



JULIO CESAR VIEIRA FRARE

**QUALIDADE DO SOLO E DINÂMICA DE CRESCIMENTO DE
ESPÉCIES FLORESTAIS E FRUTÍFERAS EM SISTEMAS
AGROFLORESTAIS SEM QUEIMA NA AMAZÔNIA**

**BELÉM-PA
2023**

JULIO CESAR VIEIRA FRARE

**QUALIDADE DO SOLO E DINÂMICA DE CRESCIMENTO DE
ESPÉCIES FLORESTAIS E FRUTÍFERAS EM SISTEMAS
AGROFLORESTAIS SEM QUEIMA NA AMAZÔNIA**

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Manejo e Conservação de Recursos Ambientais, para obtenção do título de doutorado.

Orientador: Prof. Dr. Sílvio Junio
Ramos

**BELÉM-PA
2023**

FICHA CATALOGRÁFICA

JULIO CESAR VIEIRA FRARE

QUALIDADE DO SOLO E DINÂMICA DE CRESCIMENTO DE ESPÉCIES FLORESTAIS E FRUTÍFERAS EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS SEM QUEIMA NA AMAZÔNIA

Tese apresentada à Universidade Federal Rural da Amazônia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Manejo e Conservação de Recursos Ambientais, para obtenção do título de doutorado.

Aprovado em _____ de 2023

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sílvio Junio Ramos
Orientador
Instituto Tecnológico Vale - ITV

Profª. Drª. Edna Santos de Souza
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – UNIFESSPA

Prof. Dr. Fabrício Willian de Avila
Universidade Estadual do Centro Oeste - UNICENTRO

Dr. Gabriel Caixeta Martins
Instituto Tecnológico Vale - ITV

Dra. Paula Godinho Ribeiro
Instituto Tecnológico Vale - ITV

DEDICATÓRIA

Aos anônimos que nunca subirão ao palco, dedico este trabalho:

“É dia de apresentação, e o teatro está lotado. O autor da próxima peça compusera uma partitura para cada membro daquela orquestra tocar. Então ele vê a si próprio como criador de seu universo e o mundo está agora sob a sua tutela: o maestro precisa estudar a obra para compreendê-la, e organiza os músicos em torno de sua execução; os músicos, por sua vez, afinam e ajustam os seus instrumentos musicais. Mas antes daquela data e hora marcadas, muito trabalho já houvera sido executado, não apenas pelos presentes, mas também por diversos anônimos que nunca subirão ao palco. Ali em cima vemos pessoas bem vestidas e alimentadas. Todos nascidos do ventre de mães fecundadas por varões. Forjar cada instrumento, cujo som em instantes se ouviria, requisitaria que árvores fossem cortadas, transportadas e serradas, primeiramente, em tábuas. A madeira, então, deveria ser beneficiada usando-se máquinas projetadas por engenheiros hábeis, nutridos pelo trabalho de grandes cozinheiras, que preparariam o alimento produzido por humildes agricultores a partir de grãos selecionados pelo pesquisador persistente. O transporte dos grãos seria feito pelo caminhoneiro intrépido, que roda o país com um pneu de borracha produzida pelos silentes extrativistas da floresta, que se desenvolve a partir de sementes dispersas por roedores famintos cuja dieta inclui também ramos tenros que brotam com os primeiros raios do sol da manhã... Quando a orquestra começa a tocar, o som dos instrumentos se confunde com a música dos microorganismos que constantemente reviram os solos, com a respiração ofegante de predadores em caça e de presas em fuga; com o balançar das folhas ao bater do vento ou ao cair da chuva, e se mistura à risada das crianças que jogam bola na rua, com o pulsar rítmico do coração que bate em todas as criaturas que triunfam sobre o planeta Terra. Porque somos todos sol, afinal. Somos todos animais. Somos árvores, terra, camponeses e tecelões. Somos todos poetas, músicos e maestros. Somos todos compositores e criadores de nós mesmos. E por vivermos todos juntos, unidos, somos um. Um só espírito, um só planeta. Uma energia única, uma vontade uníssona, uma só consciência, uma mesma origem. E quando a orquestra de Deus para de tocar, os aplausos são para todos nós.”

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, sem cuja permissão nada se faz. Depois, a todos aqueles que foram agentes de Sua vontade:

A minha família, especialmente ao meu pai, José Gilberto Frare, e a minha mãe, Valéria de Almeida Vieira, gratidão por todo amor a mim direcionado, todo cuidado e compreensão, e pelo estímulo e investimento no meu potencial pessoal e acadêmico;

Ao prof. Dr. Antônio Carlos Lola da Costa e equipe do Projeto Esecafloor, pela confiança e convite para reflorestar uma área da FLONA de Caxiuanã, e por ter gentilmente me cedido acesso a seus dados e pesquisas realizadas na área;

Aos diretores e dirigentes do IFPA, por me concederem afastamento para realização de pós-graduação, sem a qual não teria sido possível concluir este curso;

À Coordenação e Secretaria do programa PgAgro, pelo suporte necessário para a condução do curso de Doutorado em Agronomia, assim como ao corpo docente da UFRA e colegas de curso pelos ensinamentos compartilhados;

Ao meu primeiro orientador, Prof. Dr. Paulo Jorge de Souza, e a seu grupo de trabalho, pelas valiosas orientações no primeiro ano do curso, e ao meu atual orientador, Prof. Dr. Silvio Ramos, pelas contribuições, sugestões e orientações ao longo destes últimos anos, assim como à equipe do ITV por todo suporte técnico;

