranjos agroflorestais entre 4 a 35 anos de idade (Fig. 2).

SAFSFX



SAFTA

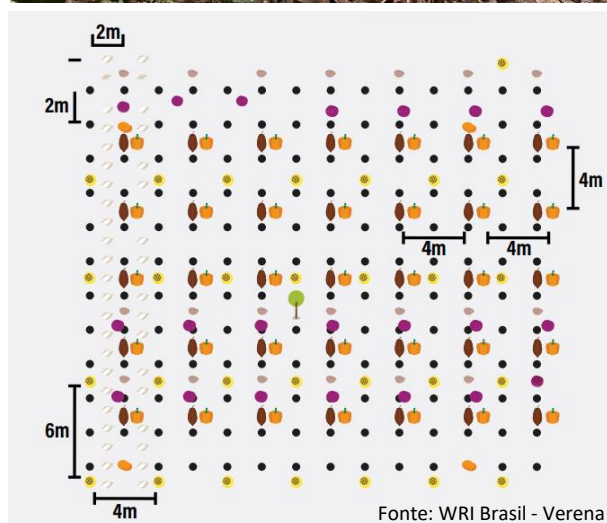


Figura 2. Arranjos de SAFs mais comuns adotados pelos agricultores das regiões do NE e SE paraense. SAFSFX: sistemas de São Félix do Xingu, que geralmente incluem cacau, banana, mandioca, milho e algumas outras frutíferas e espécies florestais de sombreamento; SAFTA: sistemas tradicionais de Tomé-Açu, geralmente com pimenta, arroz, abóbora, maracujá, cacau ou cupuaçu, açaí, taperebá, andiroba ou frutíferas e espécies florestais.

Em cada SAF, foram estabelecidas três parcelas de 30 × 30 m (900 m²), alocadas aleatoriamente, compostas por: 39 parcelas na região NE e 27 parcelas na região SE. Foram amostradas espécies arbóreas e palmeiras, onde todos os indivíduos com circunferência à altura do peito (CAP) ≥ 30 cm foram medidos com o uso de uma fita métrica (9,55 cm de DAP). Para a espécie *Theobroma cacao* foram medidos todos os indivíduos ≥ 30 cm de CAP. Para esses indivíduos, foi medida a circunferência com altura de 30 cm acima do solo, para cálculo de biomassa por equações alométricas específicas para o cacau. A altura foi estimada com auxílio de Hispômetro digital Vertex-IV. As espécies foram identificadas em campo por parobotânicos e biólogos da equipe. Os espécimes de difícil identificação foram coletados e identificados posteriormente no Herbário da Embrapa Amazônia Oriental (CPATU) em Belém.

2.3.2 ANÁLISE DOS DADOS

Inicialmente foram medidas a densidade, área basal (AB), frequência, dominância e riqueza das espécies arbóreas e palmeiras nos SAFs em indivíduos com CAP ≥ 30 cm. Em seguida foi estimada a biomassa acima do solo (AGB), além da heterogeneidade estrutural pelo índice de Gini com base no diâmetro dos indivíduos. Os valores obtidos foram comparados com valores de referência do estudo Regenera-Amazônia (2023) que avaliou 448 florestas secundárias em regeneração natural (RN), entre 5 e 20 anos. Um modelo logarítmico das médias dos valores de RN do estado do Pará, do projeto Regenera-Amazônia, foi gerado para cada indicador, a fim de estabelecer as linhas de tendências dos gráficos e permitir a comparação entre SAFs e RN.

A AGB de cada tronco foi estimada com base em equações alométricas da seguinte forma: Para todas as espécies arbóreas florestais (CAP ≥ 30) a AGB foi estimada usando a equações descrita em Chave et al. (2014) - $AGB = 0.0673 * (WD * H * D^2)^{0.976}$. Essa equação é baseada no maior banco de dados de árvores de florestas tropicais secundárias e usa a densidade da madeira para os cálculos. Os dados sobre densidade da madeira das espécies de árvores amostradas foram obtidos do banco de dados do Global Wood Density Database (ZANNE et al., 2009), no pacote Biomass do R. Plantas não identificadas quanto à espécie, usamos os valores para gênero ou família.

Para a espécie *Theobroma cacao* L. usamos a equação de Andrade et al. (ANDRADE; SEGURA; SOMARRIBA, 2022) - $AGB \text{ (kg)} = \text{EXP}(-3.74 + 2.63 * \text{LN}(d30)) * (1.156)$, devido ao grande número de bifurcamento dos indivíduos a 1,30m a altura do peito, esta equação considera a altura do solo a 30cm (d30), reduzindo o erro de estimação. Para a espécie *Euterpe oleraceae* Jacq. foi utilizado equação específica para essa espécie - $AGB \text{ (kg)} = (\text{exp}(-3.64 + 1.84 * \text{ln}(\text{dbh}) + 0.88 * \text{ln}(\text{height}))) / 0.47$ (AVALOS; CAMBRONERO; ALVAREZ-

VERGNANI, 2022).

Os dados de distribuição diamétrica dos indivíduos arbóreos foram utilizados para avaliar a heterogeneidade estrutural dos SAFs por meio do índice de Gini. Este índice foi empregado para quantificar a desigualdade estrutural, considerando a assimetria na distribuição dos diâmetros das árvores (REICH et al., 2022).

Para compreender os fatores que influenciam os atributos de integridade ecológica (AGB, AB, riqueza de espécies, Gini), foram aplicados modelos lineares mistos. Esses modelos foram desenvolvidos para avaliar como esses atributos variam em função da idade dos SAFs (variável contínua) e da região onde estão localizados (variável categórica), além de explorar interações entre essas variáveis. Essa abordagem permitiu investigar, não apenas se as médias dos atributos diferem entre as regiões, mas também se existem padrões temporais distintos nas trajetórias dos atributos, dependendo da região e do tipo de SAF.

Os modelos foram ajustados para incluir a região como um efeito aleatório, permitindo controlar possíveis variações intrínsecas entre as diferentes regiões e reduzir o risco de viés nas estimativas dos efeitos fixos. Para avaliar a qualidade e adequação dos modelos, foram calculados o coeficiente de determinação (R^2) e o Critério de Informação de Akaike (AIC) para cada modelo ajustado.

Para avaliação da composição de espécies, foi realizada análise de escalonamento multidimensional não-métrico (NMDS), onde a matriz de dissimilaridade de Bray-Curtis foi utilizada para avaliar a similaridade das espécies entre os diferentes SAFs. O NMDS é uma técnica de ordenação que projeta as amostras em um espaço de baixa dimensionalidade, preservando as relações de dissimilaridade entre elas (BRAY; CURTIS, 1957). A NMDS foi implementada com duas dimensões ($k=2$), proporcionando visualização bidimensional das similaridades entre os SAFs.

Os dados foram organizados em planilhas de Excel para sua preparação, e todas as análises foram realizadas utilizando o software R Studio 3.3.4 (R Core Team 2023), com os pacotes Vegan, fitdistrplus e tidyverse para análises ecológicas, estatística e manipulação dos dados, além dos pacotes lme4, lmerTest, emmeans para geração dos modelos e ggplot2, para geração de gráficos.

2.4 RESULTADOS

Características dos SAFs

Os resultados da Tabela 1 destacam variações importantes nas características dos SAFs com cacau nas regiões estudadas, considerando atributos como área basal (AB), idade dos sistemas, número de espécies (n. spp.), biomassa acima do solo (AGB), número de indivíduos (n. ind.) e índice de diversidade de Shannon (H').

Tabela 1. Principais características dos SAFTA-NE (n=14) e SAFSFX-SE (n=9) relacionados a área basal (AB), idade dos sistemas, número de espécies encontradas (n. spp.), biomassa acima do solo (AGB), número de indivíduos (n. ind.), índice de diversidade de Shannon (H').

Sistema Agroflorestal	Região	AB (m ² .ha ⁻¹)	idade	n. spp.	AGB (ton.ha ⁻¹)	n. ind.ha ⁻¹	Diversidade (H')
SAF1	SE	20,66	35	9	105,14	915	0,23
SAF2	SE	11,93	10	7	43,97	819	0,42
SAF3	NE	17,91	13	8	73,82	830	0,47
SAF4	NE	17,82	26	5	137,29	656	0,72
SAF5	SE	22,04	23	8	99,87	841	0,37
SAF6	NE	18,48	20	14	94,32	1.000	1,37
SAF7	SE	21,52	26	7	90,96	1.011	0,27
SAF8	NE	36,57	30	8	208,50	867	1,08
SAF9	NE	5,71	4	4	10,24	556	1,06
SAF10	NE	10,05	6	6	22,78	870	1,08
SAF11	NE	23,53	20	11	131,96	630	0,86
SAF12	NE	25,48	15	7	121,14	959	0,66
SAF13	NE	23,80	30	6	71,46	1.059	1,14
SAF14	NE	24,43	11	11	81,50	1.448	0,74
SAF15	NE	19,40	22	5	88,45	656	1,09
SAF16	SE	21,16	21	15	89,01	1.200	0,71
SAF17	SE	17,46	15	13	65,86	941	0,63
SAF18	SE	19,35	17	9	57,79	1.000	0,20
SAF19	NE	30,27	25	9	138,01	1.178	1,11
SAF20	SE	12,61	6	16	58,68	844	0,64
SAF21	NE	22,28	26	7	121,06	844	0,68
SAF22	SE	21,05	16	8	97,62	848	0,55

A diversidade de espécies, área basal, biomassa acima do solo e densidade de indivíduos variam consideravelmente entre os SAFs estudados. Sistemas como SAF6 e SAF8 destacam-se por sua alta diversidade e AB, enquanto sistemas como SAF9 e SAF19 mostram menores valores nesses parâmetros, refletindo diferentes estágios de desenvolvimento e manejo. A variação da biomassa acima do solo em SAFs acima de 25 anos foi de $125,29 \pm 40,97$ ton.ha⁻¹. Os sistemas SAF4, SAF8, SAF11 e SAF20, ambos na região Nordeste, entre 20 a 26 anos de idade, apresentaram os maiores valores de AGB, entre 131,96 a 208,50 ton.ha⁻¹.

