

**THAMIRES CAMPOS DE ALMEIDA**

**RELAÇÃO ENTRE DIVERSIDADE DE ESPÉCIES,  
ESTOQUE DE CARBONO E VARIÁVEIS CLIMÁTICAS EM SISTEMAS  
AGROFLORESTAIS NA AMAZÔNIA: UMA METANÁLISE**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Sílvio Nolasco de Oliveira Neto

Coorientador: Pedro Manuel Villa

**VIÇOSA - MINAS GERAIS  
2022**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade  
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

A447r  
2022  
Almeida, Thamires Campos de, 1996-  
Relação entre diversidade de espécies, estoque de carbono e  
variáveis climáticas em sistemas agroflorestais na Amazônia: uma  
metanálise / Thamires Campos de Almeida. - Viçosa, MG, 2022.  
1 dissertação eletrônica (53 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Sílvio Nolasco de Oliveira Neto.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa,  
Departamento de Engenharia Florestal, 2022.

Referências bibliográficas: f. 41-50.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2022.771>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Agrossilvicultura - Amazônia. 2. Biodiversidade - Amazônia. 3.  
Mudanças climáticas. I. Oliveira Neto, Sílvio Nolasco de, 1965-. II.  
Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia  
Florestal. Mestrado em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 634.926

Bibliotecário(a) responsável: Euzébio Luiz Pinto CRB-6/3317

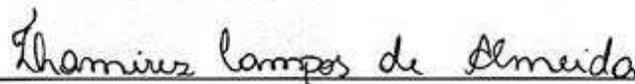
THAMIRES CAMPOS DE ALMEIDA

RELAÇÃO ENTRE DIVERSIDADE DE ESPÉCIES,  
ESTOQUE DE CARBONO E VARIÁVEIS CLIMÁTICAS EM SISTEMAS  
AGROFLORESTAIS NA AMAZÔNIA: UMA METANÁLISE

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 03 de outubro de 2022.

Assentimento:



Thamires Campos de Almeida  
Autora



Silvio Nolasco de Oliveira Neto  
Orientador

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e por iluminar a minha caminhada.

À minha família, especialmente à minha mãe, Maria Cleusa, e minhas irmãs Adriana e Jéssica por todo amor, carinho e apoio de sempre.

À Rafaela pelo amor, companheirismo e todo o incentivo.

À Débora e Fabrícia, pela amizade e companheirismo diário nos últimos anos.

Da mesma maneira, agradeço a todos meus amigos de Viçosa e Pirapora, que alegam a minha vida e que tanto me fortalecem.

Ao professor Sílvio Nolasco de Oliveira Neto pela orientação, amizade, oportunidades oferecidas e por toda a compreensão e apoio desde o início desta etapa.

Ao professor Pedro Manuel Villa pela coorientação, parceria, paciência e por todos ensinamentos. Também agradeço ao Rodrigo pelo apoio na execução desse trabalho.

Ao professor Laércio Antônio Gonçalves Jacovine e ao Hugo Galvão Cândido, pela solicitude em participar da banca.

À Universidade Federal de Viçosa, pela excelência em ensino, pesquisa e extensão.

Ao Departamento de Engenharia Florestal e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, pela oportunidade de desenvolver esse trabalho e, em especial, ao Alexandre, pela disponibilidade e suporte ao longo desses anos.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudos.

A todos aqueles que me apoiaram e contribuíram de alguma maneira para essa conquista.

Muito obrigada!

*“O correr da vida embrulha tudo.  
A vida é assim: esquenta e esfria, aperta  
e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta.  
O que ela quer da gente é coragem.”  
- Guimarães Rosa*

## RESUMO

ALMEIDA, Thamires Campos de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2022. **Relação entre diversidade de espécies, estoque de carbono e variáveis climáticas em sistemas agroflorestais na Amazônia: Uma metanálise.** Orientador: Sílvio Nolasco de Oliveira Neto. Coorientador: Pedro Manuel Villa.

A Amazônia apresenta um dos maiores reservatórios de biodiversidade e carbono (C) do planeta. No entanto, devido às alterações no uso do solo e mudanças climáticas, o equilíbrio desse ecossistema vem sendo fortemente perturbado, sendo importante desenvolver mecanismos que propiciem a redução do desmatamento na região e mitigação das mudanças no clima. Nesse sentido, os sistemas agroflorestais (SAFs) são estratégicos, visto as importantes funções ambientais que exercem, como o incremento da biodiversidade e promoção de serviços ecossistêmicos. Entretanto, pouco se sabe a respeito dos efeitos de variáveis climáticas no armazenamento de carbono nos SAFs, bem como dos padrões referentes aos cobenefícios da relação diversidade-estoque de carbono. Portanto, objetivou-se realizar uma metanálise para avaliar a relação entre riqueza de espécies e estoque de carbono de sistemas agroflorestais em áreas de domínio amazônico, bem como a influência do clima sobre o estoque de C. Para isso, foi realizada extensa revisão de literatura em bancos de dados abrangentes, com o intuito de selecionar artigos científicos publicados nas últimas três décadas. Foram incluídos nessa pesquisa estudos que se enquadraram em todos os critérios predeterminados. Vinte e duas variáveis climáticas padronizadas foram obtidas para todos os locais de estudo. Para avaliar a normalidade dos dados utilizou-se o Teste de Shapiro-Wilk, e para comparar os valores médios entre tipos de sistemas agroflorestais (simples e complexos) o Teste de Mann-Whitney. As variáveis climáticas foram resumidas através da análise de componentes principais, sendo as mais explicativas selecionadas através da análise de correlação de Pearson. Modelos lineares de efeitos mistos foram usados para testar os efeitos do clima sobre o estoque carbono, assim como a relação riqueza-estoque de carbono. Para selecionar a função de ligação mais adequada, foi realizado o diagnóstico dos modelos a partir do teste da distribuição gaussiana dos erros e verificação das distribuições de resíduos, utilizando o gráfico Q-Q. Para realizar as análises foram usados

diferentes pacotes no Rstudio. As médias para a riqueza de espécies dos SAFs complexos e simples foram de 13,66 e 2,88 espécies, respectivamente. Para o estoque de carbono, os SAFs complexos apresentaram valor médio de 55,05 Mg/ha e os simples 36,21 Mg/ha. Entretanto, não houve diferença significativa entre os tipos de SAFs em relação ao estoque de carbono. Dentre as principais variáveis climáticas selecionadas como importantes preditores, apenas o intervalo diurno médio possuiu efeito significativo no estoque de carbono, sendo este negativo. Houve significativa relação positiva de cobenefício entre a riqueza de espécies e o armazenamento de carbono acima do solo, onde a riqueza foi a variável que mais explicou a variação do estoque de carbono nos SAFs. Dessa maneira, foi possível concluir que os sistemas agroflorestais, sobretudo os SAFs complexos, possuem destacado potencial para a conservação da biodiversidade e mitigação das mudanças climáticas de forma simultânea na região amazônica.

Palavras-chave: Floresta Amazônica. Agrossilvicultura. Biodiversidade. Serviços ecossistêmicos. Cobenefícios. Mudanças climáticas.

## ABSTRACT

ALMEIDA, Thamires Campos de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, October, 2022. **Relationship between species diversity, carbon stock and climate variables in agroforestry systems in the amazon: a meta-analysis.** Adviser: Sílvio Nolasco de Oliveira Neto. Co-Adviser: Pedro Manuel Villa.

The Amazon has one of the largest reservoirs of biodiversity and carbon on the planet. However, due to changes in soil use and climate change, the balance of this ecosystem has been heavily disturbed, and it is important to develop controls to allow the reduction of deforestation in the region and mitigation of the climate change. In this sense, agroforestry systems (AFS) are strategic, given the important environmental functions they perform, such as increasing biodiversity and promoting ecosystemic services. However, little is known about the effects of climate variations on carbon storage in AFS, as well as the patterns referring to the co-benefits of the diversity-carbon stock relationship. Therefore, the study aimed to carry out a meta-analysis to evaluate the relationship between species richness and carbon stock of agroforestry systems in areas of the Amazon domain, as well as the influence of climate on C stock. It was carried out an extensive literature review on broad databases, in order to select scientific papers published in the last three decades. Studies that met all the predetermined criteria were included in this research. Twenty-two standardized climate variables were obtained for all the study sites. The Shapiro-Wilk Test was used to assess the normality of data, and the Mann-Whitney Test was used to compare the average values between types of simple and complex agroforestry systems. The climatic variables were summarized through analysis of the principal components, and the most explanatory variables selected through Pearson's correlation analysis. Linear mixed-effects models were used to test the effects of the climate on the carbon stock, as well as the richness-stock relationship of C. To select the most appropriate link function, the models were diagnosed using the Gaussian distribution test of the errors and verification of the residual distributions, using the Q-Q graph. To perform the analysis, different packages were used on Rstudio. The averages for species richness of complex and simple AFS were 13.66 and 2.88 species,

respectively. For the carbon stock, the complex AFS average value was 55.05 Mg/ha, and the simple ones 36.21 Mg/ha. However, there was no significant difference between the types of AFS in terms of carbon stock. Among the main climatic variables selected as important predictors, only the average daytime interval had a significant effect on carbon stock, which was negative. There was a significant positive co-benefit relationship between species richness and aboveground carbon storage, where richness was the variable that better explained the variation in carbon stock in the AFS. Thus, it was possible to conclude that agroforestry systems, especially complex AFS, have outstanding potential for conserving biodiversity and mitigating climate change simultaneously in the Amazon region.

Keywords: Amazon rainforest. Agroforestry. Biodiversity. Ecosystem services. Co-benefits. Climate changes.

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
2. OBJETIVOS.....	15
2.1. Objetivo geral.....	15
2.2. Objetivos específicos.....	15
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	16
3.1. Levantamento de dados .....	16
3.2. Sistematização de dados.....	18
3.3. Dados climáticos.....	19
3.4. Análises .....	20
4. RESULTADOS .....	22
5. DISCUSSÃO.....	29
6. CONCLUSÕES.....	40
REFERÊNCIAS.....	41
APÊNDICES.....	51

## 1. INTRODUÇÃO

A Amazônia é a maior extensão de floresta tropical do mundo, e apresenta um dos maiores reservatórios de biodiversidade e carbono florestal do planeta, sendo, dessa maneira, um componente chave do sistema climático da Terra (PERES et al., 2016; ZHANG et al., 2015). Segundo Gomes et al. (2019), esta região engloba, aproximadamente, 13% de todas as espécies arbóreas do mundo e 49% daquelas situadas em florestas tropicais úmidas. Diante desta alta biodiversidade, a floresta amazônica fornece uma gama de serviços ecossistêmicos de regulação, provisão e serviços culturais, fundamentais para o bem-estar humano em escala local e global (EGUIGUREN et al., 2020).

No entanto, o equilíbrio da floresta amazônica vem sendo fortemente perturbado há décadas, mediante à crescente escala e intensidade de atividades antrópicas (FEARNSIDE, 2009). O ponto chave no processo de desmatamento da Amazônia consiste na combinação dos fatores antropogênicos atrelados às mudanças no uso da terra, sendo estes a exploração madeireira e o uso generalizado do fogo, para posterior implantação de sistemas como pastagens, tal como monoculturas florestais e agrícolas (AZEVEDO-RAMOS et al., 2015; DAVIDSON et al., 2012; LOVEJOY e NOBRE, 2018).

Em virtude do desmatamento e degradação florestal, são gerados impactos negativos não somente em escala local (ex. povos tradicionais e ecossistemas), mas também consequências em escala global, como por exemplo as mudanças climáticas (FEARNSIDE, 2009; MOUTINHO et al. 2016). Isso pois, a conversão de florestas tropicais influencia diretamente a perda de biodiversidade e produtividade dos ecossistemas, portanto, gerando alterações na dinâmica do carbono, representando assim a segunda maior fonte de emissões de dióxido de carbono induzidas pelo ser humano (FAUSET et al., 2015; HUBAU et al., 2020; MOUTINHO et al., 2016; PORRO et al., 2012; SOLIS et al., 2020; WALKER et al., 2020). Apesar de que o desmatamento ainda é a maior ameaça à Amazônia, o ponto de inflexão para o ecossistema amazônico se transformar em paisagens não florestais consiste também nas mudanças climáticas,

que vem sendo, cada vez mais, motivo de preocupação mundial (GOMES et al., 2019; LOVEJOY e NOBRE, 2018).

As mudanças climáticas combinadas com o desmatamento podem ocasionar, até 2050, intensa fragmentação da floresta amazônica, resultando em perda de até 58% da sua riqueza de espécies arbóreas (GOMES et al., 2019). Ainda, de acordo com Hubau et al. (2020), esses fatores podem inferir em grande diminuição do armazenamento de carbono que, nos últimos 30 anos, já está em declínio progressivo na região devido ao incremento da mortalidade, assim como do menor tempo de estocagem na biomassa acima do solo. A combinação dos efeitos do desmatamento e das mudanças climáticas potencializa a perda de biodiversidade, assim como a redução na provisão de importantes serviços ecossistêmicos na Amazônia, acarretando danos ambientais em proporções regionais e globais (GOMES et al., 2019; WALKER et al., 2020). Portanto, um desafio para a humanidade consiste em desenvolver e implementar mecanismos que promovam a redução das mudanças climáticas e do desmatamento, na mesma medida que se incrementa biodiversidade e estoques de carbono (MATOS et al., 2019), isto é, estratégias que proporcionem cobenefícios ambientais.

Pelo fato de o desmatamento estar diretamente associado às mudanças no uso da terra, é imprescindível a utilização de modelos de produção sustentáveis, que sejam condizentes com adequada gestão dos recursos naturais (PORRO et al., 2012). Esses modelos estão relacionados a práticas de diversificação de culturas, no entanto, há grandes diferenças no desempenho dessas no que diz respeito à mitigação e adaptação às mudanças do clima (BEILLOUIN et al., 2021). Nesse sentido, os sistemas agroflorestais (SAFs) podem ser estratégicos. Entre as práticas sustentáveis de uso do solo, os SAFs possuem níveis mais elevados de diversidade de espécies e destacado potencial de sequestro de carbono (CHEN et al., 2015; NAIR et al., 2014; TORRES et al., 2014a), podendo desempenhar importante função na mitigação das mudanças climáticas globais (ZOMER et al., 2022), além de proporcionar a conservação da biodiversidade e provisão de serviços ecossistêmicos, sem comprometer a produtividade (CELENTANO et al., 2020; KUMAR e NAIR, 2011; TORRALBA et al., 2016).