Ao Dr. Gabriel Caixeta Martins, pela imensa contribuição ao presente trabalho, e inestimável apoio no momento mais difícil da elaboração da tese, e pelas diversas sugestões e correções dos textos, discussões e artigos científicos;

Aos colegas do IFPA *campus* Breves, Julia Siqueira Moreau, Osnar Aragão, Renan Vasconcelos e Bruno Diego pelas generosas contribuições a este trabalho;

Aos profissionais Ivanildo Amorim de Oliveira, Ludmila de Freitas, Walmer B. R. Martins e Gracialda Ferreira Costa pelas sugestões, ideias e orientações gerais;

Aos amigos Iracelma Silva Cristo, Ronald Almeida dos Santos, Alberis Gomes da Silva e Ingrid Frare pelo suporte e apoio na coleta de dados e trabalho de campo;

Ao meu namorado, Danilson Silva de Oliveira, pelo companheirismo de sempre, e a tantos outros amigos que me apoiaram emocionalmente nesta desafiadora jornada,

Muito obrigado!

“Buscai primeiro o reino de Deus e a Sua justiça, e todas as outras coisas vos serão acrescentadas”

Bíblia, Mateus, 6:33.

RESUMO GERAL

As condições naturais de baixa fertilidade e elevada acidez dos solos da Amazônia impõem desafios para a produção agrícola na região. Neste contexto, a matéria orgânica do solo (MOS) desempenha um papel fundamental, ao garantir a ciclagem de nutrientes e melhorar a fertilidade dos solos tropicais. O uso racional dos recursos naturais, como o manejo da MOS, possibilita uma maior sustentabilidade ambiental e econômica aos sistemas produtivos da Amazônia, aqui tratada como parte de um conceito de bioeconomia para a região. A partir deste estudo, objetivou-se destacar a importância da MOS para a produção agrícola da região e avaliar o desempenho de um modelo de sistema agroflorestal implantado em áreas de floresta recém-desmatada na Floresta Nacional de Caxiuanã, Estado do Pará. Além do experimento de campo, em que foram avaliados o crescimento e a mortalidade de doze espécies de plantas em três áreas de clareira, o trabalho contou com uma revisão bibliográfica sobre a qualidade dos solos da Amazônia e as vantagens do uso de sistemas agroflorestais (SAFs). Após três anos de acompanhamento dos atributos químicos dos solos, observou-se redução de sua fertilidade, relacionada principalmente à remoção da cobertura vegetal original da floresta. A avaliação do arranjo das espécies utilizadas nos SAFs de Caxiuanã revelou que espécies como *C. glandulosa*, *C. guianensis* e *O. bacaba* são fortemente recomendadas para plantio em áreas de clareiras, ao passo que espécies frutíferas como *M. paradisiaca*, *C. papaya* e as do gênero *Theobroma* e *Psidium* devem ser inseridas no sistema somente após a melhoria da fertilidade do solo. Estes resultados sugerem, portanto, que a implantação de SAFs nestas condições deve ser realizada em duas etapas, utilizando-se espécies-chave com objetivo de melhorar a fertilidade dos solos antes da introdução de culturas mais exigentes em termos nutricionais. Conforme constatado a partir da revisão bibliográfica, a escolha das espécies, o arranjo utilizado e a adoção de práticas específicas de manejo da MOS são decisões importantes para garantir a produção agroflorestal sustentável na região.

Palavras-chave: Agricultura de corte-e-queima; Conservação do solo; desenvolvimento rural sustentável.

GENERAL ABSTRACT

The natural conditions of low fertility and high acidity of the Amazon soils pose challenges for agricultural production in the region. In this context, soil organic matter (SOM) plays a key role by ensuring nutrient cycling and improving the fertility of tropical soils. The rational use of natural resources, such as the management of SOM, enables greater environmental and economic sustainability for the productive systems of the Amazon, treated here as part of a bioeconomy concept for the region. The objective of this study was to highlight the importance of SOM for agricultural production in the region and to evaluate the performance of an agroforestry system model implemented in recently deforested areas at the National Forest of Caxiuanã, State of Pará. In addition to the field experiment, in which the growth and mortality of twelve plant species were evaluated in three forest gaps, the work included a review article on the quality of soils in the Amazon and the advantages of using agroforestry systems (AFSs). After three years of monitoring the chemical attributes of the soils, a reduction in its fertility was observed, mainly related to the removal of the original vegetation cover. The evaluation of the arrangement of the species used in the AFSs of Caxiuanã revealed that species such as *C. glandulosa*, *C. guianensis* and *O. bacaba* are strongly recommended for planting in gap areas, while fruitful species such as *M. paradisiaca*, *C. papaya* and those of the genus *Theobroma* and *Psidium* should be inserted into the system only after improving its soil fertility. These results suggest, therefore, that the implementation of AFSs under these conditions should be carried out in two steps, using key species with the objective of improving soil fertility before the introduction of more nutrient demanding crops. As evidenced from the review, the choice of species, the arrangement used and the adoption of specific practices for managing SOM are important decisions to guarantee sustainable agroforestry production in the region.

Keywords: Slash-and-burn agriculture; Soil conservation; Sustainable agriculture development.