Os SAFTA tendem a ter maior área basal e biomassa acima do solo, especialmente em sistemas mais antigos. O SAF8 (NE), com 30 anos, apresentou a maior área basal (36,57 m².ha⁻¹) e a maior AGB (208,50 ton.ha⁻¹). Em contrapartida, os sistemas do sudeste (SAFSFX), como o

SAF2 e SAF5, embora mais antigos, acima de 10 anos, apresentaram valores de biomassa baixos, comparados com os demais na mesma faixa de idade (43,97 e 99,87 ton.ha⁻¹, respectivamente). Isso sugere que os SAFSFX, com menor diversidade e manejo intensivo de cacau, podem acumular menor biomassa ao longo do tempo.

A diversidade de espécies foi geralmente maior nos SAFTA. Por exemplo, o SAF6 (NE) apresentou 14 espécies, com um índice de diversidade de Shannon (H') de 1,37, enquanto os sistemas do sudeste foram menos diversos, como o SAF1 (SE) com apenas 9 espécies e um índice H' de 0,23. Isso reflete o manejo menos intensivo nos SAFSFX, com uma maior variação de espécies arbóreas associadas, enquanto no sudeste predomina um manejo mais padronizado focado no cacau.

A densidade de indivíduos por hectare foi mais alta no SAF15 (1.448 ind. ha⁻¹) e mais baixa no SAF9 (556 ind. ha⁻¹), refletindo variações na composição e estrutura dos sistemas. O SAF15, com apenas 11 anos, demonstrou um número excepcionalmente alto de indivíduos, associado a uma diversidade moderada (H' = 0,74) dentre os demais sistemas. A densidade de ocupação média de indivíduos foi de 877 ± 239 ind. ha⁻¹.

Integridade Ecológica

A análise dos modelos lineares mistos para os indicadores de integridade ecológica (AGB; AB, n_spp100, Gini), forneceu importantes insights sobre a dinâmica dos SAFs ao longo do tempo. Para biomassa aérea (AGB) o modelo revelou um efeito significativo da idade, com um aumento consistente na biomassa à medida que os SAFs envelhecem, com uma relação positiva entre a idade e o acúmulo de biomassa ($p < 0,001$, $r^2 = 0,54$). O modelo para área basal (AB) mostrou um efeito significativo e positivo da idade ($p < 0,001$), evidenciando que o aumento na área basal é fortemente associado ao envelhecimento dos SAFs. No modelo para número de espécies por 100ind (n_spp100), a variável idade não apresentou um efeito significativo ($p = 0,6913$), sugerindo que, ao menos nos dados analisados, a idade dos SAFs não influenciou de maneira significativa o número de espécies presentes nas áreas. Já o modelo para índice de Gini, que avalia a desigualdade na distribuição diamétrica, mostrou um efeito positivo e significativo da idade ($p = 0,0339$), indicando que, com o aumento da idade dos SAFs, resulta em maior heterogeneidade estrutural. Os modelos demonstram a complexidade das interações entre as variáveis ambientais e o tempo de regeneração nos SAFs, evidenciando que a biomassa, área basal e Gini estão mais diretamente relacionadas à idade, enquanto o número de espécies não apresenta uma relação clara com o tempo de desenvolvimento dos sistemas agroflorestais (Figura 2A).

Quando comparados com valores de regeneração natural, os valores médios de AGB,

segmentados por faixas etárias, foram: $33,92 \pm 21,59 \text{ ton.ha}^{-1}$ para SAFs com idade ≤ 10 anos; $90,50 \pm 26,07 \text{ ton.ha}^{-1}$ para SAFs entre 10 e 20 anos; e $116,33 \pm 37,67 \text{ ton.ha}^{-1}$ para SAFs com idade ≥ 20 anos. Valores próximos das florestas secundárias de referência (RN AGB: 5 anos = $56,1 \text{ ton.ha}^{-1}$; 10 anos = $95,9 \text{ ton.ha}^{-1}$; 15 anos = $119,2 \text{ ton.ha}^{-1}$; 20 anos = $135,9 \text{ ton.ha}^{-1}$), sugerindo que os SAFs, ao longo do tempo, tendem a alcançar níveis de biomassa comparáveis aos de florestas secundárias em regeneração.

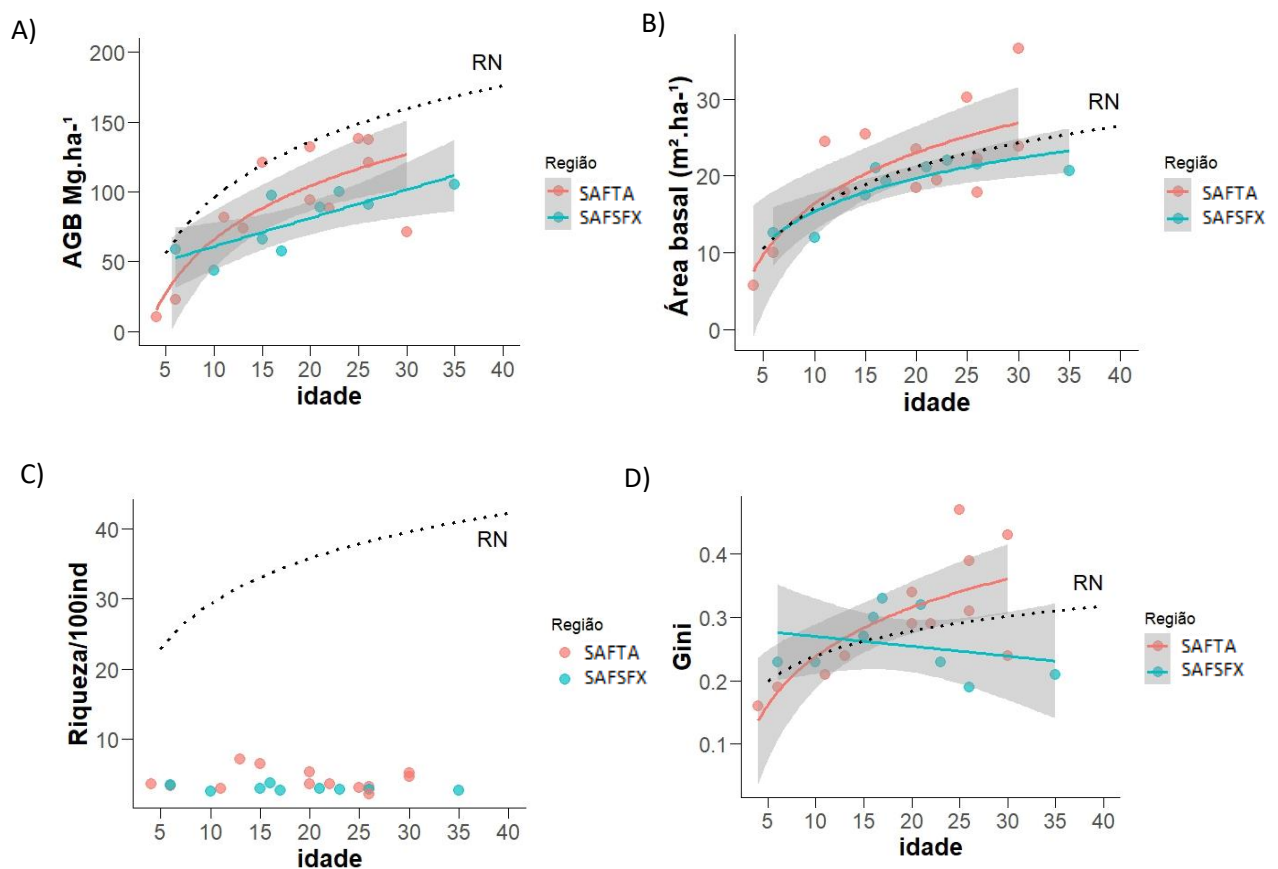


Figura 3. Comparativo da evolução temporal dos SAFTA (n=13) região NE e SAFSFX (n = 9) região SE, em relação a integridade ecológica da Regeneração Natural (RN): A) Biomassa acima do solo (AGB) Mg ha⁻¹; B) Área Basal (m² ha⁻¹); C) Riqueza em espécies/100ind.; D) Heterogeneidade estrutural (Gini). Linha de tendência logarítmica dos valores de referência em florestas secundárias em regeneração (REGENERA-AMAZÔNIA, 2023). Diferença não significativa entre SAFTA e SAFSFX, em todos os parâmetros avaliados ($p > 0,05$).