Os sistemas agroflorestais são conceituados como modelos de uso da terra através de plantas lenhosas perenes associadas à agricultura e/ou pecuária, com interação econômico-ecológica entre seus componentes, em determinado arranjo espacial e/ou temporal (NAIR, 1993). Tais agroecossistemas vêm ganhando atenção, no que diz respeito à mitigação das mudanças climáticas, desde a adoção do Protocolo de Kyoto, em 1997 (JOSE e BARDHAN, 2012). A partir de então, vêm sendo reconhecidos mundialmente como sistemas potenciais à redução de Gases de Efeito Estufa (GEE), por se tratarem de importantes sumidouros de carbono em razão do sequestro e fixação de CO<sub>2</sub> por meio da vegetação (TORRES et al., 2014a). Os SAFs podem ser potenciais não apenas no que tange às mudanças no clima, mas também para enfrentar demais desafios associados ao futuro do uso da terra no planeta, como degradação do solo, segurança alimentar e pobreza, sendo capazes de abordar muitos desses problemas de maneira integrada (GARRITY, 2012; VILLA et al., 2020a).

Os sistemas agroflorestais têm a capacidade de reproduzir condições estruturais semelhantes às de ecossistemas naturais, em virtude das variadas possibilidades de arranjos espaciais e temporais de espécies de diferentes hábitos vegetativos (NAIR, 2013; VASCONCELLOS e BELTRÃO, 2018). Promovem simultaneamente a oferta de inúmeros serviços ecossistêmicos (CHATTERJEE et al., 2018; KUMAR e NAIR, 2011; SCHROTH et al., 2016; SUÁREZ et al., 2021; TORRALBA et al., 2016; VILLA et al., 2018), além de poderem exercer função de corredores ecológicos, possibilitando a conectividade entre fragmentos florestais e movimentação da fauna silvestre entre os mesmos (FORMAN, 1983; SIMBERLOFF e COX, 1987). Ainda, por meio dos SAFs há a produção de bens como alimentos, forragem, madeira, ervas medicinais, entre outros, proporcionando inúmeros benefícios ao bem-estar humano, autossuficiência alimentar e geração de renda à família agricultora (BROWN et al., 2018; NAIR, 2013; OLIVEIRA et al., 2020). Os SAFs podem melhorar a produtividade agrícola e ser mais lucrativos que práticas convencionais de monocultura (WALDÉN et al., 2020), podendo compor importante estratégia para reorientar os modos de uso da terra na Amazônia (PORRO et al., 2012).

No tocante à mitigação das mudanças climáticas, é preciso levar em consideração que o potencial de sequestro e estoque de carbono varia de acordo com a prática agroflorestal utilizada (ALBRECHT e KANDJI, 2003; KUMAR, 2006), que pode ser complexa ou simples. Sistemas agroflorestais complexos, ou biodiversos, são aqueles que possuem maior diversidade florística, ao passo que os SAFs simples possuem pouca variedade de espécies (MICCOLIS et al., 2016). Modelos de sistemas agroflorestais que permitam maior riqueza de espécies podem ser mais potenciais ao armazenamento de carbono, em virtude de que a biodiversidade contribui para o amortecimento de inúmeras perturbações ambientais e, dessa maneira, para o melhor funcionamento do ecossistema como um todo (CARDOZO et al., 2018; DYOLA et al., 2022; HONG et al., 2021; TAMBURINI et al., 2020).

Ainda há muitas controvérsias quanto a relação direta entre diversidade florística e produção de biomassa em ecossistemas tropicais (OUYANG et al., 2016), sobretudo em paisagens tropicais antropizadas (OSURI et al., 2020). Entender a relação entre essas variáveis possui grande utilidade, pois, a partir disso, é possível identificar estratégias que promovam, simultaneamente, a conservação da biodiversidade e a redução dos efeitos das mudanças climáticas (MCNICOL et al., 2017). Sob outro ponto de vista, fatores ambientais, como variáveis climáticas, podem ter efeitos significativos na biodiversidade e no funcionamento do ecossistema (RODRIGUES et al., 2022; VILLA et al., 2020a), principalmente diante do cenário de alterações no clima global. Portanto, é relevante, também, a realização de estudos que utilizem variáveis climáticas como preditoras da diversidade de espécies e do estoque de carbono em amplas escalas, para promover maior compreensão acerca dos impactos das mudanças climáticas nesses atributos ecológicos, assim como identificar sistemas chave para adaptação às variações no clima (BENNETT et al., 2020; HONG et al., 2021).

Essas lacunas do conhecimento são ainda mais sobressalentes na agrossilvicultura. Poucas pesquisas de campo verificaram o potencial dos sistemas agroflorestais em exercer funções ambientais, inclusive na região amazônica (CELENTANO et al., 2020). Além disso, a relação entre riqueza de espécies e o estoque de carbono ainda não é clara para esses sistemas (CARDOZO et al., 2018), onde o

mesmo é válido para os efeitos do clima sobre a estocagem de C. É importante a realização de pesquisas que possibilitem o entendimento da capacidade dos sistemas agroflorestais para a conservação da biodiversidade e o estoque de carbono, bem como dos fatores que influenciam os níveis de tal potencial (SANTOS et al., 2019), à exemplo da relação existente entre riqueza de espécies e carbono, bem como os efeitos do clima na variação desses atributos ecológicos.

Neste contexto, este estudo teve por objetivo realizar uma metanálise para avaliar a relação existente entre diversidade de espécies e estoque de carbono em sistemas agroflorestais em domínio amazônico, bem como a influência do clima sobre o armazenamento de carbono. Esta pesquisa metanalítica responde às seguintes perguntas (a) Qual a riqueza de espécies e estoque de carbono em sistemas agroflorestais complexos e simples na Amazônia? (b) Há diferença entre os sistemas agroflorestais complexos e simples em relação ao estoque de carbono? (c) Quais as variáveis climáticas apresentam maior explicação do gradiente climático ao longo da região amazônica? (d) Quais são os efeitos principais das variáveis climáticas sobre o armazenamento de carbono? (e) Existe relação de cobenefício entre a riqueza de espécies e o estoque de carbono nos sistemas agroflorestais da Amazônia? Com este estudo espera-se identificar as potencialidades dos sistemas agroflorestais para a conservação da biodiversidade, mitigação e adaptação às mudanças climáticas na Amazônia.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Avaliar as relações existentes entre diversidade de espécies, estoque de carbono acima do solo e variáveis climáticas em sistemas agroflorestais na região amazônica.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Determinar a variação da riqueza de espécies e estoque de carbono entre sistemas agroflorestais complexos e simples;
- Identificar as principais variáveis climáticas com maior explicação do gradiente climático ao longo da região amazônica;
- Avaliar os efeitos das variáveis climáticas sobre a estocagem de carbono. Com isso, espera-se conhecer a contribuição relativa sobre a variação do estoque de carbono dos SAFs na Amazônia;
- Determinar a relação entre riqueza de espécies e estoque de carbono (cobenefício);
- Identificar as potencialidades dos sistemas agroflorestais para a conservação da biodiversidade, mitigação e adaptação às mudanças climáticas na Amazônia.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Levantamento de dados

Para a seleção dos artigos científicos a serem utilizados como fonte de dados nesta pesquisa metanalítica, foi realizada extensa revisão de literatura nos bancos de dados SciELO, Web of Science, CAPES CAFe, Scopus e Mendeley, abarcando os estudos publicados ao longo dos últimos 32 anos (1990-2022). As buscas foram realizadas empregando combinações das palavras-chave “Sistemas agroflorestais”, “Agrofloresta”, “Agrossilvicultura”, “Sistemas silviagrícolas”, “Amazônia”, “Riqueza”, “Diversidade”, “Florística”, “Carbono”, “Estoque de carbono”, “Biomassa”, “Carbono no solo”, “Fertilidade do solo”, “Matéria orgânica”, “Carbono orgânico”, “Capacidade de troca catiônica”, “Saturação por bases”, “pH”, “Serapilheira”, “Serapilheira”, “Ciclagem de nutrientes”.

As palavras-chave referentes aos serviços ecossistêmicos foram combinadas com “Sistemas agroflorestais”, “Agrofloresta”, “Agrossilvicultura”, “Sistemas silviagrícolas”, “Amazônia”. Ademais, foram pesquisadas no plural e singular, bem como nas línguas inglesa e espanhola, resultando em número total de 201 combinações de palavras-chave. Ao perceber que os resultados de busca praticamente não englobavam quintais agroflorestais, foi adicionada à pesquisa a combinação das palavras-chave “Quintais agroflorestais” e “Amazônia”, também no plural, singular, inglês e espanhol, de forma a abranger essa prática agroflorestal no estudo. Com isso, o número de combinações de palavras-chave utilizadas para as buscas foi totalizado em 207.

À princípio, a análise dos artigos se deu a nível de título, palavras-chave e resumo. Entretanto, esse método restringe a seleção de artigos que podem conter dados da riqueza de espécies dos SAFs. Isso pois, muitos artigos que abordam variáveis que não foram estudadas nessa metanálise, mas que possuem como área de estudo sistemas agroflorestais situados na Amazônia, elucidam as espécies presentes nesses sistemas e, normalmente, essa informação não está explanada em seus resumos. Dessa maneira, os artigos passaram a ser analisados a nível do conteúdo completo da publicação, incluindo, se necessário, a análise dos arquivos em anexo. Esse método foi aplicado às

buscas anteriores feitas apenas a nível de título, palavras-chave e resumo. Posteriormente às pesquisas nos bancos de dados supracitados, foram realizadas novas buscas para tornar a revisão de literatura ainda mais abrangente. As pesquisas foram feitas em treze (13) revistas científicas (Cerne; Ciência Florestal; Floram; Floresta; Pesquisa Agropecuária Brasileira; Pesquisa Agropecuária Tropical; Pesquisa Florestal Brasileira; Revista Brasileira de Ciências Agrárias; Revista Ciência Agronômica; Revista de Ciências Agrárias - Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences; Scientia Agricola; Scientia Forestalis; Semina - Ciências Agrárias). Por fim, também foi analisada uma lista de referências com artigos potenciais à pesquisa, recomendada por especialista.

Para a seleção dos artigos foram utilizados os seguintes critérios: (1) estudos conduzidos no domínio amazônico, (2) a(s) área(s) de estudo deveria(m) consistir em pelo menos um sistema agroflorestal, independentemente da prática agroflorestal aplicada, (3) estudos contendo medidas quantitativas para pelo menos uma variável de nosso interesse, (4) informações básicas de locais de estudo, como município e coordenadas geográficas.

Toda a pesquisa de literatura produziu 12.556 resultados de busca. Desses, 357 artigos atenderam aos critérios acima e foram selecionados. Todos os artigos pré-selecionados foram revisados novamente, quando novo critério de seleção foi adicionado. Desse modo, deveriam permanecer na pesquisa: (5) estudos cujos resultados informassem a riqueza de espécies e/ou valores médios para as variáveis resposta para cada sistema agroflorestal avaliado, sendo excluídos os artigos que continham valores gerais ou médios para todos os SAFs estudados. A exemplo, artigos que informam a riqueza de espécies de forma geral para os SAFs avaliados, e não a riqueza do SAF1, SAF2, ..., SAFn, foram excluídos.

Em relação à remoção de duplicatas (artigos distintos que possuem a mesma área de estudo), para a definição de qual artigo permaneceria nessa pesquisa foram utilizados os seguintes critérios, nessa ordem de importância: (1) artigos com maior número de variáveis de interesse, (2) classificação Qualis dos periódicos, (3) data de publicação, permanecendo os artigos mais recentes.

### 3.2. Sistematização de dados

Para cada artigo selecionado foram registradas as seguintes informações: (1) título do artigo, (2) autores, (3) ano de publicação do artigo, (4) localização da área de estudo, como município, estado/província e país, (5) coordenadas geográficas do local de estudo, (6) tipo do(s) sistema(s) agroflorestal(ais), (7) variável da biodiversidade (i) riqueza de espécies e variáveis associadas ao serviços estocagem de carbono e fertilidade do solo (ii) estoque de carbono acima do solo, (iii) serapilheira, (iv) estoque de carbono no solo, (v) carbono orgânico total (COT), (vi) matéria orgânica do solo (MOS), (vii) pH do solo, (viii) capacidade de troca catiônica (CTC) e (ix) saturação por bases (V).

Em relação ao tipo de sistema agroflorestal, os critérios usados para classificá-los como simples ou complexos foram: Sistemas com riqueza igual ou inferior a cinco são categorizados como simples, ao passo que sistemas com riqueza igual ou superior a seis são tidos como complexos (MICCOLIS et al., 2016; SANTOS et al., 2019). Os dados das variáveis medidas foram extraídos das tabelas, figuras e do texto principal dos estudos selecionados. Após o registro completo dos dados, foi realizada a padronização de todas coordenadas geográficas para graus decimais, tal como das unidades de medida de todas as variáveis.

Concluída a exploração dos dados obtidos para todas as variáveis resposta mencionadas, decidiu-se por focar o estudo, para além da biodiversidade (riqueza de espécies), no estoque de carbono acima do solo. A seleção dessa variável se deu diante do tempo disponível para a realização da pesquisa e, principalmente, à relevância desse assunto no momento atual, já que pesquisas relacionadas ao potencial de agroecossistemas como sumidouro de carbono estão totalmente atreladas ao tocante das mudanças climáticas. Todos os estudos apresentaram a estimativa direta do estoque de carbono, com apenas uma exceção, sendo que neste estudo o armazenamento de carbono acima do solo foi estimado multiplicando-se o valor da biomassa seca pelo fator 0,50 (BRONW et al., 1986; GOUDRIAAN, 1992; IPCC, 2006; MACDICKEN, 1997). A biomassa acima do solo foi calculada nestes estudos através de diferentes equações alométricas, pelo fato de cada estudo possuir sistemas com composições florísticas distintas, sendo as equações utilizadas voltadas a regiões tropicais e aplicáveis para as

espécies presentes nos SAFs de cada estudo. Na Figura 1 pode-se visualizar a localização das áreas de estudo (sistemas agroflorestais) na região amazônica.