SUMÁRIO

1. CONTEXTUALIZAÇÃO.....	12
2. BIOECONOMIA NA AMAZÔNIA: importância da matéria orgânica do solo para a manutenção dos sistemas produtivos.....	14
2.1.Introdução.....	16
2.2 Metodologia	17
2.3 Resultados e Discussão.....	18
2.3.1 Características dos solos da Amazônia	18
2.3.2 Matéria orgânica e carbono orgânico do solo	20
2.3.3 Sistemas Agroflorestais (SAFs)	22
2.3.4 A importância da seleção das espécies.....	25
2.4 Considerações Finais.....	26
Referências.....	27
3. IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS SEM QUEIMA NA AMAZÔNIA: uma abordagem em duas etapas.....	33
3.1 INTRODUÇÃO	34
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	36
3.2.1. Área experimental	36
3.2.2. Instalação do experimento.....	37
3.2.3. Acompanhamento e manutenção das parcelas experimentais	41
3.2.4. Parâmetros avaliados e cálculos de incremento anual.....	41
3.2.5.Índice de recomendação das espécies.....	43
3.2.6. Coleta e análise de solo	44
3.2.7. Análises estatísticas.....	45
3.3. RESULTADOS.....	46
3.3.1. Atributos químicos dos solos estudados	46
3.3.2. Incidência de pragas e doenças e sintomas de deficiência mineral nas plantas..	47
3.3.3. Taxa de Mortalidade e incrementos anuais	47

3.4. DISCUSSÕES.....	51
3.4.1. Características dos solos de Caxiuanã.....	51
3.4.2. Sobrevivência das espécies	56
3.4.3. Crescimento das espécies.....	59
3.4.4. Avaliação do arranjo utilizado (proposição de índice de aptidão)	64
3.5 CONCLUSÕES.....	66
REFERÊNCIAS	67
Apêndice I. Sistemas agroflorestais em Caxiuanã: arranjo e espécies utilizadas	75
REFERÊNCIAS	81
Apêndice II. Potencial de sequestro de C das espécies utilizadas e padrão gráfico de crescimento das plantas, utilizados para compor o índice de recomendação.	84
REFERÊNCIAS	85

1. CONTEXTUALIZAÇÃO

A Floresta Nacional (FLONA) de Caxiuanã é uma área protegida que tem por objetivo promover o manejo dos recursos naturais e fomentar o desenvolvimento de pesquisas científicas básicas e aplicadas e a educação ambiental, entre outros (ICMBio, 2012). Atualmente, cerca de 2.500 pessoas (400 famílias) vivem nesta Unidade de Conservação, distribuídas em dez comunidades. As principais atividades econômicas são a extração de madeira, frutos e óleos, a caça e pesca de subsistência e a produção agrícola familiar (ICMBio, 2012).

O Instituto de Desenvolvimento Florestal e da Biodiversidade do Estado do Pará – IDEFLOR-Bio desenvolve ações de fomento agroflorestal na região a partir de uma metodologia própria - o Projeto PROSAF, respaldado por instrução normativa estadual. O projeto visa promover a recuperação de áreas alteradas através da implantação de SAFs em áreas de agricultores familiares do Pará, incentivando o plantio de culturas anuais, frutíferas e espécies florestais, inclusive ameaçadas de extinção (IDEFLOR-Bio, 2021).

No ano de 2018 surgiu a oportunidade de se utilizar uma área de floresta primária recém-desmatada dentro da FLONA (BURT et al., 2021) para implantação de SAF em solos preparados sem o uso do fogo. O desempenho de espécies utilizadas em sistemas agroflorestais na Amazônia, especialmente em áreas de clareiras, sejam elas naturais ou não, é pouco estudado. Igualmente, a dinâmica dos atributos do solo em SAFs precisa ser melhor compreendida (BUTZKE et al., 2020), assim como a viabilidade de produção agroflorestal em condições de manejo sem queima na região. Diante dessas circunstâncias, procurou-se desenvolver um estudo que pudesse contribuir para a proposição de um modelo mais sustentável de uso do solo e de produção agroflorestal na Amazônia.

Assim, o objetivo deste trabalho foi avaliar a dinâmica de crescimento de espécies frutíferas e florestais consorciadas em sistema agroflorestal em áreas de clareiras em meio à mata primária, estudando o comportamento das espécies em função das características do solo e das condições microclimáticas locais. Buscou-se avaliar o desenvolvimento de um sistema agroflorestal que não fosse dependente do uso do fogo nem da aplicação de adubos químicos, como uma alternativa à

agricultura tradicional de corte-e-queima praticada pelos agricultores ribeirinhos da Amazônia.

A hipótese assumida foi de que é possível desenvolver sistemas agroflorestais na Amazônia sem recorrer à queima da cobertura do solo ou adição de insumos externos. Para tanto, foram testados arranjos diferentes, desenhados a partir de espécies pertencentes a diferentes grupos ecológicos, observando-se o desenvolvimento de cada uma nas condições experimentais.

A presente tese será composta por dois capítulos (artigos). O primeiro capítulo trata-se de um artigo de revisão bibliográfica intitulado “Bioeconomia na Amazônia: importância da matéria orgânica do solo para a manutenção dos sistemas produtivos”. Esse artigo encontra-se publicado na *Research, Society and Development*, v. 12, n. 2, p. e28512240261, 2023. DOI: 10.33448/rsd-v12i2.40261. O segundo capítulo refere-se ao artigo “Implantação de sistemas agroflorestais sem queima na Amazônia: uma abordagem em duas etapas”, que está sendo submetido à revista *Agroforestry Systems*.