A área basal ($\text{m}^2.\text{ha}^{-1}$) também apresentou uma progressão clara ao longo do tempo nos SAFs estudados. Os valores médios foram de $10,07 \pm 3,10 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$ para SAFs com idade ≤ 10 anos; $20,96 \pm 3,15 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$ para SAFs entre 10 e 20 anos; e $23,50 \pm 5,36 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$ para SAFs com idade ≥ 20 anos. A análise estatística demonstrou uma correlação significativa entre idade e área basal (p

$< 0,001$, $r^2 = 0,51$), sugerindo que, à medida que os SAFs envelhecem, eles tendem a recuperar características estruturais similares às florestas secundárias em regeneração. Os valores observados para os SAFs se aproximam dos de florestas secundárias de referência (RN AB: 5 anos = $10,5 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$; 10 anos = $15,8 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$; 15 anos = $18,9 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$; 20 anos = $21,2 \text{ m}^2.\text{ha}^{-1}$), reforçando o potencial desses sistemas em promover a recuperação estrutural ao longo do tempo.

A heterogeneidade estrutural, avaliada pelo índice de Gini, mostrou um aumento significativo com o avanço da idade dos SAFs ($p < 0,01$, $r^2 = 0,33$). Os valores médios variaram de $0,20 \pm 0,04$ em SAFs com idade ≤ 10 anos; $0,28 \pm 0,04$ para SAFs entre 10 e 20 anos; e $0,32 \pm 0,09$ em SAFs com idade ≥ 20 anos. Esses resultados indicam que a complexidade estrutural dos SAFs se desenvolve progressivamente com o tempo, aproximando-se dos níveis observados em florestas secundárias de referência (RN Gini: 5 anos = 0,20; 10 anos = 0,24; 15 anos = 0,26; 20 anos = 0,28). Isso sugere que os SAFs podem, com o tempo, imitar padrões de estrutura mais complexos, semelhantes aos das florestas em regeneração natural. No entanto, os SAFTA demonstraram maior riqueza e abundância de espécies em comparação com os SAFSFX.

A análise da riqueza de espécies por 100 indivíduos revelou que não houve uma relação significativa entre a riqueza de espécies e a idade dos SAFs ($p > 0,1$), com valores variando entre 8 ± 5 spp. em SAFs com até 10 anos; 10 ± 3 spp. em SAFs entre 10 e 20 anos; e 8 ± 3 spp. em SAFs com mais de 20 anos. Esses resultados sugerem que fatores como o manejo seletivo desempenham um papel importante na redução da diversidade de espécies ao longo do tempo. Isso contrasta com os valores observados na regeneração natural, onde a diversidade de espécies aumenta à medida que a floresta amadurece (RN Rapp: 5 anos = 23 spp.; 10 anos = 29 spp.; 15 anos = 33 spp.; 20 anos = 36 spp.). Assim, o manejo parece influenciar significativamente a composição de espécies nos SAFs, diferentemente dos processos de sucessão natural.

Composição de espécies

Houve diferença clara entre os SAFs da região de Tomé-Açu -SAFTA e São Félix do Xingu - SAFSFX. O NMDS obtida da análise de ordenação (figura 3) mostra que os SAFs nessas duas regiões têm características distintas quanto à similaridade das espécies. Áreas mais próximas entre si no gráfico indicam maior similaridade florística, enquanto áreas mais distantes indicam maior dissimilaridade.

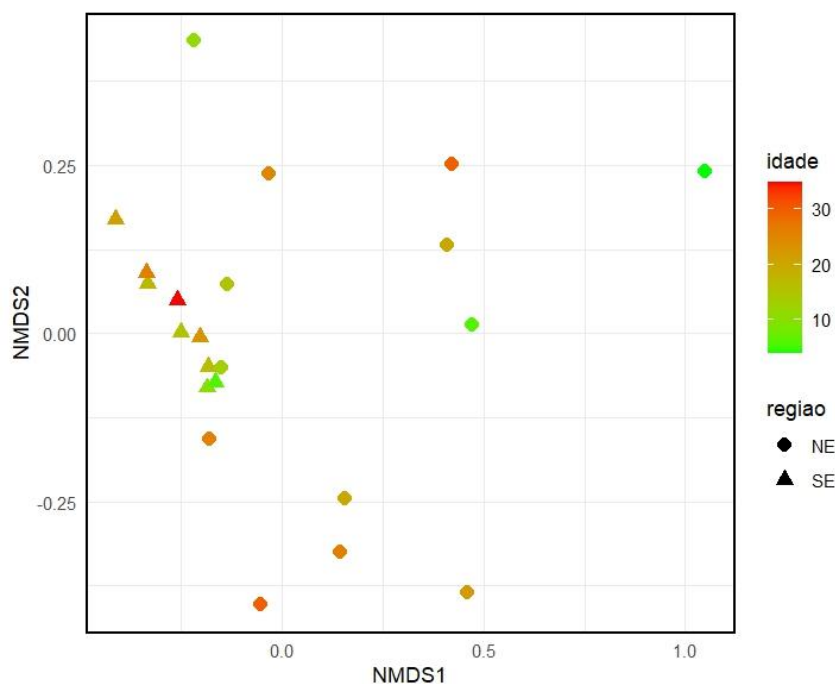


Figura 4. Gráfico 2D resultante do NMDS com a representação visual das relações de similaridade florística entre as 22 áreas de SAFs utilizando o índice de Bray-Curtis, medindo a dissimilaridade entre as áreas com base na composição e abundância das espécies presentes. A idade é representada pelas cores e a região representada pelos símbolos. Triângulo, São Félix do Xingu (SAFSFX); círculo, Tomé-Açu (SAFTA).

Os SAFSFX apresentaram uma alta similaridade entre si, sendo dominados pelo cultivo de cacau, com poucas árvores de sombreamento, entre as quais se destacam *Tabebuia serratifolia* e *Schizolobium parahyba*, espécies amplamente utilizadas para esse fim nos sistemas. Em contraste, os SAFTA mostraram-se mais dispersos em termos de composição arbórea, refletindo maior variabilidade nas espécies preferidas pelos agricultores. Algumas das espécies mais importantes incluem *Carapa guianensis*, *Bertholetia excelsa*, *Swietenia macrophylla*, *Theobroma grandiflorum* e *Tabebuia serratifolia*.

Não foi observada uma distribuição clara das parcelas em função da idade, sugerindo que as mesmas espécies plantadas são mantidas ao longo do tempo, com baixo recrutamento de novas espécies à medida que os sistemas envelhecem. Essa característica dos SAFs de cacau avaliados resulta em uma baixa riqueza de espécies, que permanece estável com o avanço da idade, diferenciando-se substancialmente dos padrões de regeneração natural.

Dominância das espécies de árvores

Em todos os SAFs foram encontrados 5.534 indivíduos arbóreos, 67 espécies e 24 famílias. Apenas um espécime encontrado em todas as áreas estudadas de SAFs não foi identificada, e foi nomeada como “indeterminado”. As espécies mais comuns encontradas nos SAFs foram: *Theobroma cacao* (presente em todos os SAFs), seguido de *Euterpe oleracea* (42%), *Tabebuia serratifolia* (31%), *Cecropia sp.* e *Bertholetia excelsa*, ambas (28%), além de *Swietenia macrophylla* (23%) e *Carapa guianensis* (22%).

Em termos da comunidade de árvores presentes em todos os sistemas, a maior dominância relativa foi de *Theobroma cacao*, representando aproximadamente 45% de toda amostra de espécies inventariadas, seguido da *Euterpe oleracea* (7,12%) e *Carapa guianensis* (6,78), *Bertholetia excelsa* (6,66%). Espécies como *Swietenia macrophylla*, *Hevea brasiliensis*, *Schizolobium parahyba* e *Tabebuia serratifolia*, embora menos dominantes, também desempenham papéis importantes na composição e dinâmica dos SAFs estudados.

Quando agrupados por faixas de idade (figura 4), as espécies que mais dominam os SAFSFX, exceto o cacau foram: *Schizolobium Parahyba* e *Swietenia macrophylla* (até 10 anos), *Tabebuia serratifolia* e *Spondias mombin* (entre 11 e 20 anos) e *Tabebuia serratifolia* e *Parkia sp.* (entre 21 e 35 anos). Já nos SAFTA foram: *Euterpe oleracea* e *Carapa guianensis* nos anos iniciais (até 10 anos), *Bertholetia excelsa*, *Swietenia macrophylla* e *Euterpe oleracea* (entre 11 e 20 anos) e maior distribuição de dominância em idades mais avançadas, com espécies como *Carapa guianensis*, *Euterpe oleracea*, *Hevea brasiliensis* e *Bertholetia excelsa* (entre 21 e 35 anos).