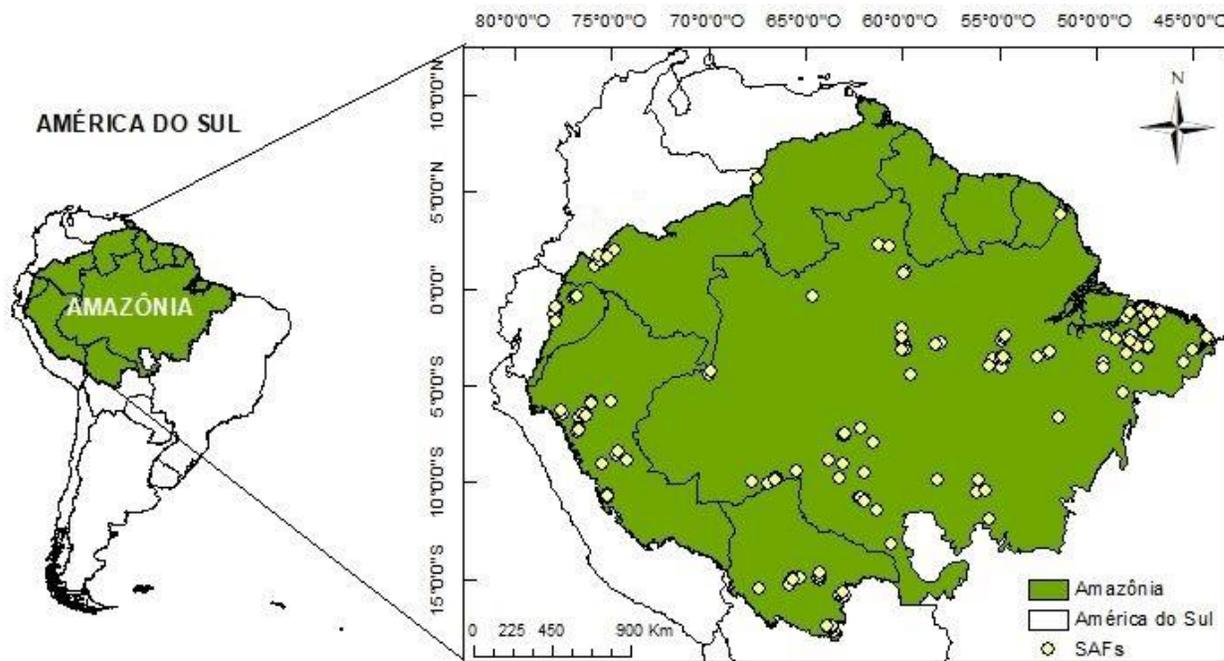


Figura 1 - Localização dos sistemas agroflorestais estudados na Amazônia.

### 3.3. Dados climáticos

Dezenove variáveis climáticas, referentes a temperatura e precipitação, foram obtidas para todos os locais de estudo. Essas foram adquiridas via WorldClim 2.0 ([www.worldclim.org](http://www.worldclim.org)), com alta resolução espacial, de 30 segundos de arco (~ 1km), a partir da interpolação de medições climáticas médias de estações meteorológicas (FICK e HIJMANS, 2017) dos últimos 32 anos. Além dessas, foram obtidas também a evapotranspiração potencial e evapotranspiração real, além do déficit hídrico climático. Este é calculado como a diferença entre a evapotranspiração potencial e a evapotranspiração real (ABATZOGLOU et al., 2018) e representa a quantidade de água perdida durante os meses secos (quando a evapotranspiração excede a pluviosidade), refletindo com mais precisão as condições de seca do que a precipitação total anual.

Portanto, quanto mais negativo seu valor, maior o estresse hídrico, já os valores próximos de zero indicam que não há estresse hídrico (ABATZOGLOU et al., 2018).

As variáveis climáticas selecionadas (Apêndice 1) foram utilizadas como preditores para explicar a variabilidade do estoque de carbono nos sistemas estudados. As mesmas também foram usadas em outros estudos como principais preditores que explicam variações de funções ecossistêmicas de diferentes ecossistemas e agroecossistemas, em escala global (ULRICH et al., 2014; SULLIVAN et al., 2017).

### **3.4. Análises**

Para avaliar a distribuição dos dados de riqueza e carbono, quanto à normalidade ou não desses, utilizou-se o Teste de Shapiro-Wilk (CRAWLEY, 2013). Com a finalidade de fazer comparações dos valores médios entre tipos de sistemas agroflorestais (simples e complexos) foi utilizado o Teste de Mann-Whitney (Teste U), teste não-paramétrico indicado para comparação de duas amostras independentes (CRAWLEY, 2013).

As variáveis climáticas foram resumidas através da análise de componentes principais (PCA) na matriz de correlação, usando o pacote “FactoMineR” (HUSSON et al., 2017). Assim, foram apresentadas as correlações entre pares de variáveis individuais e escores de PCA para todas as variáveis climáticas. Em seguida foram selecionadas as principais variáveis que apresentam maior explicação na variabilidade dos eixos do PCA (Apêndice 2). Adicionalmente, se realizou uma análise de correlação de Pearson para selecionar principais variáveis que foram redundantes entre elas e que mais explicam variação no PCA. Modelos lineares de efeitos mistos (LMMs, com efeitos aleatórios e fixos) foram usados para testar os principais efeitos de múltiplas variáveis climáticas sobre o estoque carbono acima do solo. De forma a selecionar a função de ligação mais adequada, foi realizado o diagnóstico dos modelos a partir do teste da distribuição gaussiana dos erros e verificação das distribuições de resíduos, utilizando o gráfico Q-Q (Apêndice 3) (ZUUR et al., 2009; CRAWLEY, 2013).

Foi analisada a relação entre riqueza e carbono com os LMMs, primeiro avaliando efeitos principais da riqueza sobre o carbono ( $AGC \sim$  riqueza) e, seguidamente, do carbono sobre a riqueza como parte da abordagem de cobenefícios (riqueza  $\sim$  AGC).

Preditores com efeitos fixos (variáveis explicativas contínuas) foram agrupados como variáveis do clima sobre o carbono (variável resposta). Os tipos de SAFs (simples e complexo) para cada localidade foram considerados como efeito aleatório (1 | SAFs) em todos os modelos (ROZENDAAL et al., 2019).

Avaliou-se a colinearidade entre as variáveis preditoras selecionadas por meio da análise de correlação de Pearson onde, quando duas variáveis foram fortemente correlacionadas ( $r \geq 0,7$ ), elas foram incluídas em modelos univariados. Todos os modelos foram calculados usando o pacote “lme4” (BATES et al., 2019) na plataforma R (R-CORE-TEAM, 2019). Também, utilizou-se coeficientes dos preditores para interpretar estimativas de parâmetros em uma escala comparável usando o pacote 'jtools', com a finalidade de identificar os melhores modelos (LONG, 2020). Para ilustração de gráficos neste estudo, usamos o pacote 'ggplot2' (HADLEY, 2015).

#### 4. RESULTADOS

A partir da extensa revisão de literatura foram selecionados, a princípio, 191 artigos científicos, sendo 803 o número de sistemas agroflorestais estudados. O número de artigos que possuem dados referentes a cada variável, bem como o número total de SAFs onde as mesmas foram avaliadas, pode ser visualizado na Tabela 1.

Tabela 1– Número de artigos e sistemas agroflorestais (SAFs) associados às variáveis resposta

Variável resposta	Nº de artigos	Nº de SAFs
Riqueza	183	793
Estoque de carbono (parte aérea)	13	60
Serapilheira	12	26
Matéria orgânica	28	53
Carbono orgânico total	27	59
Estoque de carbono (solo)	12	33
pH	54	146
Capacidade de troca catiônica	18	40
Saturação por bases	18	28

Como mencionado anteriormente, das variáveis selecionadas previamente para este estudo, listadas na Tabela 1, permaneceram nesta pesquisa as variáveis riqueza de espécies e estoque de carbono da parte aérea da vegetação. As médias para a riqueza de espécies dos sistemas agroflorestais complexos e simples foram de 13,66 e 2,88 espécies por SAF, respectivamente. Para o estoque de carbono da parte aérea da vegetação, os SAFs complexos apresentaram maior valor médio, com 55,05 Mg/ha, enquanto que os simples, 36,21 Mg/ha. Entretanto, segundo o teste de Mann Whitney, não houve diferença significativa entre os valores médios de ambos os tipos de sistema para estoque de carbono, ocorrendo apenas para a riqueza de espécies. Por meio da Figura 2 pode-se visualizar a comparação gráfica entre os tipos de SAFs para estoque de carbono e riqueza de espécies.

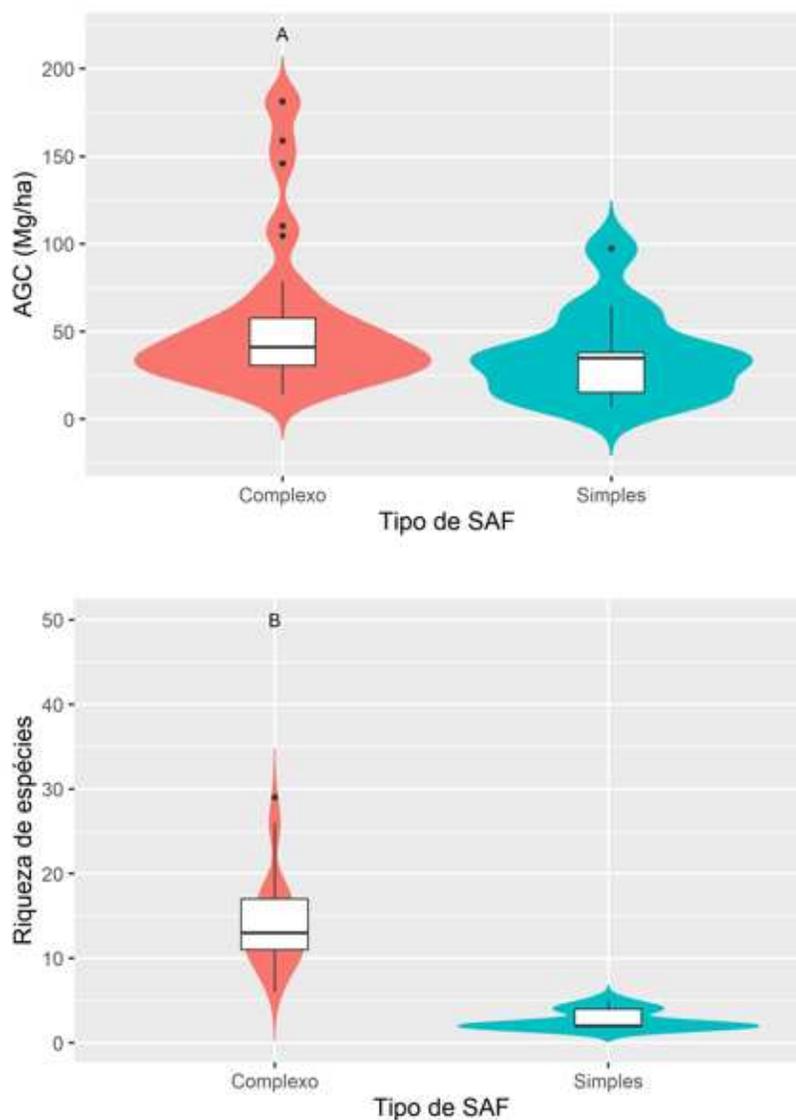


Figura 2 – Comparação dos dados entre os tipos de SAF para estoque de carbono (A) e para riqueza de espécies (B), sendo: Carbono acima do solo (AGC).

Na análise de componentes principais (PCA) para as múltiplas variáveis climáticas consideradas nesse estudo, os dois eixos principais explicaram, ou absorveram, 69,67% da variabilidade de todos os dados climáticos em relação às áreas de estudo (SAFs), onde o eixo 1 (PCA1) explicou 55,66%, enquanto que o eixo 2 (PCA2) 14,01% (Figura 3).