2. BIOECONOMIA NA AMAZÔNIA: importância da matéria orgânica do solo para a manutenção dos sistemas produtivos

Acesso ao artigo publicado

<https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/40261/33115>

<http://doi.org/10.33448/rsd-v12i2.40261>

Resumo

Na Amazônia, as condições naturais de baixa fertilidade e elevada acidez dos solos impõem grandes desafios para a manutenção da produção agrícola. Nessas circunstâncias, a matéria orgânica é essencial para a qualidade dos solos, influenciando seus atributos físicos, químicos e biológicos. O aporte constante de biomassa em uma floresta promove a ciclagem de nutrientes, disponibilizando, em parte, os nutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas. O mesmo não ocorre na agropecuária, em que a remoção da cobertura vegetal e a falta de manejo adequado afetam consideravelmente a sustentabilidade dos sistemas de produção. O objetivo deste trabalho foi, portanto, ressaltar a importância da matéria orgânica para a conservação dos solos da Amazônia, destacando os impactos do desmatamento sobre a qualidade do solo e aspectos relevantes para a sua recuperação. Para isso, foram consultados artigos científicos indexados em bases de dados online nos últimos quinze anos, além de livros, dissertações, teses e publicações técnicas. A implantação de sistemas agroflorestais destaca-se como opção para a recuperação de áreas degradadas na Amazônia, ainda que existam diversos desafios para o seu uso, como a falta de informações acerca de quais espécies utilizar em cada situação. A recuperação de solos degradados exige projetos específicos que levem em conta, entre outros aspectos, o uso de espécies-chave para garantir o êxito deste processo, sendo necessários estudos que avaliem o desempenho das espécies melhor adaptadas às diversas condições de clima e solo das áreas a serem recuperadas.

Palavras-chave: Agricultura sustentável; Carbono orgânico; Corte-e-queima.

Abstract

In the Amazon, the natural conditions of low fertility and high soil acidity pose major challenges for maintaining agricultural production. Under these circumstances, organic matter is essential for soil quality, influencing its physical, chemical and biological attributes. The constant supply of biomass in a forest promotes nutrient cycling, making available, in part, the nutrients needed for plant development. The same does not occur in the agricultural areas, where the removal of vegetation cover and the lack of proper management considerably affect the sustainability of the production systems. The objective of this work was, therefore, to highlight the importance of the organic matter for the conservation of soils in the Amazon, discussing the impacts of deforestation on soil quality and relevant aspects for its recovery. In order to do that, scientific articles indexed in online databases published in the last fifteen years were consulted, as well as books, dissertations, theses and technical publications. The implementation of agroforestry systems stands out as an option for the recovery of degraded areas in the Amazon, although there are several challenges for its use, such as the lack of information about which species to use in each situation. The recovery of degraded soils requires specific projects that take into account, among other aspects, the use of key species to ensure the success of this process, requiring studies to assess the performance of species best adapted to the different climate and soil conditions of the areas to be recovered.

Keywords: Sustainable agriculture; Organic carbon; Slash-and-burn.

2.1. Introdução

Os ecossistemas terrestres estão em constante processo de alteração devido à ocupação humana (Sathish et al. 2022, Ribeiro et al. 2022). A intensificação de práticas agrícolas não sustentáveis, por exemplo, leva a uma acelerada degradação dos recursos naturais do planeta (Muchane et al., 2020). Aproximadamente 25% da área agricultável do mundo sofreu um declínio na qualidade e produtividade entre os anos 1990 e 2014, em função da diminuição da fertilidade do solo (Bringezu et al., 2014). Cerca de 33% dos solos do mundo encontram-se degradados ou em processo de degradação, principalmente devido ao desmatamento e consequentes processos de erosão, compactação e perda da matéria orgânica do solo (Food and Agriculture Organization [FAO], 2015a). Durante as décadas de 80 e 90, a área agrícola nas regiões tropicais do planeta aumentou 100 milhões de hectares, sendo mais da metade à custa da derrubada de floresta nativa (Gibbs et al., 2010). A conversão da vegetação natural em áreas agrícolas pode ocasionar mudanças significativas nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo, como desestruturação e compactação (Wang et al., 2012).

A Floresta Amazônica ocupa 40% da área total da América do Sul, sendo considerada a maior floresta tropical do mundo (Packham, 2015). No Brasil, a Amazônia estende-se por quase metade do território nacional (49,29%), sendo considerado o maior bioma do país, com aproximadamente 419,6 milhões de hectares (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística [IBGE], 2019). O bioma amazônico contém 40% das florestas tropicais do planeta e desempenha papel fundamental na regulação do clima e na manutenção dos ciclos biogeoquímicos (Almeida et al., 2013). Suas aproximadamente 390 bilhões de árvores, de cerca de 16.000 espécies diferentes, ajudam a estocar entre 110 e 154 bilhões de toneladas de carbono e abrigam cerca de 10% de todas as espécies conhecidas do planeta (Packham, 2015).

Embora a Amazônia possua diversos recursos em abundância, as formas de exploração destes recursos quase nunca foram sustentáveis (Instituto de Desenvolvimento Florestal e da Biodiversidade do Estado do Pará [IDEFLOR-Bio], 2021), o que ameaça a biodiversidade da floresta (Jardim et al., 2007). A maior demanda global por produtos madeireiros e não madeireiros oriundos das florestas tropicais tem contribuído, em grande parte, para o desmatamento nessas regiões (FAO, 2015b; Shearman et al., 2012). De 1988 até 2021, 20,6% da área total da Amazônia Legal tinha sido desmatada (Instituto Nacional de Pesquisa Espacial [INPE], 2022). Segundo estudo de 2008, aproximadamente 20% das áreas desmatadas da região encontravam-se abandonadas ou subutilizadas, apresentando algum grau de degradação (Almeida, 2008).