SAFSFX

SAFTA

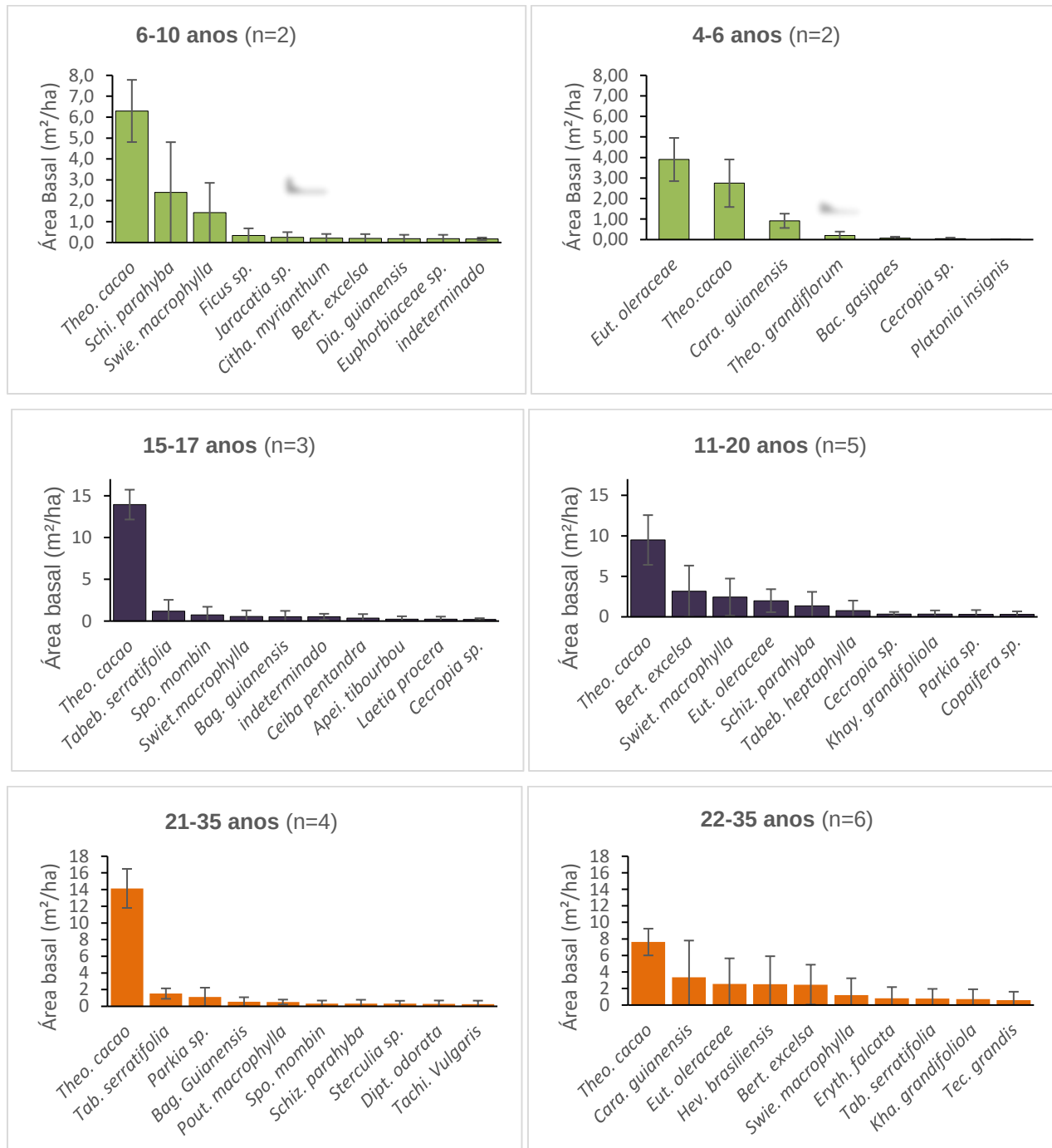


Figura 5. Área basal (média $\pm$ desvio padrão) das dez espécies mais dominantes amostradas nos SAFSFX na região de São Félix do Xingu (SE) e SAFTA na região de Tomé-Açu (NE). Análise agrupadas por idades, com idades de 0 a 10 anos; de 11 a 20 anos; 21 a 35 anos.

2.5 DISCUSSÃO

Embora os SAFs tenham objetivos claramente distintos da restauração ecológica que visa o retorno das condições ecológicas o mais próximo possível da integridade de uma floresta nativa, eles podem servir como uma forma de suporte na Restauração de Paisagens Florestais, recuperando em grande medida a integridade ecológica e os serviços ecossistêmicos. Por isso, avaliar os SAFs

a partir de valores de referência de indicadores de integridade ecológica é valioso para entender quão distantes esses sistemas estão de florestas em regeneração natural de alta integridade.

Este estudo revela que os SAFs com cacau podem recuperar a área basal de forma semelhante às florestas secundárias de alta integridade até cerca de 35 anos. Após esse período, conforme indicado por Middelndorp, Vanacker e Lambin (2018), os SAFs estabilizam devido às práticas de manejo voltadas à produtividade do cacau, que exigem maior incidência de luz. Embora a biomassa acumulada nesses sistemas atinja valores semelhantes aos das florestas secundárias, representando cerca de 88% da biomassa de florestas maduras (148 Mg.ha^{-1}) (POORTER et al., 2016) o manejo para garantir a produtividade do cacau limita o fechamento do dossel e a complexidade estrutural, diferenciando esses sistemas das florestas maduras, com dosséis mais fechados e estratificados.

No que tange à diversidade de espécies, os resultados reforçam a natureza seletiva do manejo agroflorestal. Todos os SAFs avaliados possuem o foco na produtividade do cacau, e demonstraram possuir menor riqueza de espécies florestais, com uma média de 8 espécies por área avaliada, possuindo uma estrutura mais homogênea, com predomínio de espécies para sombra do cacau, como *Tabebuia serratifolia* e *Schizolobium Parahyba*, o que se torna bastante funcional para fornecer condições de bom crescimento e produtividade do cacau (BRAGA; DOMENE; GANDARA, 2019). Em contraste existem aqueles que são mais diversificados, principalmente os SATAS que refletem uma maior variação de espécies arbóreas dentre propriedades do NE, embora em cada SAF a diversidade seja baixa, isso pode evidenciar uma relação direta entre os objetivos individuais dos agricultores e a diversidade nos sistemas (BARROS et al., 2009; HOMMA, 2016). Estudos de Cardozo et al. (2022) corroboram esses achados ao mostrar que a biomassa acumulada em SAFs na Amazônia Oriental pode variar de 35 Mg ha^{-1} em sistemas mais jovens (<10 anos) até 140 Mg ha^{-1} em sistemas mais maduros (>30 anos). No entanto, a riqueza de espécies nos SAFs é substancialmente menor do que em florestas secundárias íntegras, resultado da forte seleção de espécies para funções específicas, como sombreamento e condicionamento de solo para o cacau, além da geração de produtos madeireiros e não madeireiros.

SAFTA X SAFSFX

Apesar das histórias de desenvolvimento distintas entre os Sistemas Agroflorestais de Tomé-Açu (SAFTA) e de São Félix do Xingu, ambos os sistemas compartilham a característica de serem florestas altamente domesticadas, com arranjos e espécies predominantemente selecionadas por suas funções econômicas e produtivas.

Os SAFTA têm uma história de especialização ao longo do tempo, influenciados pelas

práticas agrícolas de ribeirinhos e agricultores de origem japonesa (HOMMA, 2004), que incorporaram uma maior diversidade de culturas arbóreas, ajustando-se a tendências de mercado e inovações de cultivo. Este sistema reflete uma abordagem mais complexa e diversificada, integrando espécies de importância econômica que também cumprem funções ecológicas importantes, como a adubação do solo, a produção de matéria orgânica, o controle biológico e o sombreamento, especialmente para o cacau. O uso de maior densidade de árvores em consórcios com diferentes funções também promove uma ciclagem de nutrientes mais eficiente e uma estrutura de dossel mais complexa.

Por outro lado, os SAFSFX são sistemas mais simplificados, cuja origem está ligada à expansão da cultura do cacau na região de São Félix do Xingu, muitas vezes influenciada por pacotes tecnológicos predefinidos para monocultivos de cacau (IEB; ECOOIDEIA, 2014). Estes SAFs, embora enriquecidos ao longo do tempo com espécies frutíferas e madeiras, tendem a utilizar menos espécies, focando em árvores de rápido crescimento e com copa ampla e rala, como *Schizolobium parahyba* e *Tabebuia serratifolia*, que favorecem o sombreamento ideal para o cacau, mas sem a diversidade ecológica observada nos SAFTA. O manejo desses sistemas é orientado principalmente para otimizar a produção de cacau, resultando na simplificação do arranjo agroflorestal e na padronização dos processos, facilitando o manejo e reduzindo os custos operacionais.