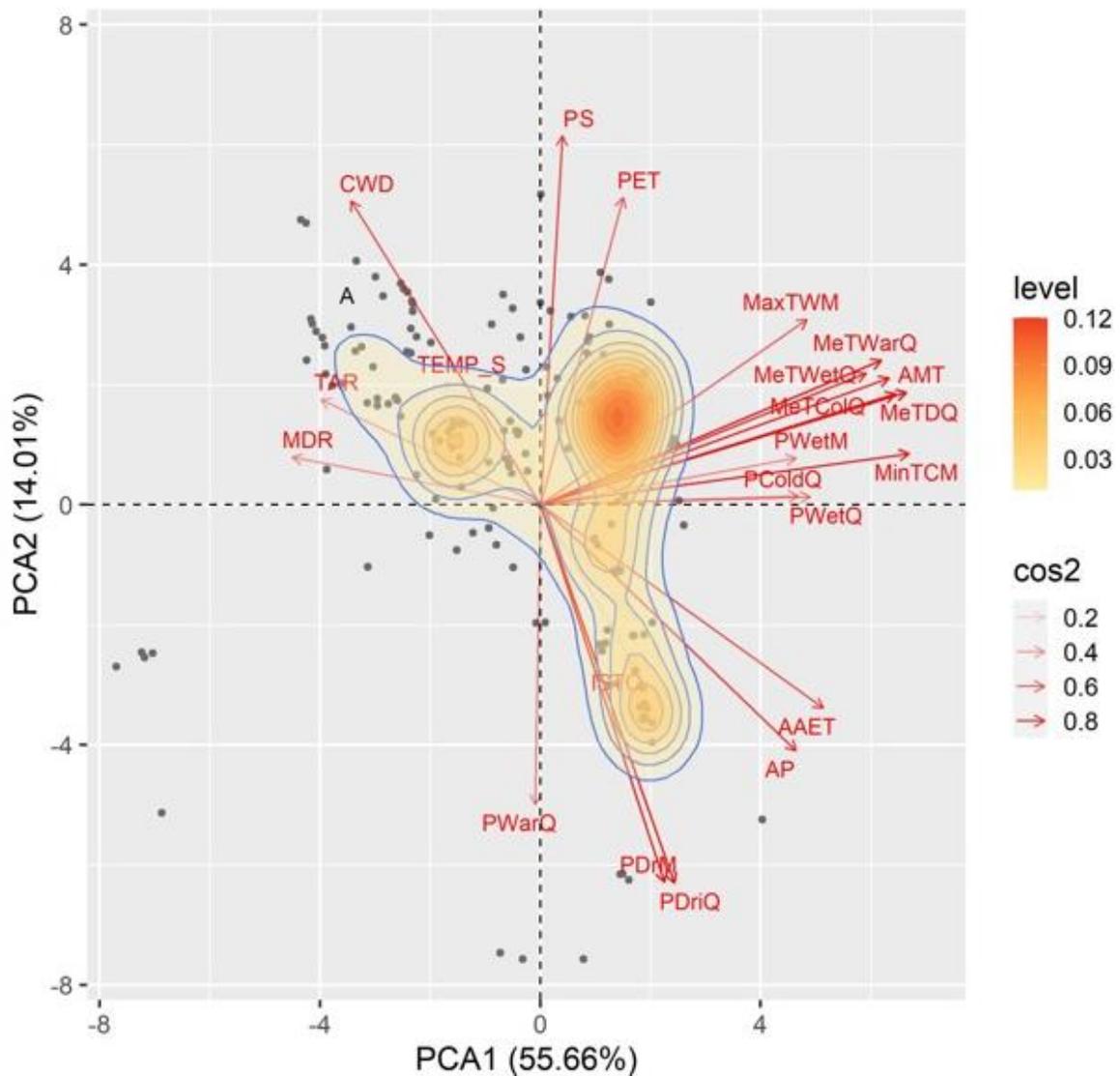


Figura 3 – Análise de componentes principais para as variáveis climáticas em relação aos SAFs, sendo: eixo 1 (PCA1); eixo 2 (PCA2); nível de concentração das variáveis (Level) e nível de correlação com os eixos do PCA (Cos2). Os significados para as siglas dos vetores (variáveis) são apresentados no Apêndice 1.

A partir disso, as principais variáveis climáticas selecionadas como importantes preditores foram Evapotranspiração potencial (PET), Déficit hídrico climático (CWD), Temperatura média anual (AMT), Evapotranspiração real (AAET), Precipitação do mês mais seco (PDrM) e Intervalo diurno médio (MDR). Essas foram escolhidas devido à alta correlação com os eixos do PCA e com a maioria das demais variáveis de mesma categoria (temperatura ou precipitação), assim como pelo teste de correlação de Pearson. A evapotranspiração potencial variou de 1.057 a 1.755 mm/ano entre os locais

de estudo, já a evapotranspiração real variou de 615 a 1.827 mm/ano, o déficit hídrico climático de -478 a 834 mm/ano, a temperatura média anual de 12,57 a 27,43 °C, a precipitação do mês mais seco de 2 a 278 mm e, por fim, o intervalo diurno médio variou de 7,33 a 13,72 °C entre as localidades dos sistemas agroflorestais estudados.

Os dois eixos principais do PCA explicaram ~78% da variação dessas seis variáveis climáticas. Ambos os eixos definem um marcado e claro gradiente de precipitação e temperatura ao longo da bacia Amazônica. O primeiro eixo (PCA1) explicou 49,28% da variação dos dados, em que o AAET foi a variável que apresentou a maior correlação positiva significativa com o primeiro eixo ( $R = 0,92$ ;  $p < 0,05$ ), seguido do PDrM ( $R = 0,79$ ;  $p < 0,05$ ) e, negativamente, com CWM ( $R = -0,94$ ;  $p < 0,05$ ). O segundo eixo explicou 28,25% da variabilidade dos dados, principalmente pela alta correlação positiva da AMT ( $R = 0,78$ ;  $p < 0,05$ ) e PET ( $R = 0,78$ ;  $p < 0,05$ ). A análise de componentes principais para as variáveis climáticas mais relevantes pode ser verificada através da Figura 4 e Apêndice 2.

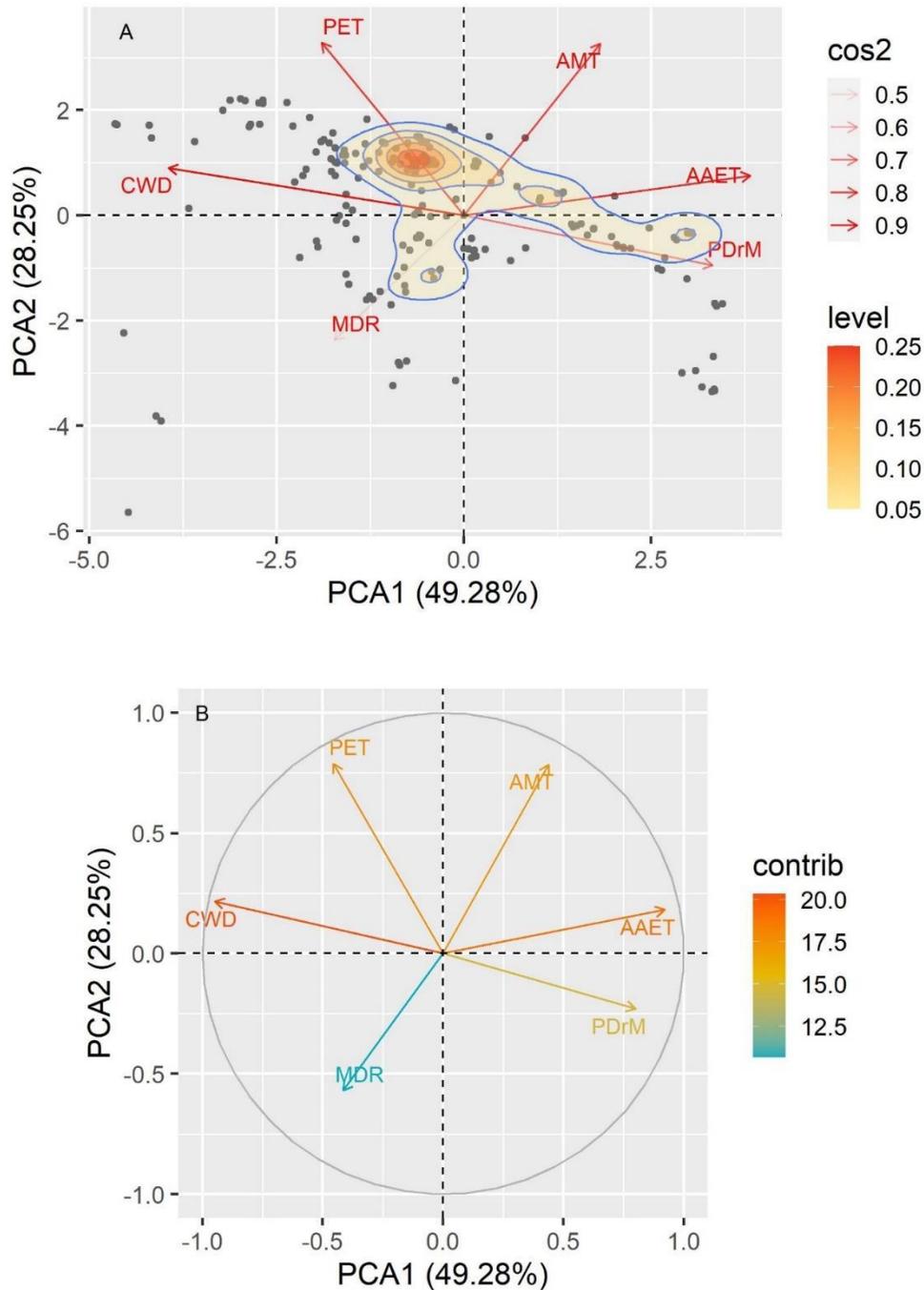


Figura 4 - Análise de componentes principais para as variáveis climáticas selecionadas como mais relevantes, com representação dos locais de estudo em (A) e de modo simplificado em (B), sendo: eixo 1 (PCA1); eixo 2 (PCA2); nível de concentração das variáveis (level); nível de correlação com os eixos do PCA (cos2 e contrib); Evapotranspiração potencial (PET), Déficit hídrico climático (CWD), Temperatura média anual (AMT), Evapotranspiração real (AAET), Precipitação do mês mais seco (PDrM) e Intervalo diurno médio (MDR).

De acordo com todos modelos lineares de efeitos mistos (LMMs) testados, observou-se que, de todas as variáveis climáticas utilizadas como preditores para explicar a variação do armazenamento de carbono, apenas o intervalo diurno médio (MDR) apresentou efeito significativo, afetando negativamente o estoque de carbono (LMM, Estimativa = -0,09,  $t = -4,99$ ,  $p = 0,00$ ), como pode ser visto na Figura 5. Os modelos mostraram que o estoque de carbono foi afetado principalmente pela riqueza de espécies, que apresentou efeito positivo significativo sobre sua variação (LMM, Estimativa = 0,75,  $t = 2,81$ ,  $p = 0,01$ ). A riqueza de espécies também foi afetada positivamente pelo carbono (LMM, Estimativa = 0,25,  $t = 3,80$ ,  $p = 0,001$ ), o que denota significativa relação positiva de cobenefício entre essas variáveis nos sistemas agroflorestais da Amazônia (Figura 6).

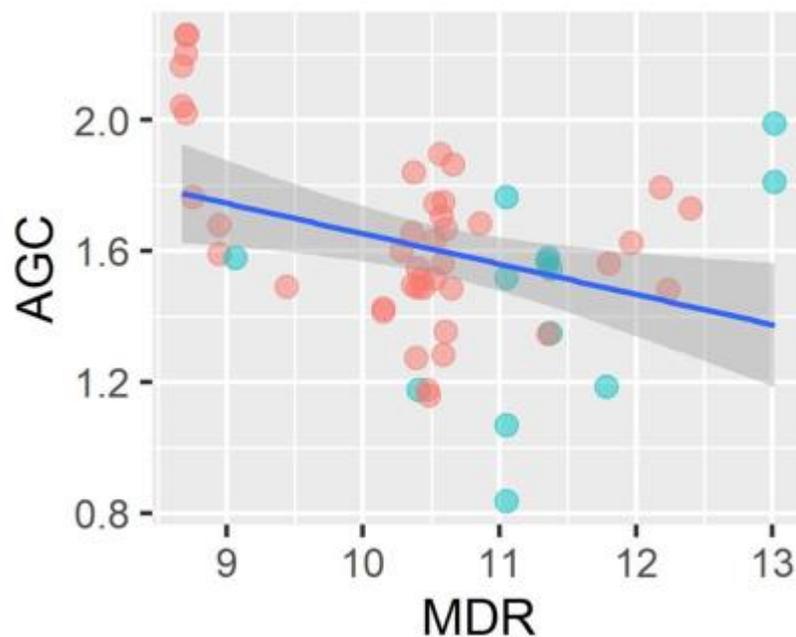


Figura 5 – Efeito do Intervalo diurno médio (MDR) sobre o estoque de carbono acima do solo (AGC). No gráfico, os pontos representam os dados observados e a linha contínua o ajuste de valores dos modelos (previsões), sendo o polígono sombreado 95% de intervalo de confiança das previsões modeladas.

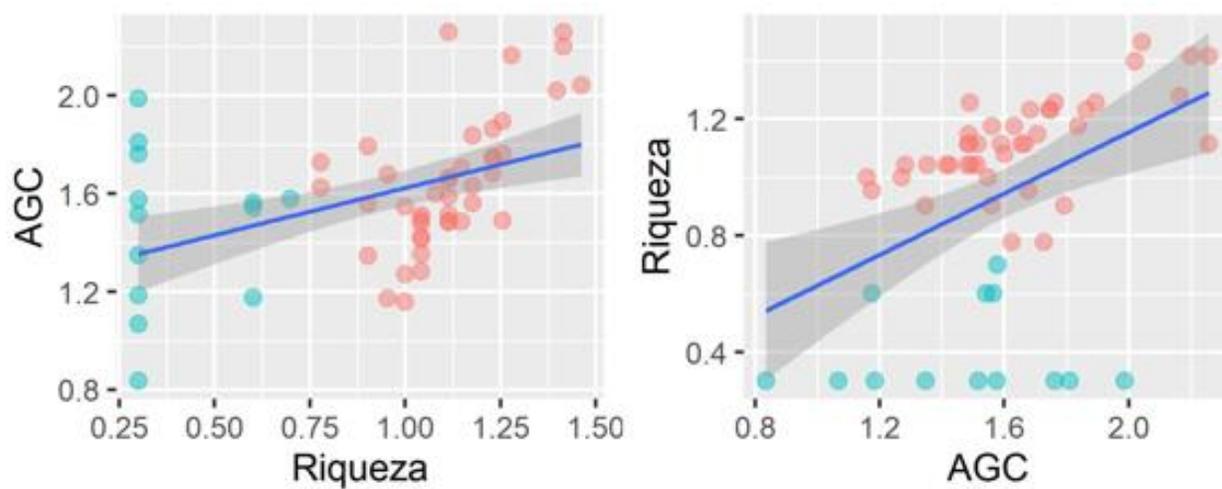


Figura 6 – Relação positiva de cobenefício entre riqueza de espécies e estoque de carbono (AGC) nos sistemas agroflorestais na Amazônia.

## 5. DISCUSSÃO

A pesquisa metanalítica produziu informações relevantes sobre sistemas agroflorestais na Amazônia, pois explica relações existentes entre biodiversidade, funções ecossistêmicas e variáveis climáticas. Muitas pesquisas com essa abordagem já vêm sendo realizadas em ecossistemas naturais, sendo, ainda, escassas para sistemas agroflorestais, inclusive na Amazônia. Esse estudo evidencia, de modo geral, a importância dos SAFs para a manutenção da biodiversidade e para o estoque de carbono na Amazônia. Isso pelo fato de que os resultados apontam significativa relação positiva de benefício entre a riqueza de espécies e o armazenamento de carbono da biomassa acima do solo, denotando que a agrossilvicultura pode compor estratégia chave para a mitigação das mudanças climáticas. Entretanto, não houve diferença significativa entre os tipos de SAFs aqui avaliados (sistemas complexos e simples) no estoque de carbono e, para o entendimento desse resultado, discutimos os fatores inerentes à variação da riqueza de espécies e armazenamento de C em sistemas agroflorestais. Além disso, os resultados demonstram nítido gradiente climático na região amazônica, embora o clima não possua efeito significativo sobre a variação do estoque de carbono.