Geralmente, o desmatamento e a conversão da floresta tropical em área de cultivo resultam em redução do estoque de carbono no solo (Arévalo-Gardini et al., 2015; Bonilla-Bedoya et al., 2017), alterando a qualidade e a quantidade de matéria orgânica, e, consequentemente, a atividade da biomassa microbiana do solo (Moreira & Malavolta, 2004). Alterações físicas do solo também impactam o processo de decomposição microbiana, acelerando as taxas de decomposição da matéria orgânica do solo exposto, em consequência da ruptura de seus macroagregados (Silva-Júnior, 2007). Este distúrbio pode levar a uma interrupção dos processos biológicos responsáveis pela ciclagem de nutrientes (Lima et al., 2011), reduzindo os teores de nutrientes como nitrogênio e fósforo, principalmente em solos altamente intemperizados (Reed et al., 2011).

A carência de conhecimento técnico e difusão de informações relacionadas ao manejo de solos e de cultivos tem favorecido o abandono de áreas agrícolas na Amazônia após curto período de tempo, perpetuando a prática de corte-e-queima, e consequentemente, a abertura de novas áreas para plantio (Luizão et al., 2009). Atualmente, 90% da cobertura florestal original do nordeste paraense foram convertidos em vegetação

secundária (IDEFLOR-Bio, 2021). No sudeste do estado, na bacia hidrográfica do rio Itacaiúnas, a conversão da cobertura florestal em pastagens de 1973 a 2013 levou a modificações significativas no ciclo hidroclimatológico da região, evidenciando condições ambientais mais secas, com aumento da temperatura do ar e diminuição na umidade relativa (Souza-Filho et al., 2016).

Práticas inadequadas de preparo e manejo do solo estão entre as principais causas de degradação de solos na Amazônia (Silva-Júnior, 2007). Os solos tropicais geralmente são mais pobres em nutrientes do que os solos temperados, mas possuem uma vida microbiana muito mais intensa, o que contribui para a decomposição da matéria orgânica e disponibilização de nutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas (Primavesi, 2016). Por este motivo, a adoção de técnicas de manejo que objetivam manter a cobertura do solo e aumentar o aporte de resíduos vegetais no sistema pode ser uma estratégia para manter a fertilidade dos solos e melhorar a produtividade agrícola na região (Sousa et al., 2009).

A agricultura de corte-e-queima, amplamente praticada na Amazônia brasileira, gera consequências ambientais negativas, com destaque para o desmatamento e a erosão dos solos, associadas ao uso do fogo (Moreira et al., 2009; Tremblay et al., 2015). A queima da cobertura florestal elimina a matéria orgânica, deixando o solo exposto a chuvas intensas que podem levar à compactação dos solos e reduzir a taxa de infiltração de água, facilitando o processo de erosão (Sá et al., 2007). A adoção de sistemas conservacionistas tem apresentado potencial para reverter o processo de degradação química, física e biológica dos solos agrícolas nas regiões tropicais (Arévalo-Gardini et al., 2015; Ronquim, 2020). Na Amazônia, todavia, o uso de práticas mais sustentáveis de produção agrícola, como os sistemas agroflorestais, ainda é incipiente, sendo necessário divulgar e testar modelos específicos para a região (Luizão et al., 2009).

Diante deste cenário, é grande o desafio de manejar as áreas já desmatadas, combinando desenvolvimento econômico com sustentabilidade ambiental (Brienza-Júnior et al., 2009; Lagneaux et al., 2021). Portanto, este trabalho tem por objetivo discutir a importância da preservação da matéria orgânica do solo e da recuperação de áreas degradadas, visando o uso mais sustentável dos solos na Amazônia.

2.2 Metodologia

A metodologia de pesquisa utilizada foi a revisão bibliográfica narrativa. A partir de fontes acadêmicas e científicas, procurou-se atualizar os leitores quanto ao objeto deste estudo: a importância da matéria orgânica do solo para a produção sustentável na Amazônia. A revisão narrativa permite compreender melhor as lacunas de conhecimento existentes sobre determinado conteúdo, apontando para quais áreas específicas deverão ser direcionadas as futuras pesquisas sobre este assunto (Corrêa et al., 2013). Desta forma, a metodologia utilizada permitiu trazer narrativas conceituais e explicativas acerca do tema escolhido, possibilitando também a sua contextualização histórica. Por exemplo, a partir da definição do que é a qualidade do solo pôde-se discutir o histórico de uso da terra na Amazônia e como as práticas utilizadas têm contribuído para a degradação dos solos da região. O artigo também traz um componente crítico ao trazer o posicionamento dos autores acerca do conteúdo abordado por outros autores a partir da análise de conteúdo das obras selecionadas, conforme proposto por Severino (2016).

Esta revisão bibliográfica foi elaborada no ano de 2022, a partir de artigos científicos indexados na base de dados da Web of Science, portal CAPES, além de consultas a livros, dissertações, teses e publicações técnicas. A seleção dos artigos foi realizada com base nos seguintes critérios de inclusão: o artigo deveria ser original, escrito em idioma de língua portuguesa ou inglesa, acessível na íntegra em formato eletrônico e

publicado nos últimos quinze anos, ou seja, entre 2007 e 2022. Os critérios de exclusão adotados foram: artigos publicados em outros idiomas, artigos de acesso restrito ou que não apresentassem resumo completo.