Apesar dessas diferenças, ambos os sistemas apresentam similaridades funcionais. As árvores mais dominantes, em ambos os SAFs, são selecionadas tanto pelo potencial econômico – madeireiro e não madeireiro – quanto pela função de sombreamento e condicionamento do solo para o cacau. Espécies como *Swietenia macrophylla*, *Schizolobium parahyba* e *Tabebuia serratifolia* são frequentemente cultivadas com essa dupla função, enquanto *Carapa guianensis* e *Bertholetia excelsa* contribuem para a renda com produtos não madeireiros.

Nos SAFTA, o manejo é mais diversificado, não sendo focado exclusivamente no cacau, mas também em outras culturas econômicas, como as madeiras e frutíferas. Essa diversificação contribui para uma estrutura mais complexa, com diferentes estratos de árvores, que favorecem uma maior diversidade ecológica e aumentam a resiliência do sistema ao longo do tempo. A maior diversidade de espécies e de estrutura vertical pode resultar em maior capacidade de SAFs de cacau mais diversos em atrair e serem permeáveis à fauna, servindo de corredores ecológicos.

SAF como alternativa de restauração

Apesar dos SAFs recuperarem apenas parcialmente atributos da integridade ecológica de florestas secundárias de alta qualidade, esses sistemas podem ser implantados em áreas sem potencial de regeneração natural, como os SAFSFX implantados em áreas de pastagem exótica sem regeneração. Nesses casos, os SAFs elevam a resiliência das áreas a um ponto que pode desencadear uma trajetória sucessional a uma floresta madura com alta integridade ecológica.

Utilizar os SAFs como um processo agrossucessional pode ser uma estratégia importante em que a área é restaurada com o primeiro objetivo de geração de renda e depois o manejo é interrompido para que a floresta seja o mais íntegra possível (VIEIRA; HOLL; PENEIREIRO, 2009). Essa abordagem é vantajosa, pois, ao contrário de métodos de restauração ativa, como o plantio de mudas ou sementes em áreas totais, que envolvem altos custos e não garantem retorno financeiro imediato, os SAFs oferecem uma alternativa viável e econômica no início do processo de restauração.

Os SAFs desempenham um papel importante na restauração de paisagens, aumentando a conectividade e oferecendo serviços ecossistêmicos importantes em comparação com outras formas de produção. Em paisagens com alta cobertura florestal, os SAFs podem atrair fauna dispersora de sementes, facilitando o recrutamento de espécies nativas por meio da movimentação de animais e sementes (CABRAL; FARIA; MORANTE-FILHO, 2021). Além disso, atuam como elementos de conectividade, fornecendo habitats e recursos essenciais para a fauna, o que facilita o movimento de espécies, promove a troca genética entre populações fragmentadas e contribui para o aumento da diversidade alfa (local) (UDAWATTA; RANKOTH; JOSE, 2019), embora não restitua plenamente a diversidade arbórea.

A valorização dos serviços ecossistêmicos e da biodiversidade nos SAFs é fundamental para que haja maior adoção de SAFs biodiversos. Esse processo é crucial e ajuda a acelerar a transição em direção a um estado mais semelhante ao de uma floresta natural. Os agricultores frequentemente ajustam seus objetivos com base em condições de mercado e na valorização da floresta e de seus produtos, ou ainda, em busca de maior resiliência e recuperação da qualidade ambiental. Essa flexibilidade nos objetivos pode contribuir para a evolução dos SAFs, permitindo que se adaptem às dinâmicas locais e promovam a integridade ecológica desejada.

A intensificação da cacauicultura em SAFs tropicais com o objetivo de aumentar a produtividade e a renda dos agricultores, pode levar a uma significativa redução na cobertura de árvores de sombra, passando de 80% para 40% da estrutura do sistema. Embora essa prática vise melhorar a produção de cacau, ela pode comprometer a diversidade de espécies e afetar

negativamente os serviços ecossistêmicos em termos de biodiversidade ao longo do tempo (STEFFAN-DEWENTER et al., 2007). Para mitigar esses impactos, é fundamental adotar um manejo equilibrado, que preserve a diversidade estrutural e funcional dos SAFs, mantendo as condições ideais de sombra e riqueza de espécies. Uma abordagem estratégica pode envolver mecanismos como Pagamento por Serviços Ambientais (PSA), que valorizam a biodiversidade e os serviços ecossistêmicos além do carbono, como a regulação hídrica, a melhoria da qualidade do solo e o suporte à fauna nativa. Por exemplo, em alguns contextos, programas de PSA podem ser utilizados para compensar a baixa produtividade do cacau em sistemas agroflorestais mais biodiversos, incentivando a inclusão de espécies nativas que promovam maior equilíbrio ecológico. Além disso, a valorização de outros produtos originados em SAFs diversificados, como frutos nativos, mel, ervas medicinais e madeira sustentável, pode criar novas fontes de renda para os agricultores, alinhando a conservação da biodiversidade com a viabilidade econômica, o que pode tornar os sistemas mais próximos da integridade ecológica de florestas nativas.

Alguns tipos alternativos de SAFs, como quintais agroflorestais no nordeste e sudeste paraense, demonstram benefícios significativos para os meios de vida das famílias e apresentam um desempenho elevado em termos de diversidade de espécies. Nesses sistemas, podem ser encontradas entre 25 e 60 espécies arbóreas, dependendo do contexto (MACHADO, 2016; MATOS, 2015; MORAES; COSTA; RAYOL, 2024), podendo ser de 3 a 7 vezes maior que nos SAFs aqui encontrados. Isso evidencia a importância de considerar os sistemas adotados por povos e comunidades tradicionais, que podem contribuir para o aumento da riqueza e diversidade nos SAFs.

2.6 CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Este estudo avaliou o desempenho dos SAFs na Amazônia Oriental, com foco em dois tipos distintos: SAFTA e SAFSFX. Embora os SAFs sejam amplamente referenciados na literatura como estratégias para aumentar os serviços ecossistêmicos e para o ganho de escala na restauração ecológica, é crucial avaliar se esses sistemas estão contribuindo efetivamente para o aumento da integridade ecológica necessária para a restauração da Floresta Amazônica. Nesse estudo, foi possível concluir que os SAFs desempenham um papel importante na restauração ecológica, contribuindo para a integridade ecológica em comparação com florestas secundárias.

As hipóteses formuladas foram parcialmente confirmadas. Em relação à primeira hipótese, os SAFs destinados ao ganho de escala demonstraram, de fato, um papel relevante na obtenção da integridade ecológica, com resultados que, em muitos casos, se aproximaram das florestas

secundárias, especialmente em termos de área basal e biomassa acumulada até os 35 anos. Contudo, ao longo do tempo, a necessidade de manejo voltado à produtividade, especialmente para culturas como o cacau, limitou o fechamento do dossel e a complexidade estrutural dos SAFs, impedindo-os de alcançar o mesmo nível de diversidade ecológica observado em florestas secundárias maduras.

Quanto à segunda hipótese, observou-se que os SAFs apresentam variações significativas entre si em termos de atributos de integridade ecológica, com os SAFTAS com um desempenho levemente superior em termos de biodiversidade no contexto da paisagem. Portanto, para otimizar os benefícios ecológicos dos SAFs, é crucial considerar as especificidades de cada sistema, adaptando práticas de manejo que promovam um equilíbrio entre a produtividade e a conservação da biodiversidade.

Entretanto, a adoção de SAFs em larga escala ainda enfrenta desafios significativos, como a necessidade de maior conhecimento técnico por parte dos produtores, a falta de políticas públicas que incentivem a implementação dos SAFs e a escassez de dados sobre a rentabilidade a longo prazo em diferentes regiões e condições climáticas. Além disso, é importante ressaltar que a simplificação dos sistemas, visando à otimização de processos para economia de recursos, pode ter consequências negativas para a resiliência do sistema, a prestação de serviços ecossistêmicos e a conservação da biodiversidade.

Cadeias produtivas baseadas na comoditização, como cacau, dendê e açaí, assim como o mercado de carbono, podem contribuir para a simplificação dos SAFs e dos sistemas alimentares locais. A busca por simplificação de sistemas e práticas agrícolas padronizadas acabam desconsiderando as características ecológicas de cada local comprometendo a integridade da floresta. Para escalar os SAFs de forma efetiva, recomenda-se assistência técnica inclusiva e participativa, que incluam não apenas a eficiência técnica dos cultivos, mas também diversidade de espécies nos sistemas. Essa abordagem exige conhecimento e pode ser implementada através do desenvolvimento de métodos de restauração em co-desenho com as famílias, considerando as características ecológicas e socioeconômicas, promovendo a diversificação de culturas e apoiando pequenos agricultores no alcance de vários objetivos não somente econômicos.