Sistemas agroflorestais, mesmo que com poucas espécies, possuem maior complexidade em termos ecológicos e econômicos que sistemas monoculturais de agricultura ou silvicultura, o que contribui para maior promoção de serviços ecossistêmicos sem comprometer a produtividade (NAIR et al., 2021; NAIR, 2013). No entanto, com maior número de espécies é possível atender mais amplamente às necessidades dos agricultores, no que diz respeito às suas dietas alimentares, produção de remédios, combustível, fibra e outros, promovendo, assim, mais bem-estar, segurança alimentar e renda (BUCHELI e BOKELMANN, 2017). Sistemas agroflorestais complexos são capazes de assegurar maiores níveis de biodiversidade, bem como fornecer, ao longo do tempo, mais serviços ecossistêmicos e de maneira mais estável, se comparados a sistemas agroflorestais simples (BEILLOUIN et al., 2021; SANTOS et al., 2019).

A exemplo, os sistemas agroflorestais sucessionais, que são caracterizados pela sucessão das espécies componentes onde, em cada estágio, as espécies presentes produzem condições ambientais necessárias às espécies do estágio posterior (SANTOS,

2020). Sendo assim, tratam-se de sistemas biodiversos de maior complexidade, com estrutura análoga a das florestas naturais, o que possibilita semelhante oferta de serviços ecossistêmicos e permite que a produtividade potencial da área seja atingida ao máximo (SELECKY et al., 2017). Outra prática agroflorestal semelhante constitui-se nos quintais agroflorestais, que também imitam atributos funcionais e estruturais de ecossistemas naturais e, portanto, possuem grande potencial de provisão de SEs (NAIR et al., 2021).

Sendo assim, pode-se deduzir que sistemas agroflorestais biodiversos podem possuir maior capacidade em exercer funções ecológicas, como o sequestro e estoque de carbono. Os resultados do presente estudo contrastam, de certo modo, com essa ideia. Isso pois, apesar do valor médio do estoque de carbono dos sistemas agroflorestais complexos ter sido superior ao dos sistemas simples (55,05 Mg/ha e 36,21 Mg/ha, respectivamente), não houve diferença significativa entre os valores. No entanto, o valor encontrado para os SAFs complexos nesta pesquisa, em detrimento ao encontrado para os SAFs simples, é superior ou está mais próximo a valores médios de estoque de carbono encontrados para florestas secundárias da Amazônia em outros estudos, como 39 Mg/ha (VILLA et al., 2020a), 52 Mg/ha (VILLA et al., 2020b), 67,4 Mg/ha (CARDOZO et al., 2018) e 111 Mg/ha (VILLA et al., 2020b). Isso mostra que, de certo modo, pode-se dizer que os SAFs complexos possuem estoque de carbono mais semelhante ao de sistemas naturais do que SAFs simples.

Além disso, outras pesquisas metanalíticas apresentam resultados que apontam que sistemas agroflorestais biodiversos são mais eficientes no estoque de carbono e na provisão de demais serviços ecossistêmicos. Beillouin et al. (2021) identificaram 95 metanálises que sintetizam os efeitos do aumento da diversidade de culturas em agrossistemas de 85 países, em diferentes regiões do planeta. Avaliando os efeitos de distintas práticas agroflorestais, seus resultados mostram que os SAFs mais diversificados resultam em maior estoque de carbono no solo, tal como maior produção de biomassa acima do solo e, conseqüentemente, maior estoque de carbono na parte aérea da vegetação. Além disso, dentre as estratégias de diversificação de culturas avaliadas pelos autores, os sistemas agroflorestais compõem a melhor opção para a promoção de outros SEs, como biodiversidade associada (isto é, a biodiversidade de

plantas e animais não cultivados), produção, melhorias na qualidade do solo e da água e controle de pragas e doenças.

Ao realizar uma metanálise abrangendo agroecossistemas de toda a Mata Atlântica brasileira, Santos et al. (2019) encontraram resultados semelhantes. Em suas análises, os valores encontrados para os serviços ecossistêmicos de provisão, apoio e regulação foram mais elevados para os sistemas agroflorestais biodiversos do que para SAFs simples e sistemas convencionais de produção. Ainda, para alguns serviços, os valores obtidos para SAFs complexos se assemelham aos valores dos sistemas de referência.

Inúmeros são os fatores associados aos efeitos positivos da diversidade no fornecimento de serviços ecossistêmicos, o que torna complexo o entendimento dessa relação (BEILLOUIN et al., 2021; CABALLERO-SERRANO et al., 2016). Ademais, diversos são os aspectos que influenciam a riqueza de espécies em si, assim como o estoque de carbono, fazendo com que haja grande variação nos resultados devido a esses fatores. Por exemplo, nos estudos utilizados para essa pesquisa, há grande variação de dados, onde a riqueza de SAFs complexos variou de 6 a 61 espécies, enquanto que o estoque de carbono na biomassa dos SAFs complexos variou de 14,43 a 181,26 Mg/ha e dos SAFs simples de 6,85 a 97,2 Mg/ha. Em relação aos valores médios, Ehrenbergerová et al. (2016) e Villa et al. (2020a) encontraram valores próximos aos desta pesquisa, sendo que, em seus trabalhos, o estoque médio de carbono de SAFs complexos na Amazônia foi de 48,6 Mg/ha e 52 Mg/ha, respectivamente, enquanto no presente estudo apresentou-se média de 55,05 Mg/ha. Apesar destes estudos, observou-se variação substancial em relação aos resultados de demais trabalhos, que indicam valores médios de 26,27 Mg/ha (SCHNEIDEWIND et al., 2018), 39,82 Mg/ha (CARDOZO et al., 2018) e 134,3 Mg/ha (SANTOS et al., 2004).

Em outras regiões do mundo também é possível notar essa divergência entre o armazenamento de carbono em sistemas agroflorestais. Batsi et al. (2021) relataram que agroflorestas na República Democrática do Congo armazenam, em média, 44,48 Mg/ha de carbono acima do solo, enquanto que Manaye et al. (2021) encontram 8,71 Mg/ha, com variação de 2,78 a 21,43 Mg/ha entre SAFs na Etiópia. Também nesse país,

Gebrewahid e Meressa (2020) informaram sobre média semelhante (7,9 Mg/ha), porém a variação encontrada por esses autores foi ainda maior (0,25 a 56,56 Mg/ha). Estudando SAFs na Índia, Kumar (2011) encontrou 24,32 Mg/ha em média, com estoques variando de 16 a 36 Mg/ha, enquanto Siarudin et al. (2021) encontraram um valor médio de 57,43 Mg/ha em SAFs na Indonésia, com divergência mais ampla entre os sistemas (37–108,6 Mg/ha). Esses dados nos transmitem a ideia de que há uma série de aspectos referentes ao estoque de carbono acima do solo em sistemas agroflorestais, visto a tamanha discrepância dos valores encontrados na Amazônia, assim como ao redor do planeta (CELENTANO et al., 2020; NEWAJ et al., 2016; NAIR et al., 2009). Portanto, a ausência de significância entre os valores médios de armazenamento de C para os SAFs biodiversos e simples nesse estudo pode ser explicada por mecanismos que influenciam direta ou indiretamente nas variáveis resposta aqui estudadas.

Entre as inúmeras variáveis que podem ser preditoras da variação do armazenamento de C nos sistemas agroflorestais, estão os fatores climáticos, como temperatura, precipitação e evapotranspiração. Apesar disso, de modo geral, não se observou efeito significativo do clima sobre o estoque de C neste estudo. Por meio da análise de componentes principais (PCA), verificou-se que as variáveis que mais explicam a oscilação de todos os dados climáticos em relação às áreas de estudo (SAFs) foram evapotranspiração potencial (PET), déficit hídrico climático (CWD), temperatura média anual (AMT), evapotranspiração real (AAET), precipitação do mês mais seco (PDrM) e amplitude da temperatura média diurna (MDR). Entre essas, com base nos modelos lineares de efeitos mistos (LMMs) testados, apenas a amplitude da temperatura média diurna (MDR) possuiu efeito significativo no estoque de carbono, sendo este um efeito negativo. Essa relação transmite a ideia de que o estoque de carbono foi superior em locais onde há maior estabilidade da temperatura, no que tange à diferença entre a temperatura máxima e mínima. Segundo Joshi e Joshi (2022), os mecanismos por trás da relação da variação diurna de temperatura com a biodiversidade, ainda se mantêm especulativos. De certo modo, pode-se dizer o mesmo para a relação estoque de C ~ MDR, visto que não encontrou-se outros trabalhos com resultados a respeito em SAFs, nem mesmo em sistemas de referência.

Entretanto, a biomassa florestal está substancialmente atrelada à temperatura (ALI et al., 2020; BENNETT et al., 2020; DYOLA et al., 2022; GORDON et al., 2018; HUANG et al., 2019; LIU et al., 2014; OUYANG et al., 2019; RAICH et al., 2006; SHEN et al., 2016; VIEILLEDENT et al., 2016; ZHANG et al., 2016). Um dos motivos pelos quais isso ocorre é devido à temperatura estar diretamente associada ao balanço entre ganho e perda de carbono, já que possui grande influência na taxa fotossintética e, dessa forma, na fixação de carbono, bem como na respiração das plantas (BENNETT et al., 2020). Sendo assim, a amplitude da temperatura média diurna (MDR) está associada a processos fisiológicos e de regulação de funções da planta, sendo, então, notável indicador para entendimento da interferência do clima na vegetação (THAKUR et al., 2022).

É válido ressaltar que diferentes variáveis climáticas estão altamente correlacionadas, sugerindo que embora não tenham demonstrado relação significativa com o estoque de carbono nos resultados desta pesquisa, algumas variáveis podem influenciar indiretamente o estoque de carbono nos SAFs da Amazônia. Por exemplo, temperatura e evapotranspiração estão altamente correlacionadas (FRANCIS e CURRIE, 2003), onde a elevação da temperatura infere no aumento da evapotranspiração (KELLOMÄKI, 2017; SANDANOV et al., 2020). A evapotranspiração está diretamente associada ao déficit hídrico, isto é, disponibilidade de água em relação à demanda evaporativa (FRANCIS e CURRIE, 2003), já que o mesmo é calculado por meio da diferença entre a evapotranspiração potencial e a evapotranspiração real (ABATZOGLOU et al., 2018). O déficit hídrico (CWD), por sua vez, resume o balanço hídrico do ecossistema, já que engloba as entradas e saídas de água através da pluviosidade e evapotranspiração, respectivamente (STEGEN et al., 2011), sendo que fatores climáticos relacionados à disponibilidade hídrica também possuem grande influência na produção de biomassa (HONG et al., 2021; OUYANG et al., 2019; POORTER et al., 2015; PALVIAINEN et al., 2020; VILLA et al., 2020b), porém, o efeito de cada um deles pode depender de outras variáveis climáticas.

Sendo assim, nota-se complexa relação entre as variáveis climáticas e como essas interferem positivamente ou não no estoque de carbono da vegetação, sendo o mesmo válido para a relação entre riqueza de espécies e armazenamento de C, que é

de grande complexidade e variabilidade, seja em ecossistemas naturais, ou em sistemas agroflorestais (GEBREWAHID e MERESSA, 2020). Por exemplo, Hong et al. (2021) relataram que estudos demonstraram efeitos positivos, negativos ou insignificantes da diversidade na produtividade florestal em regiões de temperatura elevada. Isso indica que mesmo em locais de temperatura semelhante, o efeito da riqueza no armazenamento de C pode ser contrário, pois a temperatura está relacionada a outros fatores climáticos que, por sua vez, possuem diferentes efeitos na riqueza e na produtividade do ecossistema, além dos vários fatores que, para além dos fatores climáticos, também influenciam o armazenamento de C.

Dentre estes fatores, cita-se as características do solo (NEWAJ et al., 2016; NAIR et al., 2009), idade do SAF (BATSI et al., 2021; REANG et al., 2021; SELECKY et al., 2017), tamanho do sistema (GEBREWAHID e MERESSA, 2020; KUMAR, 2011), práticas de manejo (CARDOZO et al., 2018; MANAYE et al., 2021), capacidade produtiva do local (GEBREWAHID e MERESSA, 2020; MANAYE et al., 2021), características inerentes às espécies componentes do SAF (GEBREWAHID e MERESSA, 2020; MANAYE et al., 2021; NEWAJ et al., 2016; REANG et al., 2021), tal como as condições da área antes da implantação do sistema (CELENTANO et al., 2020).

De acordo com Bennett et al. (2020), as propriedades físico-químicas do solo possuem grande influência na produção de biomassa da vegetação, pois moldam o crescimento das raízes e estão associadas à capacidade de retenção de água e disponibilidade de nutrientes, interferindo na absorção desses pela planta e, conseqüentemente, no desenvolvimento da mesma. Como o solo pode estimular, ou não, a produção de biomassa, os efeitos do clima no estoque de C podem ser atenuados ou potencializados pelas características do solo, sendo importante considerar variáveis climáticas, edáficas e demais fatores, como os citados acima, para um entendimento mais preciso da distribuição do carbono em escalas espaciais maiores (BENNETT et al., 2020).

Outro importante fator constitui-se na idade dos sistemas agroflorestais, visto que maiores estoques de carbono são encontrados, normalmente, em sistemas com maiores idades (REANG et al., 2021; SELECKY et al., 2017). Isso ocorre pelo fato de que, a cada ano, mais biomassa é produzida pela vegetação dos SAFs, a respiração do solo aumenta,

tornando a ciclagem de nutrientes mais eficiente, assim como quantidades de carbono orgânico nos solos, resultando em maior qualidade edáfica, o que possibilita maior armazenamento de C (SELECKY et al., 2017). Ainda, a idade do sistema não interfere apenas na estocagem de carbono em si, mas como também na relação entre diversidade e produção de biomassa (OUYANG et al., 2019; VILLA et al., 2020b), sendo que essa pode estar associada também ao tamanho do SAF.