A pesquisa na base de dados foi realizada combinando-se as seguintes palavras-chave: “tropical”, “agroforestry” e “organic matter”, tendo a palavra “tropical” sido substituída por “Amazon” em uma segunda busca. Após aplicação dos filtros utilizados para atender aos critérios estabelecidos, para a busca “tropical”, “organic matter” e “agroforestry” foram encontradas 208 obras enquanto para a combinação “Amazon”, “organic matter” e “agroforestry” foram encontradas 36 obras publicadas na plataforma. Após leitura dos títulos dessas obras, foram excluídas aquelas cujo tema extrapolava o objeto desta pesquisa, a exemplo de artigos que tratavam de agroflorestas em áreas urbanas, análises de viabilidade econômica dos sistemas, diversidade genética de seus componentes, sistemas agrossilvopastoris, estudo de populações microbianas, comunidade de insetos e macrofauna dos solos, serviços ambientais como polinização, entre outros. Após esta seleção prévia, foi realizada a leitura do resumo dos trabalhos restantes, sendo priorizados estudos realizados em Latossolos, com maior foco na análise dos atributos químicos do solo, ciclagem de nutrientes e potencial de estoque de carbono. Também foram priorizados trabalhos que apresentavam enfoque na recuperação de áreas degradadas pela atividade agropecuária, práticas de manejo de solos e modelos alternativos à agricultura de corte-e-queima. Em relação aos estudos na Amazônia, deu-se prioridade àqueles realizados na Amazônia brasileira. Deste total, finalmente, foram selecionadas aproximadamente 80 publicações, que serviram de base para esta revisão. A este quantitativo foram acrescentados livros, teses e dissertações, eventualmente consultados para ajudar a definir conceitos e adicionar comentários que os autores julgaram pertinentes.

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Características dos solos da Amazônia

Qualidade do solo pode ser definida como a capacidade do solo em sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade ambiental e promover a saúde de plantas e animais (Doran & Parkin, 1996). A preservação da qualidade do solo é um fator determinante para assegurar os serviços e benefícios oferecidos por um determinado ecossistema (Bringezu et al., 2014). Dentre os serviços prestados pelo solo, estão a disponibilização e reserva de nutrientes para as plantas, o sequestro de carbono e o controle biológico de pragas e doenças (Muchane et al., 2020). A perda de qualidade de um determinado solo pode ser seguida da interrupção de alguns dos seus processos biológicos, os quais são importantes para a ciclagem de nutrientes, acarretando diminuição da produção vegetal nestes solos (Lima et al., 2011).

As técnicas de conservação empregadas para a recuperação de solos dependem do estudo dos atributos do solo da região em questão (Souza et al., 2018). A restauração florestal é uma ferramenta que permite a recuperação de áreas perturbadas, ou que sofreram alteração da sua capacidade funcional de oferecerem serviços ecológicos (Chazdon, 2008). A recuperação de áreas degradadas faz-se especialmente necessária em situações em que a regeneração natural, por si só, não é capaz de garantir o retorno da cobertura vegetal original (Celentano et al., 2020).

Em termos qualitativos, existe grande diversidade de solos na Amazônia. Diferentes materiais de origem, somados à ação do intemperismo, favoreceram a diferenciação dos atributos físicos e químicos dos solos da região (Quesada et al., 2011). Em geral, a maioria dos solos compartilham características que impõem limitações à produção agrícola, principalmente devido à sua baixa fertilidade natural (Chaves et al., 2020;

Moreira et al., 2009). A acidez e a toxidez por alumínio também figuram entre as mais frequentes limitações à produtividade em solos da Amazônia (Longo & Espíndola, 2000). Em termos quantitativos, entretanto, os Argissolos e Latossolos são as classes de solos mais frequentes na região, sendo caracterizados por solos de terra firme, bem drenados, ácidos e com baixa capacidade de troca catiônica (CTC) (Quesada et al., 2011). De acordo com Souza et al. (2018), aproximadamente 75% dos solos no Estado do Pará pertencem a essas duas classes.

Caracterizações dos atributos químicos de Latossolos realizadas por diversos autores em diferentes regiões da Amazônia evidenciam baixos valores de pH, alto teor de alumínio, alta saturação por alumínio e baixa CTC efetiva (Chaves et al., 2020; Malhi et al., 2009; Moreira & Malavolta, 2004; Souza et al., 2018). Além da baixa disponibilidade de bases trocáveis e alta concentração de alumínio, que está associada a um pH ácido, os solos da Amazônia, em geral, apresentam baixa concentração de nutrientes, como fósforo e nitrogênio (Luizão et al., 2009; Silva-Júnior et al., 2009), principalmente em decorrência do processo de intensa intemperização a que estão sujeitos (Chaves et al., 2020; Mantovanelli et al., 2016; Quesada et al., 2010). Diante de valores de CTC efetiva muito baixos, é especialmente importante utilizar práticas de manejo que visem aumentar ou manter a matéria orgânica do solo, diminuindo assim o potencial de lixiviação de nutrientes (Lopes & Guimarães Guilherme, 2016).