Em síntese, os SAFs representam uma alternativa viável para a restauração ecológica na Amazônia, mostrando que é possível conciliar produção agrícola com a conservação e recuperação da biodiversidade, desde que se considere a diversidade de práticas e contextos locais. A investigação ressalta a relevância de promover práticas de manejo que incentivem a diversidade de espécies e a resiliência dos ecossistemas, contribuindo assim para um futuro mais sustentável na região.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos os parceiros do projeto Acelerador de Agroflorestas e Restauração (ARA) TNC e AMAZON pelo financiamento, ao Centro Internacional de Pesquisa em Florestas e Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal (CIFOR-ICRAF) Brasil, que possibilitou o desenvolvimento da pesquisa. Agradecemos aos técnicos e pesquisadores do CIFOR-ICRAF Brasil, em especial ao Jimi, Lídia, Francinete, Marcos, Adailton e Jailson e aos estagiários que colaboraram na coleta de dados de campo. Agradecemos também aos colegas do grupo de ecologia da restauração da Embrapa CENARGEN, em especial a Maximiller Ferreira, Ícaro Abreu e a Silvia Rodrigues, que trouxeram insights valiosos para o estudo. Por fim, um agradecimento especial aos agricultores, trabalhadores e trabalhadoras agroflorestais que cederam seu tempo e dedicação para apoiar as ações da pesquisa em campo e por instigar os pesquisadores a construir soluções para os desafios prementes.

3. REFERÊNCIAS

- AGFEED. **Belterra fecha contrato com Natura para plantar agroflorestas e busca 800 milhões.** AGfeed, 5 jun. 2023. Disponível em: <https://agfeed.com.br/esg/belterra-fecha-contrato-com-natura-para-plantar-agroflorestas-e-busca-r-800-milhoes>. Acesso em: 5 jun. 2024
- ALBA-PATÍÑO, D. et al. Social indicators of ecosystem restoration for enhancing human wellbeing. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 174, 2021.
- AMAZON NEWS. **Amazon pledges support to forests and communities in the Brazilian Amazon.** Disponível em: <https://www.aboutamazon.com/news/sustainability/amazon-pledges-support-to-forests-and-communities-in-the-brazilian-amazon>. Acesso em: 5 jun. 2024.
- ANDERSON, S. H. et al. **Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips.** Agroforestry Systems. **Anais**. Jan. 2009.
- ANDRADE, H. J.; SEGURA, M.; SOMARRIBA, E. Above-ground biomass models for dominant trees species in cacao agroforestry systems in Talamanca, Costa Rica. **Agroforestry Systems**, v. 96, n. 4, p. 787–797, 1 abr. 2022.
- AVALOS, G.; CAMBRONERO, M.; ALVAREZ-VERGNANI, C. Allometric Models to Estimate Carbon Content in Arecaceae Based on Seven Species of Neotropical Palms. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 5, 12 jul. 2022.
- BALVANERA, P. et al. Ecosystem Services. Em: **The GEO Handbook on Biodiversity Observation Networks**. Cham: Springer International Publishing, 2017. p. 39–78.
- BARROS, A. V. L. DE et al. Evolução e percepção dos sistemas agroflorestais desenvolvidos pelos agricultores nipo-brasileiros do município de Tomé-Açu, estado do Pará. **Amazonia: Ciência & Desenvolvimento**, v. 5, n. 9, p. 121–152, 2009.
- BEILLOUIN, D. et al. Positive but variable effects of crop diversification on biodiversity and ecosystem services. **Global Change Biology**, v. 27, n. 19, p. 4697–4710, 1 out. 2021.
- BENE, J. G.; BEALL, H. W.; CÔTÉ, A. Trees, food and people: land management in the tropics. **International Development Research Centre**, p. 52, 1977.
- BRAGA, D. P. P. **Sistemas agroflorestais com cacau para recuperação de áreas degradadas, em São Félix do Xingu – PA.** Dissertação mestrado—Piracicaba, SP - Brasil: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” - ESALQ, 2015.
- BRAGA, D. P. P. et al. Implications of smallholder livelihoods for scaling oil palm agroforestry in Brazilian Eastern Amazon. **World Development Sustainability**, v. 4, p. 100128, jun. 2024.
- BRAGA, D. P. P.; DOMENE, F.; GANDARA, F. B. Shade trees composition and diversity in cacao agroforestry systems of southern Pará, Brazilian Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 93, n. 4, p. 1409–1421, 2019.
- BRANCALION, P. H. S. et al. What makes ecosystem restoration expensive? A systematic cost assessment of projects in Brazil. **Biological Conservation**, v. 240, 1 dez. 2019.
- BRAY, J. R.; CURTIS, J. T. An Ordination of the Upland Forest Communities of Southern Wisconsin. **Ecological Monographs**, v. 27, n. 4, p. 325–349, 1957.
- BRIENZA JÚNIOR, S. et al. Sistemas Agroflorestais na Amazônia Brasileira: Análise de 25 Anos de Pesquisas. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 0, n. 60, p. 67–76, 2010.

CABRAL, J. P.; FARIA, D.; MORANTE-FILHO, J. C. Landscape composition is more important than local vegetation structure for understory birds in cocoa agroforestry systems. **Forest Ecology and Management**, v. 481, 1 fev. 2021.

CALVI, M. F. **Fatores de adoção de sistemas agroflorestais por agricultores familiares do Município de Medicilândia, Pará**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Pará, 120 p. 2009.

CAMPOS, M. V. A. et al. Dinâmica dos sistemas agroflorestais com as sinergias socioeconômicas e ambientais: caso dos cooperados nipo-paraenses da cooperativa agrícola mista de Tomé-Açu, Pará. **Research, Society and Development**, v. 11, n. 1, p. e22811121000, 2022.

CARDOZO, E. G. et al. Agroforestry systems recover tree carbon stock faster than natural succession in Eastern Amazon, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 96, n. 5–6, p. 941–956, 1 ago. 2022.

CELENTANO, D. et al. Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 5, p. 1781–1792, 1 out. 2020.

CEPLAC. **Cartilha de Boas Práticas na Lavoura Cacaueira no Estado do Pará**. 1. ed. Belém, Pará - Brasil: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, Secretaria de Inovação, Desenvolvimento Rural e Irrigação, Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira, 2020.

CHAVE, J. et al. Improved allometric models to estimate the aboveground biomass of tropical trees. **Global Change Biology**, v. 20, n. 10, p. 3177–3190, 2014.

CHAZDON, R. L.; GUARIGUATA, M. R. Natural regeneration as a tool for large-scale forest restoration in the tropics: prospects and challenges. **Biotropica**, v. 48, n. 6, p. 716–730, 1 nov. 2016.

CSR/UFGM. **Panorama do Código Florestal Brasileiro**. Belo Horizonte, Brasil, 2023.

DA CRUZ SILVA, A. et al. Diversity and function of tree species in human-modified Atlantic Forest landscapes. **Agroforestry Systems**, v. 97, n. 5, p. 799–812, 1 jun. 2023.

DA SILVA, F. R. et al. **Análises Ecológica no R**. 1a. ed. São Paulo: Nupeea canal 6, Recife Pernambuco, 2022. v. 1

DAGAR, J. C.; GUPTA, S. R.; TEKETAY, D. **Agroforestry for Degraded Landscapes, Recent Advances and Emerging Challenges**. New Delhi, India: Springer, 2020. v. 1

EGOH, B. et al. **Indicators for mapping ecosystem services: a review**. Luxembourg: Publications Office of the European Union; 2012.

EMBRAPA. **Portal WebAmbiente**. Disponível em: <https://www.webambiente.cnptia.embrapa.br/publico/tecnicas.xhtml>. Acesso em: 23 abr. 2023.

ERDMANN, T. K. Agroforestry as a tool for restoring forest landscapes. Em: **Forest Restoration in Landscapes: Beyond Planting Trees**. Springer, New York, 2005. p. 274–279.

EYASU, G.; TOLERA, M.; NEGASH, M. Woody species composition, structure, and diversity of homegarden agroforestry systems in southern Tigray, Northern Ethiopia. **Heliyon**, v. 6, n. 12, 2020.

FAGERHOLM, N. et al. Assessing linkages between ecosystem services, land-use and well-being in an agroforestry landscape using public participation GIS. **Applied Geography**, v. 74, p. 30–46, 2016.

FALESI, Í. C.; DOS SANTOS, W. H.; VIEIRA, L. S. **Os solos da colônia agrícola de Tomé-Açu**. Boletim

Técnico. IPEAN. Belém: n. 44, p 1-93, 1964.

FERREIRA, J. et al. Carbon-focused conservation may fail to protect the most biodiverse tropical forests. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 8, p. 744–749, 1 ago. 2018.

FISCHER, J. et al. Making the UN Decade on Ecosystem Restoration a Social-Ecological Endeavour. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 36, n. 1, p. 20–28, 2021.

FLORENCIA MONTAGNINI. The Contribution of Agroforestry to Restoration and Conservation: Biodiversity Islands in Degraded Landscapes. Em: DAGAR, J. C.; GUPTA, S. R.; TEKETAY, D. (Eds.). **Agroforestry for Degraded Landscapes**. Singapore: Springer, 2020. v. 1p. 445–479.

GANN, G. D. et al. International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. **Restoration Ecology**, v. 27, n. S1, p. 1–46, nov. 2019.

GARRITY, D. et al. **World Agroforestry into the Future**. Nairobi, Kenya: World Agroforestry, 2006.

GASPARINETTI, P. et al. Economic Feasibility of Tropical Forest Restoration Models Based on Non-Timber Forest Products in Brazil, Cambodia, Indonesia, and Peru. **Forests MDPI**, v. 13, n. 11, 1 nov. 2022.