Kumar et al. (2011) relataram que o tamanho de quintais agroflorestais foi importante preditor do estoque de carbono, onde a maior riqueza e densidade de espécies, presentes em sistemas menores, resultou em maior provisionamento de carbono, devido ao aumento da capacidade de armazenamento de C em função do maior número de espécies arbóreas e ou arbustivas existentes por unidade de área (TORRES et al., 2014b). No entanto, a relação riqueza ~ tamanho do SAF pode ser variável, já que Thangjam et al. (2022) encontraram maior número de espécies em quintais de maior tamanho. Mas, ainda assim, fica evidente que a relação existente entre o tamanho dos SAFs e a estocagem de carbono é mediada pela composição de espécies, que se constitui em importante fator na produção de biomassa nestes sistemas (CARDOZO et al., 2018; NAIR et al., 2014; NAIR et al., 2009).

Cada sistema agroflorestal possui suas particularidades no que tange a diversidade, onde a riqueza de espécies é influenciada por fatores de diferentes âmbitos. Segundo Caballero-Serrano et al. (2016), fatores físicos, ecológicos e socioeconômicos possuem grande influência na seleção de espécies, em termos de quantidade e escolha das mesmas. A estreita relação entre a composição de espécies e fatores de ordem social e econômica se dá em virtude de que os agricultores possuem sua própria forma de seleção de espécies e arranjos, de acordo com seus recursos e necessidades, ocasionando em grande variação no número e localização dos componentes dos SAFs, bem como na combinação de diferentes grupos funcionais de culturas (ABEBE et al., 2010; BIRHAN e ABEBE, 2019; JADÁN et al., 2015; REANG et al., 2021).

Cada espécie possui características funcionais particulares e, portanto, diferentes potenciais para o armazenamento de carbono (CONTI e DIAZ, 2013; RUIZ-JAEN e POTVIN, 2011; SHEN et al., 2016). Espécies de grande porte, com maior altura e

diâmetro, produzem quantidades significativamente mais elevadas de biomassa se comparadas a espécies de menor porte, o que também ocorre com espécies de maior densidade da madeira, que também conseguem armazenar maiores quantidades de carbono (ALI et al., 2019; ALI et al., 2020; CAVANAUGH et al., 2014; POORTER et al., 2015; SINGH et al., 2015; VILLA et al., 2020b). As espécies dominantes, mesmo que estejam representadas por poucos indivíduos, podem estocar quantidades consideravelmente superiores de C do que espécies abundantes de menor porte (ALI et al., 2020; RODRIGUES et al., 2022). Isso denota que a composição estrutural influencia a dinâmica de provisionamento de C acima do solo (SINGH et al., 2015), indicando a importância da caracterização da estrutura da vegetação para o entendimento acerca de relações ecológicas presentes em um dado sistema.

Para uma compreensão mais precisa do efeito da diversidade de espécies no estoque de carbono dos SAFs na Amazônia, seria necessário analisar não somente fatores climáticos como preditores do estoque de C, mas também considerar os parâmetros fitossociológicos para a caracterização estrutural dos sistemas, os efeitos das variáveis edáficas, tal como os demais fatores aqui mencionados. A ausência de efeito significativo dos SAFs biodiversos no estoque de carbono poderia, possivelmente, ser explicada por alguns desses múltiplos fatores, sendo que a falta dessas análises compõe uma limitação desta pesquisa. No entanto, Batsi et al. (2021) relataram que dentre as variáveis utilizadas como preditores do armazenamento de carbono em sistemas agroflorestais, a riqueza consistiu em um dos principais fatores que explicam o potencial de estoque de C. Os resultados aqui observados corroboram com essa ideia, pois, a partir dos modelos lineares de efeitos mistos (LMMs) testados, verificou-se que o estoque de carbono foi afetado principalmente pela riqueza de espécies. Além disso, foi possível identificar relação significativamente positiva entre riqueza e estoque de carbono, demonstrando relação positiva de benefício entre essas variáveis nos SAFs da Amazônia. Resultados semelhantes foram encontrados por Cardozo et al. (2018), ao avaliarem essa mesma correlação em SAFs na Amazônia. Vários estudos também relatam forte relação positiva entre diversidade de espécies e carbono em florestas naturais (CARRICK e FORSYTHE, 2020; CAVANAUGH et al., 2014; COELHO et al., 2022; LENNOX et al., 2018; MATOS et al., 2019; MCNICOL et al., 2017; OSURI et al.,

2020; OUYANG et al., 2019; OUYANG et al., 2016; POORTER et al., 2015; YUAN et al., 2016).

Os motivos pelos quais a riqueza florística desempenha importante papel no armazenamento de carbono em SAFs, e vice-versa, ainda não são claros (CARDOZO et al., 2018), em razão da ausência de pesquisas com essa abordagem voltada à agrossilvicultura. Todavia, existem algumas hipóteses para essa relação de cobenefício entre riqueza e carbono em ecossistemas naturais, podendo essas serem utilizadas para fundamentar os presentes resultados. Uma teoria muito utilizada entre os ecologistas está relacionada à complementaridade de nicho. De acordo com essa, uma riqueza de espécies mais elevada infere no aumento das características funcionais presentes na comunidade vegetal, fazendo com que haja complementaridade interespecífica e, portanto, a ocorrência de interações ecológicas de facilitação entre as espécies, permitindo maior captura e eficiência no uso de recursos e, dessa maneira, melhor desempenho na produtividade (MCNICOL et al., 2017; POORTER et al., 2015; WRIGHT et al., 2021). A complementaridade de nicho leva à redução da competição interespecífica, bem como ao aumento da facilitação (FORRESTER e BAUHUS, 2016; FORRESTER, 2014; REICH et al., 2012), o que pode resultar no incremento do estoque de carbono, bem como na possibilidade de que novas espécies se desenvolvam na área, podendo elevar ainda mais a diversidade do sistema.

A título de exemplo, espécies fixadoras de nitrogênio promovem melhorias na fertilidade do solo e, por meio do aumento da qualidade edáfica da área, podem favorecer a produção de biomassa das demais espécies (POORTER et al., 2015). Citando caso análogo, a presença de espécies de distintos portes infere na estratificação da vegetação que, por sua vez, permite maior absorção e eficiência no uso de radiação solar, água e nutrientes, o que pode regular a diversidade de espécies e fomentar a produção de biomassa por meio da redução da competição por esses recursos e aumento da facilitação (CARDOZO et al., 2018; FORRESTER e BAUHUS, 2016; REICH et al., 2012; YUAN et al., 2016). Outra teoria consiste no efeito de seleção, em que a probabilidade de uma ou algumas espécies dominantes estarem inseridas no sistema é aumentada quando a comunidade vegetal abarca grande riqueza florística, o que eleva o potencial

de estocagem de carbono do sistema (FRIDLEY, 2001; LOREAU e HECTOR, 2001; MCNICOL et al., 2017; OUYANG et al., 2016; POORTER et al., 2015; YUAN et al., 2016).

Tais teorias sustentam que o bom funcionamento de determinado ecossistema está atrelado à diversidade e dominância funcional das espécies, que exprimem os mecanismos das mesmas em decorrência da variação ambiental, o que sugere que as relações interespecíficas podem variar consideravelmente entre os distintos ecossistemas (SHEN et al., 2016). Conforme os resultados de pesquisa metanalítica realizada por Osuri et al. (2020), as correlações positivas entre riqueza de espécies e estoque de carbono acima do solo, em ambientes tropicais dominados por humanos (HDLs), são mais predominantes e consistentes do que em florestas tropicais mais intactas. Resultados semelhantes foram encontrados em trabalhos realizados por Magnago et al. (2015) e Matos et al. (2019) que, ao avaliarem HDLs, também encontraram relação positiva de cobenefício entre diversidade florística e armazenamento de carbono. Ainda, Ouyang et al. (2019) relataram que a relação entre riqueza de espécies e produtividade florestal é mais forte em ambientes com condições menos favoráveis, no que se refere às propriedades edáficas e disponibilidade hídrica. Sendo assim, visto a maior potencialidade desses ambientes para com esse cobenefício, políticas focadas na consonância entre a promoção da biodiversidade e armazenamento de carbono em regiões tropicais, devem focar, por exemplo, em estratégias voltadas à restauração de ambientes antropizados (OSURI et al., 2020).

Segundo Villa et al. (2020a), a agrossilvicultura compõe importante mecanismo para a reabilitação de florestas degradadas, sobretudo em paisagens amazônicas modificadas pela atividade antrópica. Os resultados do presente estudo reafirmam essa ideia, pois, através da relação positiva de cobenefício entre a riqueza de espécies e estoque de carbono encontrada nas análises, pode-se dizer que os sistemas agroflorestais são modos de uso da terra capazes de conservar a biodiversidade e promover serviços ecossistêmicos simultaneamente na Amazônia, compondo, assim, importante estratégia para a mitigação das mudanças climáticas (CARDOZO et al. 2018, TORRES et al. 2014a). Além disso, nota-se que a agrossilvicultura possui potencial para a mitigação e adaptação às mudanças climáticas de forma conjunta, visto que os

presentes resultados demonstraram que o clima não afeta significativamente o estoque de carbono dos SAFs da Amazônia.

Políticas públicas que visem conciliar a mitigação das mudanças climáticas com a utilização de modelos sustentáveis de produção, ou mesmo com a restauração de áreas florestais degradadas, devem considerar os sistemas agroflorestais biodiversos como estratégia chave (SANTOS et al., 2019). A exemplo, assim como proposto por Torres et al. (2014b), os SAFs devem ser incentivados no Plano Nacional sobre Mudanças do Clima, de maneira que as práticas agropecuárias se tornem mais sustentáveis ambientalmente. No entanto, é válido ressaltar que, para potencializar os benefícios ecológicos promovidos pelos sistemas agroflorestais, a escolha da composição florística deve ser realizada de forma adequada (SANTOS et al., 2019), sendo fundamental considerar as características funcionais das espécies para maximizar os efeitos de cobenefício entre biodiversidade e promoção de serviços ecossistêmicos (VILLA et al., 2020b). Todavia, a determinação da composição florística dos SAFs está diretamente associada às necessidades dos agricultores, em termos de produção de alimentos e demais produtos, tal como de geração de renda.

Diante disso, é notável a necessidade da elaboração de políticas públicas que forneçam bases sólidas para a adesão aos sistemas agroflorestais biodiversos por parte dos agricultores, de modo que estes sejam estimulados a optar por esses sistemas ao invés de modelos de produção mais simples. Essas políticas devem considerar não apenas o fomento financeiro, mas também apoio técnico através de atividades de extensão rural, com a finalidade de acompanhar os processos de escolha da composição de espécies, implantação dos sistemas e realização de práticas de manejo adequadas. A partir disso, é possível ampliar, simultaneamente, os ganhos ambientais e socioeconômicos proporcionados pela agrossilvicultura na Amazônia, bem como contribuir com a mitigação das mudanças climáticas globais.

## 6. CONCLUSÕES

Este trabalho possibilitou maior entendimento a respeito da relevância dos sistemas agroflorestais. Com os SAFs é possível elevar a riqueza de espécies e o estoque de carbono de maneira simultânea na Amazônia. Isso ratifica o potencial destes sistemas, sobretudo dos SAFs complexos, para a conservação da biodiversidade e mitigação das mudanças climáticas, demonstrando que são modelos de uso do solo estratégicos, que devem ser considerados em políticas públicas que visem mecanismos voltados ao atual cenário climático global.

Apesar do nítido gradiente climático observado para a região amazônica, em relação às variáveis relacionadas a temperatura e umidade, o clima não afetou significativamente o estoque de carbono dos sistemas agroflorestais, o que demonstra possível potencial destes sistemas para a adaptação às mudanças no clima. Para afirmar isso de maneira mais precisa, é necessário verificar a relação da alteração do clima e do estoque de carbono ao longo do tempo, sendo essa uma lacuna a ser preenchida em pesquisas futuras. Além disso, para maior compreensão a respeito da relação direta entre riqueza de espécies e armazenamento de carbono nos sistemas agroflorestais, é preciso que estudos posteriores analisem os diversos fatores que influenciam o potencial de estocagem de C nestes sistemas, como por exemplo as propriedades do solo, estrutura da vegetação e idade dos sistemas.

## REFERÊNCIAS

- ABATZOGLOU, J. T. *et al.* Terra Climate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. **Scientific data**, 5, 170191, 2018.
- ABEBE, T.; WIERSUM, K. F.; BONGERS, F. Spatial and temporal variation in crop diversity in agroforestry homegardens of southern Ethiopia. **Agroforestry systems**, v. 78, n. 3, p. 309-322, 2010.
- ALBRECHT, A.; KANDJI, S. T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 99, 15-27, 2003.
- ALI, A. *et al.* Big-sized trees overrule remaining trees' attributes and species richness as determinants of aboveground biomass in tropical forests. **Global Change Biology**, v. 25, n. 8, p. 2810–2824, 2019.
- ALI, A. *et al.* Topmost trees and foremost species underlie tropical forest structure, diversity and biomass through opposing mechanisms. **Forest Ecology and Management**, v. 473, p. 118299, 2020.
- AZEVEDO-RAMOS, C.; SILVA, J. N. M.; MERRY, F. The evolution of Brazilian forest concessions. **Elementa: Science of the Anthropocene**, v. 3, n. 48, p. 1-8, 2015.
- BATES, D. *et al.* 'lme4': Linear Mixed-Effects Models using 'Eigen' and S4. **R package version 1.1-21**, 2019.
- BATSI, G. *et al.* Preliminary estimation of above-ground carbon storage in cocoa agroforests of Bengamisa-Yangambi forest landscape (Democratic Republic of Congo). **Agroforestry Systems**, v. 95, n. 8, p. 1505–1517, 2021.
- 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, 2021.
- BENNETT, A. C. *et al.* Climate more important than soils for predicting forest biomass at the continental scale. **Ecography**, v. 43, n. 11, p. 1692–1705, 2020.
- BIRHAN, B.; ABEBE, T. Diversity and floristic composition of rural and sub-urban home garden in Wadera district of Oromia region, Ethiopia. **International Journal of Biodiversity and Conservation**, v. 11, n. 5, p. 135-143, 2019.
- BROWN, S. E. *et al.* Evidence for the impacts of agroforestry on agricultural productivity, ecosystem services, and human well-being in high-income countries: a systematic map protocol. **Environmental Evidence**, v. 7, n. 24, 16 p., 2018.