O processo de intemperismo pode levar à acidificação dos solos, promovendo a remoção de bases, especialmente cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e potássio (K^+), que são então substituídas nos colóides do solo pelos íons H^+ , ferro (Fe) e alumínio (Al) (Ronquim, 2020). Nesta situação, um aumento da matéria orgânica (MO) pode significar menores teores de alumínio, uma vez que os compostos orgânicos aniônicos presentes na MO podem complexar os cátions Al^{+3} livres na solução do solo (Machado et al., 2017).

A acidez do solo impacta direta e indiretamente seus atributos físicos, químicos e biológicos, influenciando desta forma o crescimento das plantas. Além de interferir na disponibilidade de nutrientes, podendo causar deficiência ou toxidez de elementos nas plantas, a acidez do solo afeta negativamente a atividade microbiológica do solo, influenciando a taxa de decomposição da MO e a mineralização de nutrientes (FAO, 2015a). Mudanças do pH com o tempo dependem das propriedades do solo, cobertura vegetal, qualidade da MO (serapilheira) e condições ambientais (Arévalo-Gardini et al., 2015). As árvores, por exemplo, podem exercer um papel importante na redução da acidez do solo uma vez que, devido à maior área de exploração de suas raízes, podem capturar nutrientes que de outra forma seriam perdidos por lixiviação, reciclando e mantendo cátions na solução do solo (Weil & Brady, 2017).

O uso de corretivos agrícolas neutraliza o alumínio trocável, aumentando a saturação por bases (V%) e os valores de pH do solo a partir da neutralização de parte do hidrogênio adsorvido (Ronquim, 2020). Práticas de manejo que visem aumentar ou manter a matéria orgânica do solo são fundamentais para aumentar a fertilidade dos solos, assim como a prática da calagem, que também ajuda a diminuir o potencial de lixiviação de nutrientes em solos com pH ácido (Lopes & Guimarães Guilherme, 2016). Todavia, o uso de calcário e fertilizantes na região norte do Brasil ainda é incipiente devido a diversos fatores, como o preço elevado dos insumos, a dificuldade logística de transporte e armazenamento, a tradição de uma agricultura de subsistência não tecnificada na região, a falta de suprimento e abastecimento destes insumos, entre outros (Cravo et al., 2020).

No Pará, o uso de insumos agropecuários está principalmente associado a culturas comerciais (ex.: pimenta-do-reino, cacau, dendê, guaraná, coco, laranja, hortaliças, milho, arroz, cana-de-açúcar, feijão-caupi e soja) (Cravo et al., 2020). Entre os pequenos produtores, o aumento da disponibilidade de nutrientes no solo e a

correção da acidez são frequentemente obtidos a partir da queima da vegetação, uma prática conhecida como corte-e-queima (Frare et al., 2017; Tremblay et al., 2015).

A agricultura de corte-e-queima leva à emissão de carbono (Celentano et al., 2020), e tem como principal efeito negativo a perda da MO do solo (Silva-Júnior, 2007). Após o desmatamento e queima do material vegetal, há uma considerável tendência de inibição da biomassa microbiana do solo (Moreira & Malavolta, 2004). Com a queima, há uma tendência de aumento do pH devido à formação de óxidos e a liberação de cátions alcalinos trocáveis no solo (Mcgrath et al., 2001). Inicialmente, a queima do material orgânico do solo promove a fertilização pelas cinzas, aumentando os teores de nutrientes como cálcio, magnésio, fósforo e potássio (Machado et al., 2017). Os benefícios da queimada, contudo, desaparecem rapidamente (Numata et al., 2007), e mesmo com a melhora após a queima, os solos continuam com baixos teores de nutrientes (Moreira & Malavolta, 2004). Após curto período de tempo, estes solos ficam sujeitos à compactação, decrescem sua fertilidade e o acúmulo de carbono, e aumenta a sua susceptibilidade à erosão (Souza et al., 2018).

Nos solos tropicais, ácidos e sujeitos à lixiviação, os nutrientes liberados pela queima da matéria orgânica estão especialmente vulneráveis à perda se não forem tomadas medidas de manutenção e manejo da matéria orgânica para trabalhar a fertilidade do solo (Melo et al., 2006; Moreira et al., 2009). O cultivo contínuo em condições de corte e queima pode levar a uma diminuição dos teores de nutrientes como fósforo, potássio, nitrogênio e manganês (Longo & Espíndola, 2000). De acordo com Brienza-Júnior et al. (2009) e Luizão et al. (2009), diversas alternativas de sistemas de produção agrícola sem o uso de fogo têm sido testadas na Amazônia, como os sistemas agroflorestais sem queima e o sistema Bragantino (Cravo et al., 2005). Experimentos com corte-e-trituração (ou “slash-and-mulch”) foram realizados em diversas regiões da Amazônia (Sá et al., 2007) utilizando-se tratores e máquinas, o que os torna praticamente inviáveis em lugares remotos da região. Estas iniciativas de produção sustentável, entre muitas outras, podem ser consideradas bem sucedidas. Todavia, são dependentes de insumos externos (aplicação de fertilizantes e calcário), geralmente, a um custo bastante elevado.