GÖTSCH, E. **O renascer da agricultura. AS-PTA**. Rio de Janeiro. AS-PTA, 1996.

GUERRA, A. et al. Ecological restoration in Brazilian biomes: Identifying advances and gaps. **Forest Ecology and Management**, v. 458, p. 117802, 15 fev. 2020.

GUIDOTTI, V. et al. Números Detalhados Do Novo Código Florestal E. p. 1–10, 2016.

HAEGGMAN, M.; LUNDBERG, J.; MOBERG, F. **Agroforestry, biodiversity and ecosystem services - Creating a resilient and sustainable future by farming with trees**. Agroforestry Network, 2020.

HASANUZZAMAN, M. **Classification of Agroforestry Systems**. Hasanuzzaman's Homepage Dhaka - Bangladesh, 2009. Disponível em: www.hasanuzzaman.webs.com. Acesso em jun 2024.

HOMMA, A. K. O. **Dinâmica dos sistemas Florestais: o caso da colônia agrícola de Tomé-Açu, Pará**. Belém, PA. In: CONGRESSO DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ECONOMIA E SOCIOLOGIA RURAL, 42., 2004, Cuiabá. Dinâmicas setoriais e desenvolvimento regional: artigos completos. Cuiabá: SOBER: UFMT, 2004.

HOMMA, A. K. O. **A imigração japonesa na Amazônia: sua contribuição ao desenvolvimento agrícola**. 2a. ed. Brasília: Embrapa, 2016. v. 1

HOUGHTON, E. **Carbon Offsetting in Agroforestry Systems**. Dissertação de Mestrado - Durham, USA: Duke University, 2020.

IDEFLOR-BIO. **Cartilha de Sistemas Agroflorestais Comerciais estratégia produtiva sustentável para agricultura familiar. Cartilha técnica**. Belém, Pará – Brasil. IDEFLOR-Bio, 22 p. 2021.

IDESAM. **Mapeamento de projetos de carbono florestal no Brasil**. Disponível em: <https://idesam.org/painelprojetoscarbonoflorestal>. Acesso em: 2 jun. 2024.

IEB; ECOOIDEIA. **Estudo Socioeconômico e Diagnóstico Ambiental do Município de São Félix do Xingu**. Ministério do Meio Ambiente. Projeto Pacto Municipal para Redução do Desmatamento em São Félix do Xingu - GCP/BRA/080/EC. Produto 3. 355 p. Brasília: 2014.

IPCC. **SYNTHESIS REPORT OF THE IPCC SIXTH ASSESSMENT REPORT (AR6)**. Contribution

of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, v. 4, n. March, p. 1–36, 2023.

IUCN. **Impact and potential of forest landscape restoration**. Restore our Future - The Bonn Challenge 40 p. 2020.

JOSE, S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: An overview. **Agroforestry Systems**, v. 76, n. 1, p. 1–10, 2009.

JOSE, S. Agroforestry for conserving and enhancing biodiversity. **Agroforestry Systems**, v. 85, n. 1, p. 1–8, maio 2012.

KAZEMI, H.; KLUG, H.; KAMKAR, B. New services and roles of biodiversity in modern agroecosystems: A review. **Ecological Indicators**. Elsevier B.V. 1 out. 2018.

KESSLER, M. et al. Can Joint Carbon and Biodiversity Management in Tropical Agroforestry Landscapes Be Optimized? **PLoS ONE**, v. 7, n. 10, p. 1–7, 2012.

KREMEN, C.; MERENLENDER, A. M. Landscapes that work for biodiversity and people. **Science**, v. 362, n. 6412, 19 out. 2018.

KUYAH, S. et al. Agroforestry delivers a win-win solution for ecosystem services in sub-Saharan Africa. A meta-analysis. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 39, n. 5, 2019.

LOPES, C. L.; CHIAVARI, J. Restauração em escala no Brasil: Fatores essenciais para a sua promoção. **Climate Policy Initiative**, 2024.

MACHADO, D. DE O. **A agrobiodiversidade de quintais agroflorestais em propriedades agrícolas familiares na BR 174, ramal do Pau-Rosa, Manaus, AM**. Dissertação de Mestrado. Manaus - AM, Brasil: Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), 86 p. 2016.

MANSOURIAN, S.; VALLAURI, D.; DUDLEY, N. **Forest restoration in landscapes: Beyond planting trees**. New York, USA: Springer, 2005.

MATOS, C. B. **Diversidade e usos de quintais agroflorestais da comunidade São Domingos, Floresta Nacional do Tapajós, Belterra – PA**. Dissertação de Mestrado - Santarém, PA - Brasil: Universidade Federal do Oeste do Pará, 81 p. 2015.

MAZÓN, M. et al. Monitoring attributes for ecological restoration in Latin America and the Caribbean region. **Restoration Ecology**, v. 27, n. 5, p. 992–999, 2019.

MCNEELY, J. A.; SCHROTH, G. **Agroforestry and biodiversity conservation - Traditional practices, present dynamics, and lessons for the future**. **Biodiversity and Conservation**, fev. 2006.

MEA, M. E. A. **Ecosystems and Human Well-being: Synthesis**. Washington, DC: Island Press, 2005.

MENDONÇA, M. V.; PEDROZA FILHO, M. X. Análise do cacau orgânico de São Félix do Xingu (PA) através da cadeia global de valor. **Agroecossistemas**, v. 11, n. 1, p. 20–42, 2018.

MICCOLIS, A. et al. **Restauração ecológica com Sistemas Agroflorestais: como Conciliar Conservação com produção - opções para Cerrado e Caatinga guia técnico**. 1. ed. Brasília, DF: ICRAF, EMBRAPA, ISPN, 2016. v. 1

MICCOLIS, A. et al. RESTORATION THROUGH AGROFORESTRY: OPTIONS for RECONCILING LIVELIHOODS with CONSERVATION in the CERRADO and CAATINGA BIOMES in Brazil.

Experimental Agriculture, v. 55, n. S1, p. 208–225, 2019.

MICROSOFT NEWS. **Mombak e Microsoft assinam acordo histórico de reflorestamento da Amazônia brasileira**. Disponível em: <https://news.microsoft.com/pt-br/mombak-e-microsoft-assinam-acordo-historico-de-reflorestamento-da-amazonia-brasileira/#:~:text=Mombak>. Acesso em: jun 2024.

MIDDENDORP, R. S.; VANACKER, V.; LAMBIN, E. F. Impacts of shaded agroforestry management on carbon sequestration, biodiversity and farmers income in cocoa production landscapes. **Landscape Ecology**, v. 33, n. 11, p. 1953–1974, 1 nov. 2018.

MILLER, R. P.; NAIR, P. K. R. Indigenous agroforestry systems in Amazonia: from prehistory to today. **Agroforestry Systems**, v. 66, n. 2, p. 151–164, 2006.

MILLER, R. P.; PENN, J. W.; VAN LEEUWEN, J. Amazonian homegardens: Their ethnohistory and potential contribution to agroforestry development. Em: KUMAR, B. M.; NAIR, P. K. R. (Eds.). **Tropical Homegardens: A Time-Tested Example of Sustainable Agroforestry**. Netherlands: Springer, 2006. p. 43–60.

MIRANDA, S. B.; KATO, R. O.; PIRES, M. DAS G. **Quintais Agroflorestais e Segurança Alimentar de Agricultores Familiares no Baixo Irituia, Nordeste Paraense**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS, 8., 2011, Belém, PA. Anais. Belém, PA: SBSAF: Embrapa Amazônia Oriental: UFRA: CEPLAC: EMATER: ICRAF, 2011

MORAES, J. L.; COSTA, K. J. S. DA; RAYOL, B. P. Composição e diversidade de plantas nos quintais agroflorestais da comunidade de Genipaúba, Santa Bárbara do Pará. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 19, n. 1, p. 15–22, 12 fev. 2024.

MORTIMER, R.; SAJ, S.; DAVID, C. Supporting and regulating ecosystem services in cacao agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 92, n. 6, p. 1639–1657, 1 dez. 2018.

NAIR, P. K. R. Classification of agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 3, n. 2, p. 97–128, 1985.

NAIR, P., K., R. **Valuing Agroforestry Systems**. Advances in Agroforestry. v. 2, 317 p. Springer, 2004.

NAIR, P. K. R. Climate Change Mitigation: A Low-Hanging Fruit of Agroforestry. Em: NAIR, P. K. R.; GARRITY, D. (Eds.). **Agroforestry, the future of global land use**. 1. ed. London, UK: Springer, 2012. v. 9p. 31–67.

NAIR, P. K. R.; GARRITY, D. **Agroforestry, the future of global land use**. London: Springer, 2012. v. 9

NOTARO, M.; GARY, C.; DEHEUVELS, O. Plant diversity and density in cocoa-based agroforestry systems: how farmers' income is affected in the Dominican Republic. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 3, p. 1071–1084, 2020.

NUNES, S. et al. **Oportunidades para Restauração Florestal no Estado do Pará**. Belém, PA: IMAZON, 2017.