BRONW, S.; LUGO, A.; CHAPMAN, J. Biomass of tropical tree plantations and its implications for the global carbon budget. **Canadian journal of Forestry Research**, v. 16, p. 390-394, 1986.

CABALLERO-SERRANO, V. *et al.* Plant diversity and ecosystem services in Amazonian homegardens of Ecuador. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 225, p. 116–125, 2016.

CARDOZO, E. G. *et al.* Efecto de la riqueza de especies y estructura de la vegetación en el almacenamiento de carbono en sistemas agroforestales de la Amazonía, Bolivia. **Rev. Biol. Trop.**, v. 66, p. 15, 2018.

CARRICK, P. J.; FORSYTHE, K. J. The species composition-ecosystem function relationship: A global meta-analysis using data from intact and recovering ecosystems. **Plos One**, v. 15, n. 7, 2020.

CAVANAUGH, K. C. *et al.* Carbon storage in tropical forests correlates with taxonomic diversity and functional dominance on a global scale. **Glob. Ecol. Biogeogr.** v. 23, n. 5, p. 563–573, 2014.

CELENTANO, D.; ROUSSEAU, G. X.; PAIXÃO, L. S.; *et al.* Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon, Brazil. **Agroforestry Systems**, 94, p.1781–1792, 2020.

CHATTERJEE, N. *et al.* Changes in soil carbon stocks across the forest-agroforest-agriculture/pasture continuum in various agroecological regions: a meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, 266, p.55–67, 2018.

CHEN, Q. *et al.* Modeling and Mapping Agroforestry Aboveground Biomass in the Brazilian Amazon Using Airborne Lidar Data. **Remote Sensing**, v. 8, n. 1, p. 21, 2015.

COELHO, A. J. P. *et al.* Atlantic Forest recovery after long-term eucalyptus plantations: The role of zoochoric and shade-tolerant tree species on carbon stock. **Forest Ecology and Management**, v. 503, p. 119789, 2022.

CONTI, G.; DÍAZ, S. Plant functional diversity and carbon storage: an empirical test in semi-arid forest ecosystems. **J. Ecol.**, v. 101, n. 1, p. 18–28, 2013.

CRAWLEY, M. J. **The R Book**. Second ed. Wiley, London, 2013.

DAVIDSON, E. A. *et al.* The Amazon basin in transition. **Nature**, v. 481, n. 7381, p. 321-328, 2012.

DYOLA, N. *et al.* Species richness is a strong driver of forest biomass along broad bioclimatic gradients in the Himalayas. **Ecosphere**, v. 13, n. 6, p. e4107, 2022.

EGUIGUREN, P. *et al.* Ecosystem Service Multifunctionality: Decline and Recovery Pathways in the Amazon and Chocó Lowland Rainforests. **Sustainability**, v.12, n.7786, p.1-26, 2020.

EHRENBERGEROVÁ, L. *et al.* Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. **Agroforest Syst**, p. 13, 2016.

FAUSET, S. *et al.* Hyperdominance in Amazonian Forest carbon cycling. **Nature Communications**, v. 6, n. 1, p. 1-9, 2015.

FEARNSIDE, P. M. **A Floresta Amazônica nas Mudanças Globais**. 2. ed. Manaus: Editora INPA, 2009.

FICK, S. E.; HIJMANS, R. J. Worldclim 2: New 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. **International Journal of Climatology**, v. 37, p. 4302-4315, 2017.

FORMAN, R. T. T. Corridors in a landscape: their ecological structure and function. **Ekológia** (CSSR), v. 2, n. 4, p. 375-387, 1983.

FORRESTER D. I.; BAUHUS J. A review of processes behind diversity: productivity relationships in forests. **Curr Forestry Rep**, v. 2, n. 1, p. 45–61, 2016.

FORRESTER, D. I. The spatial and temporal dynamics of species interactions in mixed-species forests: from pattern to process. **For. Ecol. Manage.** v. 312, p. 282–292 ,2014

FRANCIS, A. P.; CURRIE, D. J. A globally consistent richness-climate relationship for angiosperms. **The American Naturalist.**, v. 161, n. 4, p. 523-536, 2003.

FRIDLEY, J. The influence of species diversity on ecosystem productivity: How, where, and why? **Oikos**, v. 93, p. 514–26, 2001.

GARRITY, D. Agroforestry and the Future of Global Land Use. In: NAIR, P. K. R; GARRITY, D. (Eds.). **Agroforestry-The Future of Global Land Use**. Dordrecht: Springer, v. 9, p. 21-27, 2012.

GEBREWAHID, Y.; MERESSA, E. Tree species diversity and its relationship with carbon stock in the parkland agroforestry of Northern Ethiopia. **Cogent Biology**, v. 6, n. 1, p. 1728945, 2020.

GOMES, V. H. F. *et al.* Amazonian tree species threatened by deforestation and climate change. **Nature Climate Change**, v. 9, p. 547-553, 2019.

GORDON, C. E. *et al.* Aboveground carbon sequestration in dry temperate forests varies with climate not fire regime. **Global Change Biol.** v. 24, p. 4280–4292, 2018.

GOUDRIAAN, J. Adónde va el gas carbónico?: el papel da la vegetación. **Mundo Científico**, v. 126, n. 12, p. 687-692, 1992.

- HADLEY, W. R. *ggplot2* package: An implementation of the grammar of graphics, 2015.
- HONG, P. *et al.* Biodiversity promotes ecosystem functioning despite environmental change. **Ecology Letters**, v. 25, n. 2, p. 555–569, fev. 2021.
- HUANG, M. T. *et al.* Air temperature optima of vegetation productivity across global biomes. **Nat. Ecol. Evol.**, v. 3, p. 772–779, 2019.
- HUBAU, W. *et al.* Asynchronous carbon sink saturation in African and Amazonian tropical forests. **Nature**. v. 579, p. 80–87, 2020.
- HUSSON, F.; JOSSE, J. L. E. S.; MAZET, J. “FactoMineR” package Multivariate: Exploratory data analysis and data mining. **R Studio package version 1.0.14**, 2017.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: agriculture, forestry and other land use**. Institute for Global Environmental Strategies (IGES). 2006.
- JADÁN, O. *et al.* Influence of tree cover on diversity, carbon sequestration and productivity of cocoa systems in the ecuadorian amazon. **Bois et forêts des tropiques**, v. 325, n. 325, p. 35, 2015.
- JOSE, S.; BARDHAN, S. Agroforestry for biomass production and carbon sequestration: an overview. **Agroforestry Systems**, v. 86, p. 105-111, 2012.
- JOSHI, M. D.; JOSHI, C. Areas of species diversity and endemism of Nepal. **Ecosphere**, v. 13, n. 3, p. e3969, 2022.
- KELLOMÄKI, S. Climate change in the local context, with changes in growing conditions. In: **Managing boreal forests in the context of climate change. Impacts, adaptation and climate change mitigation**. Boca Raton, Florida, 2017.
- KUMAR, B. M. Carbon sequestration potential of tropical homegardens. In KUMAR B. M.; P. K. R. NAIR (Eds.), **Tropical Homegardens**. Dordrecht, Holanda: Springer, p. 185-204, 2006.
- KUMAR, B. M. Species richness and aboveground carbon stocks in the homegardens of central Kerala, India. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 140, n. 3–4, p. 430–440, 2011.
- KUMAR, B. M.; NAIR, P. K. R. (Eds.). **Carbon sequestration potential of agroforestry systems: opportunities and challenges**. Advances in Agroforestry. 2011.
- LAVERGNE, S. N. *et al.* Biodiversity and climate change: Integrating evolutionary and ecological responses of species and communities. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 41, p. 321-350, 2010.

LENNOX, G. D. *et al.* Second rate or a second chance? Assessing biomass and biodiversity recovery in regenerating Amazonian forests. **Global Change Biology**, v. 24, n. 12, p. 5680–5694, 2018.

LIU, Y. C. *et al.* How temperature, precipitation and stand age control the biomass carbon density of global mature forests. **Global Ecol. Biogeogr.**, v. 23, p. 323–333, 2014.

LONG, J. A. “Jtools” package: Analysis and Presentation of Social Scientific Data, 2020.

LOREAU, M.; HECTOR, A. Partitioning selection and complementarity in biodiversity experiments. **Nature**, v. 412, p. 72–76, 2001.

LOVEJOY, T. E.; NOBRE, C. Amazon Tipping Point. **Science Advances**, v. 4, n. 2, p. eat2340, 2018.

MAGNAGO, L. F. S. *et al.* Would protecting tropical forest fragments provide carbon and biodiversity cobenefits under REDD+? **Global Change Biology**, v. 21, p. 3455–3468, 2015.

MANAYE, A. *et al.* Tree diversity and carbon stocks in agroforestry systems in northern Ethiopia. **Carbon Balance and Management**, v. 16, n. 1, p. 14, 2021.

MATOS, F. A. R. *et al.* Secondary forest fragments offer important carbon and biodiversity cobenefits. **Global Change Biology**, v. 26, n. 2, p. 509–522, 2019.

MACDICKEN, K. G. **A guide to monitoring carbon storage in forestry and agroforestry projects**. Winrock International Institute for Agricultural Development. 1997.

MCNICOL, I. M. *et al.* Aboveground Carbon Storage and Its Links to Stand Structure, Tree Diversity and Floristic Composition in South-Eastern Tanzania. **Ecosystems**, v. 21, n. 4, p. 740–754, jun. 2017.

MICCOLIS, A. *et al.* **Restauração ecológica com Sistemas Agroflorestais: Como conciliar conservação com produção**. Centro Internacional de Pesquisa Agroflorestal – ICRAF, 2016.

MOUTINHO, P.; GUERRA, R.; AZEVEDO-RAMOS, C. Achieving zero deforestation in the Brazilian Amazon: What is missing? **Elementa: Science of the Anthropocene**, v. 4, n. 125, p.1-11, 2016.

NAIR, P. K. R. *et al.* Carbon Sequestration in Agroforestry Systems. Em: **Advances in Agronomy**. [s.l.] Elsevier, v. 108, p. 237–307, 2014.

NAIR, P. K. R.; KUMAR, B. M.; NAIR, V. D. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 1, p. 10–23, 2009.

NAIR, P. K. R.; KUMAR, B. M.; NAIR, V. D. **An Introduction to Agroforestry: Four Decades of Scientific Developments**. Cham: Springer International Publishing, 2021.

NAIR, P. K. R. **Agroforestry: trees in support of sustainable agriculture**. In: Reference module in earth systems and environmental sciences, Encyclopedia of Soils in the Environment. Elsevier, 2013.

NAIR, P. K. R. **An Introduction to Agroforestry**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 1993.

NEWAJ, R.; CHATURVEDI, O.; HANDA, A. Recent development in agroforestry research and its role in climate change adaptation and mitigation. **Indian Journal of Agroforestry**, v. 18, p. 1–9, 2016.

OLIVEIRA, G. M. T. DA S. DE. *et al.* The Value of Agroforestry Ecosystem Services Provided in Rural Communities in the Eastern Amazon (Tomé-Açu – PA, Brazil). **Journal of Agricultural Studies**, v. 8, n. 4, p. 202, 2020.

OSURI, A. M. *et al.* Tree diversity and carbon storage cobenefits in tropical human-dominated landscapes. **Conservation Letters**, v. 13, n. 2, 2020.

OUYANG, S. *et al.* Effects of stand age, richness and density on productivity in subtropical forests in China. **Journal of Ecology**, v. 107, n. 5, p. 2266–2277, 2019.

OUYANG, S. *et al.* Significant effects of biodiversity on forest biomass during the succession of subtropical forest in south China. **Forest Ecology and Management**, v. 372, p. 291–302, 2016.

PALACIOS BUCHELI, V. J.; BOKELMANN, W. Agroforestry systems for biodiversity and ecosystem services: the case of the Sibundoy Valley in the Colombian province of Putumayo. **International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services & Management**, v. 13, n. 1, p. 380–397, 2017.

PALVIAINEN, M. *et al.* Decadal-scale recovery of carbon stocks after wildfires throughout the boreal forests. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 34, n. 8, 2020.

PEARSON, R. G.; DAWSON, T. P. Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: Are bioclimate envelope models useful? **Global Ecology and Biogeography**, v. 12, p. 361–371, 2003.

PERES, C. A. *et al.* Dispersal limitation induces long-term biomass collapse in overhunted Amazonian forests. **Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America**, v.113, n.4, p. 892–897, 2016.

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

PORRO, R. *et al.* Agroforestry in the Amazon Region: A Pathway for Balancing Conservation and Development. In: NAIR, P.K.R; GARRITY, D. (Eds.). **Agroforestry-The Future of Global Land Use**. Dordrecht: Springer, v. 9, p. 391-428, 2012.

R CORE TEAM. **R version 3.6.0.: A language and environment for statistical computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2019.

RAICH, J. W. *et al.* Temperature influences carbon accumulation in moist tropical forests. – **Ecology**, v. 87, p. 76–87, 2006.

REANG, D. *et al.* Assessing tree diversity and carbon storage during land use transitioning from shifting cultivation to indigenous agroforestry systems: Implications for REDD+ initiatives. **Journal of Environmental Management**, v. 298, p. 113470, 2021.

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

RODRIGUES, A. C. *et al.* Functional composition enhances aboveground carbon stock during tropical late-secondary forest succession. **Plant Biosystems - An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology**, p. 1–11, 2022.

ROZENDAAL, D. M. A. *et al.* Biodiversity recovery of Neotropical secondary forests. **Sci. Adv**, v. 5, n. 3, p. eaau3114, 2019.

RUIZ-JAEN, M. C.; POTVIN, C. Can we predict carbon stocks in tropical ecosystems from tree diversity? Comparing species and functional diversity in a plantation and a natural forest. **New Phytol.**, v. 189, p. 978–987, 2011.