NUNES, S. et al. Unmasking secondary vegetation dynamics in the Brazilian Amazon. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 3, 2020.

ONU. **Objetivos do desenvolvimento sustentável**. New York, USA, 2015.

PACHECO, N. A.; BASTOS, T. X. **Caracterização Climática do Município de Tomé-Açu, PA**. Documentos. EMBRAPA. Belém, PA - Brasil. 2001.

PACTO. **Pacto pela restauração da Mata Atlântica: referencial dos conceitos e ações de restauração florestal**. São Paulo, Brasil: LERF/ESALQ: Instituto BioAtlântica, 2009.

PENEIREIRO, F. M. **Sistemas Agroflorestais dirigidos pela sucessão natural: um estudo de caso**. Dissertação mestrado—São Paulo: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ, 138 p. 1999.

PEREIRA NETO, J. A. **Estoques de Carbono em Sistemas Agroflorestais de Cacaueiro como Subsídios a Políticas de Serviços Ambientais**. Tese de Doutorado. Universidade Federal do Pará, 212 p. 2012.

POORTER, L. et al. Biomass resilience of Neotropical secondary forests. **Nature**, v. 530, n. 7589, p. 211–214, 11 fev. 2016.

PORRO, R. **Alternativa Agroflorestal na Amazônia em Transformação**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2009.

PORRO, R. et al. Agroforestry in the Amazon Region: A Pathway for Balancing Conservation and Development. Em: NAIR, P. K. R.; GARRITY, D. (Eds.). **Agroforestry - The Future of Global Land Use**. Advances i ed. Florida, USA: Springer, 2012. p. 391–428.

QUANDT, A.; NEUFELDT, H.; GORMAN, K. Climate change adaptation through agroforestry: opportunities and gaps. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 60, p. 101244, 2023.

QUARESMA, A. P. et al. Composição florística e faunística de quintais agroflorestais da agricultura familiar no nordeste paraense. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 5, p. 76–84, 2015.

RAMOS, C. J. G. et al. **Análise econômica de um sistema agroflorestal sucessional no município de Tomé-Açu, Pará**. (EMBRAPA, Ed.)20º Seminário de Iniciação Científica e 4º Seminário de Pós-graduação da Embrapa Amazônia Oriental. **Anais...**Belém: EMBRAPA, set. 2016.

RAMOS, H. M. N. et al. Above and belowground carbon stocks of two organic, agroforestry-based oil palm production systems in eastern Amazonia. **Agroforestry Systems**, v. 92, n. 2, p. 221–237, 1 abr. 2018.

REGENERA-AMAZÔNIA. **Recomendações para o monitoramento da Regeneração Natural na Amazônia**. Documento Técnico. INPA. Manaus, 24p. Disponível em: <http://regenera-amaz.pdbff.org.br/publicacoes/>.

REICH, K. F. et al. Do different indices of forest structural heterogeneity yield consistent results? **IForest**, v. 15, n. 5, p. 424–432, 1 out. 2022.

RESET UOL. **Amazon investe 90 milhões para gerar crédito de carbono na Amazônia**. Disponível em: <https://capitalreset.uol.com.br/carbono/exclusivo-amazon-investe-r-90-milhoes-para-gerar-credito-de-carbono-na-amazonia/>. Acesso em: 5 jun. 2024a.

RESET UOL. **Como a Natureza quer transformar o cultivo do óleo de palma no Pará**. Disponível em: <https://capitalreset.uol.com.br/empresas/companhias-abertas/como-a-natura-quer-transformar-o-cultivo-do-oleo-de-palma-no-para/>. Acesso em: 5 jun. 2024b.

RESET UOL. **Carbono, madeira e agrofloresta: modelos de negócio para reflorestar**. Disponível em: <https://capitalreset.uol.com.br/amazonia/reflorestamento/carbono-madeira-e-agrofloresta-modelos-de-negocio-para-reflorestar/>. Acesso em: 5 jun. 2024c.

REY BENAYAS, J. M.; BULLOCK, J. M. Restoration of Biodiversity and Ecosystem Services on Agricultural Land. **Ecosystems**, v. 15, n. 6, p. 883–899, set. 2012.

ROHWER, Y.; MARRIS, E. Ecosystem integrity is neither real nor valuable. **Conservation Science and Practice**, v. 3, n. 4, 1 abr. 2021.

ROSENFELD, M. F. et al. Ecological integrity of tropical secondary forests: concepts and indicators. **Biological Reviews**, v. 98, n. 2, p. 662–676, 1 abr. 2023.

SANOU, L. et al. Drivers of farmers' decisions to adopt agroforestry: Evidence from the Sudanian savanna zone, Burkina Faso. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 34, n. 2, p. 116–133, 2019.

SANTOS, S. R. M. DOS; KATO, O. R.; TOURINHO, M. M. Diversidade florística e estoque de carbono de sistemas agroflorestais em dois municípios do nordeste paraense, Brasil. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi. Cienc. Nat.**, v. 14, n. 1, p. 31–42, 2019.

SANTOS, P. Z. F.; CROUZEILLES, R.; SANSEVERO, J. B. B. Can agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem service provision in agricultural landscapes? A meta-analysis for the Brazilian Atlantic Forest. **Forest Ecology and Management**, v. 433, p. 140–145, 15 fev. 2019.

SCHMINK, M. et al. From contested to 'green' frontiers in the Amazon? A long-term analysis of São Félix do Xingu, Brazil. **Journal of Peasant Studies**, v. 46, n. 2, p. 377–399, 23 fev. 2019.

SCHROTH, G. et al. **Agroforestry and Biodiversity Conservation in Tropical Landscapes**. Whashington, DC - USA: Island Press, 2004. v. 1

SHONO, K. et al. Assisted natural regeneration: harnessing nature for restoration. **Unasylva**, v. 252, p. 71–81, 2020.

SILVA, E. S. A. et al. **SAFLORA - sistemas agroflorestais (SAFs) para a restauração produtiva de Reserva Legal em propriedades de agricultores familiares no sudeste paraense**. XII Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais. **Anais**. São Paulo, Brasil: Sociedade Brasileira de Sistemas Agroflorestais, 2021.

SILVA-GALICIA, A. et al. Weight-of-evidence approach for assessing agroforestry contributions to restore key ecosystem services in tropical dry forests. **Agroforestry Systems**, v. 97, n. 2, p. 151–161, 2023.

SINCLAIR, F.; COE, R. I. C. THE OPTIONS by CONTEXT APPROACH: A PARADIGM SHIFT in AGRONOMY. **Experimental Agriculture**, v. 55, n. S1, p. 1–13, 1 jun. 2019.

SOARES-FILHO, B. et al. Cracking Brazil's Forest Code. **Science**, v. 344, n. 6182, p. 363 LP – 364, 2014.

SOMARRIBA, E. et al. Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 173, p. 46–57, 1 jul. 2013.

SOUSA, R. DA P. et al. **Governança socioambiental na Amazônia: Agricultura familiar e os desafios para a sustentabilidade em São Félix do Xingu – Pará**. Instituto Internacional de Educação do Brasil (IEB). Belém, PA – Brasil. 252 p. 2016.

STEFFAN-DEWENTER, I. et al. Tradeoffs between income, biodiversity, and ecosystem functioning during tropical rainforest conversion and agroforestry intensification. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, v. 104, n. 12, p. 4973–4978, 2007.

UDAWATTA, R. P.; RANKOTH, L. M.; JOSE, S. Agroforestry and biodiversity. **Sustainability (Switzerland)**, v. 11, n. 10, 1 maio 2019.

UNEP; FAO. The UN Decade on Ecosystem Restoration 2021-2030. **UNEP/FAO Factsheet**, p. 4, 2020.

VAN NOORDWIJK, M. et al. People-centric nature-based land restoration through agroforestry: A typology. **Land**, v. 9, n. 8, 1 ago. 2020.

VAN NOORDWIJK, M. Agroforestry-based ecosystem services: Reconciling values of humans and nature in sustainable development. **Land**, v. 10, n. 7, 1 jul. 2021.

VAN NOORDWIJK, M.; SUNDERLAND, T. C. H. Productive landscapes: what role for forests, trees and agroforestry? **European Tropical Forest Research Network (ETFRN) News** 56, p. 9–16, nov. 2014.

VIEIRA, D. L. M.; HOLL, K. D.; PENEIREIRO, F. M. **Agro-successional restoration as a strategy to facilitate tropical forest recovery**. *Restoration Ecology*, 2009.

WCF; INSTITUTO ARAPYAUÍ; WRI BRASIL. **Viabilidade econômica de sistemas produtivos com cacau**. São Paulo. 48 p. 2021.

WRI. **VERENA - Valorização econômica do reflorestamento com espécies nativas**. Casos de sucesso. São Paulo. 40 p. 2021. Disponível em <http://www.coalizaobr.com.br/home/phocadownload/biblioteca/Estudo-ProjetoVERENA.PDF>. Acesso em: jul. 2024.

ZANNE, A. E. et al. **Global wood density database**. *Dryad*. Data from: Towards a worldwide wood economics spectrum. 2009.