SANDANOV, D. V. *et al.* Woody and herbaceous plants of inner Asia: species richness and ecogeographic patterns. **Contemporary Problems of Ecology**, v. 13, n. 4, p. 360–369, 2020.

SANTOS, D. D. **Complementaridade de nichos e multifuncionalidade de sistemas agroflorestais sucessionais**. 2020. 116 f. Tese (Doutorado em Agroecossistemas) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020.

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, 2019.

SANTOS, S. R. M. DOS; MIRANDA, I. DE S.; TOURINHO, M. M. Estimativa de biomassa de sistemas agroflorestais das várzeas do rio juba, Cametá, Pará. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 1, p. 01–08, 2004.

SCHNEIDEWIND, U. *et al.* Carbon stocks, litterfall and pruning residues in monoculture and agroforestry cacao production systems. **Experimental Agriculture**, v. 55, n. 3, p. 452–470, 2019.

SCHROTH, G. *et al.* Commodity production as restoration driver in the Brazilian Amazon? Pasture re-agro-forestation with cocoa (*Theobroma cacao*) in southern Pará. **Sustainability Science**, v. 11, p. 277–293, 2016.

SELECKY, T. *et al.* Changes in carbon cycling during development of successional agroforestry. **Agriculture**, v. 7, n. 3, p. 25, 2017.

SHEN, Y. *et al.* Tree aboveground carbon storage correlates with environmental gradients and functional diversity in a tropical forest. **Scientific Reports**, v. 6, n. 1, p. 25304, 2016.

SIARUDIN, M. *et al.* Carbon sequestration potential of agroforestry systems in degraded landscapes in West Java, Indonesia. **Forests**, v. 12, n. 6, p. 714, 2021.

SIMBERLOFF, D.; COX, J. Consequences and costs of conservation corridors. **Conservation Biology**, v. 1, n. 1, p. 63-71, 1987.

SINGH, M.; MALHI, Y.; BHAGWAT, S. Aboveground biomass and tree diversity of riparian zones in an oil palm-dominated mixed landscape in Borneo. **Journal of Tropical Forest Science**, p. 13, 2015.

SOLIS, R. *et al.* Carbon stocks and the use of shade trees in different coffee growing systems in the Peruvian Amazon. **The Journal of Agricultural Science**, v. 158, p.450–460, 2020.

STEGEN, J. C. *et al.* Variation in above-ground forest biomass across broad climatic gradients: Forest biomass and climate. **Global Ecology and Biogeography**, v. 20, n. 5, p. 744–754, 2011.

SUÁREZ, L.R. *et al.* Cacao agroforestry systems improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 314, 15 p., 2021.

SULLIVAN, M. J. P. *et al.* Diversity and carbon storage across the tropical forest biome. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 1-12, 2017.

TAMBURINI, G. *et al.* Agricultural diversification promotes multiple ecosystem services without compromising yield. **Science advances**, v. 6, n. 45, p. eaba1715, 2020.

THAKUR, S. *et al.* Influence of environmental factors on tree species diversity and composition in the Indian western Himalaya. **Forest Ecology and Management**, v. 503, p. 119746, 2022.

THANGJAM, U. *et al.* Tree species diversity in relation to site quality and home gardens types of North-East India. **Agroforestry Systems**, v. 96, n. 1, p. 187–204, 2022.

TORRALBA, M. *et al.* Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 230, p.150–161, 2016.

TORRES, C. M. M. E. **Estocagem de carbono e inventário de gases de efeito estufa em sistemas agroflorestais, em Viçosa, MG**. 2014. 97 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2014a.

TORRES, C. M. M. E. *et al.* Sistemas agroflorestais no Brasil: uma abordagem sobre a estocagem de carbono. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 34, n. 79, p. 235-244, 2014b.

ULRICH, W. *et al.* Climate and soil attributes determine plant species turnover in global drylands. **Journal of Biogeography**, v. 41, p. 2307-2319, 2014.

VASCONCELLOS, R. C.; BELTRÃO, N. E. S. Avaliação de prestação de serviços ecossistêmicos em sistemas agroflorestais através de indicadores ambientais. **Interações**, v. 19, n. 1, p. 209-220, 2018.

VIEILLEDENT, G. *et al.* Bioclimatic envelope models predict a decrease in tropical forest carbon stocks with climate change in Madagascar. **J. Ecol.**, v. 104, p. 703–715, 2016.

VILLA, P. M. *et al.* Policy forum: Shifting cultivation and agroforestry in the Amazon: Premises for REDD+. **Forest Policy and Economics**, v. 118, 11 p., 2020a.

VILLA, P. M. *et al.* Stand structural attributes and functional trait composition overrule the effects of functional divergence on aboveground biomass during Amazon Forest succession. **Forest Ecology and Management**, v. 477, p. 118481, 2020b.

VILLA, P. M. *et al.* Woody species diversity as an indicator of the forest recovery after shifting cultivation disturbance in the northern Amazon. **Ecological Indicators**, v. 95, p.687–694, 2018.

VILLA, P. M. Anthropogenic and biophysical predictors of deforestation in the Amazon: towards integrating REDD+activities. **Bosque**, v. 38, 433–446, 2017.

WALDÉN, P.; OLLIKAINEN, M.; KAHILUOTO, H. Carbon revenue in the profitability of agroforestry relative to monocultures. **Agroforestry Systems**, v. 94, p.15–28, 2020.

WALKER, W. S. *et al.* The role of forest conversion, degradation, and disturbance in the carbon dynamics of Amazon indigenous territories and protected areas. **Proceeding of the National Academy of Science of the United States of America**, v. 117, p. 3015-3025, 2020.

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

YUAN, Z. *et al.* Multiple metrics of diversity have different effects on temperate forest functioning over succession. **Oecologia**, v. 182, n. 4, p. 1175–1185, 2016.

ZHANG, K. *et al.* The Fate of Amazonian Ecosystems over the Coming Century Arising from Changes in Climate, Atmospheric CO<sub>2</sub>, and Land Use. **Global Change Biology**, v. 21, p. 2569–2587, 2015.

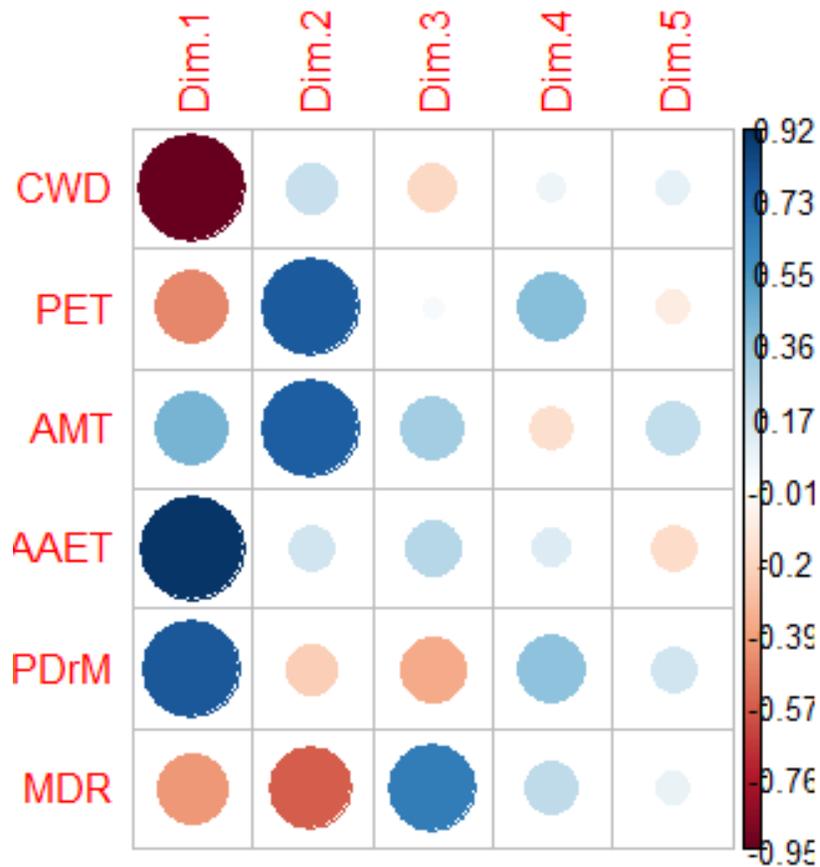
ZOMER, R. J. *et al.* Global carbon sequestration potential of agroforestry and increased tree cover on agricultural land. **Circular Agricultural Systems**, v. 2, n. 1, p. 1–10, 2022.

ZUUR, A. *et al.* **Mixed effects models and extensions in ecology with R**. Springer, New York, 2009.

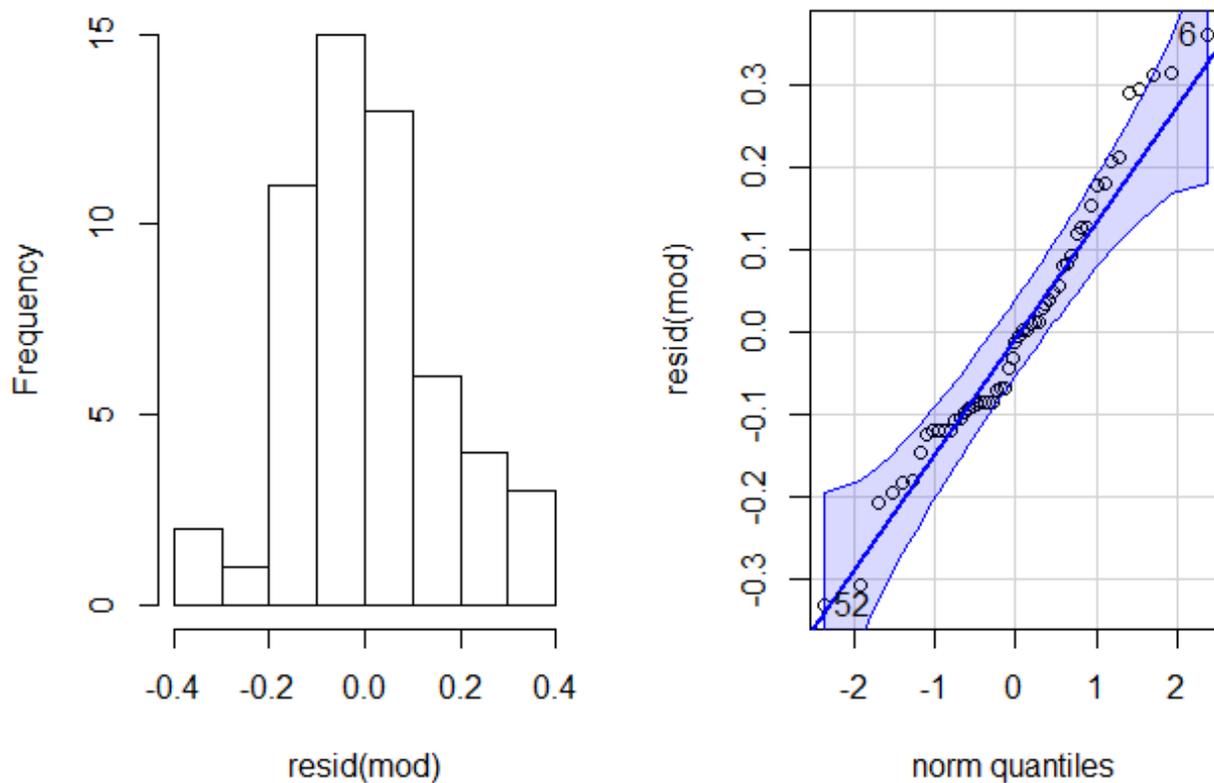
## APÊNDICES

Apêndice 1- Variáveis climáticas utilizadas como preditores para explicar a variabilidade da riqueza de espécies e estoque de carbono dos sistemas agroflorestais na Amazônia

Variável	Sigla	Fonte
Temperatura média anual	AMT	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Intervalo diurno médio	MDR	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Isotermalidade	ISTO	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Sazonalidade da temperatura	TEMP_S	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Temperatura máxima do mês mais quente	MaxTWM	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Temperatura mínima do mês mais frio	MinTCM	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Faixa anual de temperatura	TAR	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Temperatura média do trimestre mais úmido	MeTWetQ	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Temperatura média do trimestre mais seco	MeTDQ	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Temperatura média do trimestre mais quente	MeTWarQ	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Temperatura média do trimestre mais frio	MeTColQ	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Precipitação anual	AP	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Precipitação do mês mais úmido	PWetM	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Precipitação do mês mais seco	PDrM	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Sazonalidade de Precipitação	PS	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Precipitação do trimestre mais úmido	PWetQ	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Precipitação do trimestre mais seco	PDriQ	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Precipitação do trimestre mais quente	PWarQ	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Precipitação do trimestre mais frio	PColdQ	WorldClim 2.0 ( <a href="http://www.worldclim.org">www.worldclim.org</a> )
Evapotranspiração Potencial	PET	Global Aridity and PET Database – CGIAR-CSI ( <a href="http://cgiarcsi.community">cgiarcsi.community</a> )
Evapotranspiração real	AAET	Global High-Resolution Soil-Water Balance – CGIAR-CSI ( <a href="http://cgiarcsi.community">cgiarcsi.community</a> )
Déficit hídrico climático	CWD	Climatic Water Deficit - California Climate Commons ( <a href="http://calcommons.org">calcommons.org</a> )



Apêndice 2 - Análise de componentes principais (PCA) para as variáveis climáticas mais relevantes, onde os níveis de significância são baseados na correlação das variáveis climáticas com os eixos do PCA. Sendo: eixo 1 (Dim.1); eixo 2 (Dim.2); eixo 3 (Dim.3); eixo 4 (Dim.4); eixo 5 (Dim.5); Déficit hídrico climático (CWD); Evapotranspiração potencial (PET); Temperatura média anual (AMT); Evapotranspiração real (AAET); Precipitação do mês mais seco (PDrM) e Intervalo diurno médio (MDR).



Apêndice 3 – Teste da distribuição de resíduos e função de ligação mais adequada, usando histograma e gráfico Q-Q considerando os melhores modelos com  $AIC < 2,0$ .