2.3.2 Matéria orgânica e carbono orgânico do solo

A matéria orgânica do solo (MOS) é importante fonte e reserva de nutrientes para os microrganismos do solo e plantas, principalmente nitrogênio, enxofre, potássio e micronutrientes (Arévalo-Gardini et al., 2015), sendo também uma das principais fontes de fósforo na forma disponível para as plantas, em liberação contínua por meio da mineralização do fósforo orgânico (Silva-Júnior, 2007). A MOS pode influenciar os atributos químicos, físicos e biológicos dos solos (Signor et al., 2018), estando relacionada a diversas características, como estabilidade dos agregados e estrutura, taxa de infiltração e retenção de água, resistência à erosão, CTC, lixiviação de nutrientes, entre outros (Silva-Júnior, 2007). Ao aumentar a disponibilidade de nutrientes, a MOS favorece o crescimento das plantas e interfere na biodiversidade do solo (Veen et al., 2019; Wu et al., 2017).

A matéria orgânica fornecida pela serapilheira é a principal fonte de nutrientes para as plantas nas regiões tropicais (Caldeira et al., 2019; Moreira & Malavolta, 2004), havendo relação direta entre a diversidade de espécies de uma área, a qualidade da liteira e a disponibilidade de nutrientes (Machado et al., 2017). A decomposição da serapilheira pelos microrganismos do solo promove a ciclagem de nutrientes, melhorando a fertilidade do solo (Chaves et al., 2020), principalmente nas camadas superficiais, de 0 a 20 cm (Butzke et al.,

2020). A remoção da serapilheira, por outro lado, pode prejudicar a atividade dos microorganismos do solo, com consequências negativas para a ciclagem de nutrientes (Maia et al., 2015; Reed et al., 2011).

A produção total de serapilheira de uma floresta é influenciada por fatores climáticos como temperatura, umidade e precipitação, e pela cobertura do dossel, densidade e tamanho das árvores (Silva et al., 2018). Geralmente, quanto maior o volume de serapilheira, mais matéria orgânica haverá no solo (Pereira et al., 2013). Grande parte das raízes está concentrada na porção superior do solo, onde a concentração dos elementos mineralizados pela biota do solo é maior, o que aumenta as chances de absorção de nutrientes pelas plantas diante do risco de lixiviação (Machado et al., 2017). A liberação de diversas substâncias a partir da decomposição da matéria orgânica possibilita a agregação do solo, protegendo-o da ação de chuvas (Primavesi, 2006).

É através do processo contínuo de decomposição da MOS que os diversos organismos do solo se nutrem da energia nela contida e proporcionam uma série de benefícios para a fertilidade do solo, ajudando a manter a sua produtividade (Primavesi, 2006). Segundo a autora, em condições tropicais os solos agrícolas, ao contrário dos solos das florestas, apresentam predomínio de bactérias aeróbias de intensa atividade, e a acumulação de húmus é mais difícil devido ao processo de decomposição rápida da matéria orgânica. O revolvimento excessivo do solo e consequente exposição à chuva e luz solar ajudam a acelerar a decomposição da MOS, reduzindo drasticamente o seu potencial produtivo (Bernardes et al., 2009; Ronquim, 2020). Caso não seja realizado o manejo adequado da MOS após a conversão de floresta em áreas de cultivo, o solo pode perder até 50% do teor de matéria orgânica em função da maior decomposição microbiana e susceptibilidade à erosão (Silva-Júnior, 2007). Portanto, o manejo da matéria orgânica torna-se fundamental para a manutenção da fertilidade dos solos tropicais.

Os teores de MOS dos solos tropicais geralmente situam-se entre 3 e 17%, dependendo do tipo de solo (Bonilla-Bedoya et al., 2017). No Estado do Pará, diversos autores avaliaram o teor de MOS em Latossolos sob cobertura florestal, como por exemplo, Malhi et al. (2009), na Floresta Nacional de Caxiuanã; Chaves et al. (2020), no município de Tomé-Açu, e Souza et al. (2018), abrangendo diversas regiões do estado. Valores de MOS menores que 1,5% são considerados baixos; entre 1,5% e 3%, médios, e acima de 3%, altos (Lopes & Guimarães Guilherme, 2016). Os teores de MOS encontrados nesses estudos foram de 2,9%, 1,5% e 2,0%, respectivamente, evidenciando os valores médios de MOS naturalmente encontrados nos Latossolos da região.

O maior constituinte da MOS é o carbono orgânico (CO), que desempenha um papel fundamental em quase todas as funções do solo (Signor et al., 2018). O aumento da biomassa de resíduos vegetais que formam a serapilheira é um dos principais responsáveis pelo acúmulo de carbono no solo, que se dá a partir da estabilização da MOS (Butzke et al., 2020). O estoque de C está relacionado, portanto, ao fornecimento contínuo e diversificado de matéria orgânica, responsável pela estrutura e desenvolvimento da comunidade microbiana no solo (Lammel et al., 2015). Em geral, quanto mais matéria orgânica, maior o estoque de carbono de um determinado solo.

A MOS pode ser protegida quimicamente em associações com a argila e, fisicamente, em agregados do solo (Perrin et al., 2014). A intensificação da atividade biológica e a ciclagem de nutrientes promovida pelas árvores e raízes formam os agregados do solo, conferindo estabilidade estrutural, resistência à erosão e maior capacidade de retenção de água (Kamau et al., 2017; Muchane et al., 2020). A formação de agregados do solo, por sua vez, está relacionada à sua capacidade de armazenar carbono. O conteúdo de CO do solo tende a

aumentar proporcionalmente com o aumento dos agregados, uma vez que os mesmos contêm C em sua formação (Fonte et al., 2010). Por outro lado, a diminuição do tamanho e perda de estabilidade dos macroagregados do solo pode indicar uma diminuição do conteúdo de carbono (Butzke et al., 2020). Souza et al. (2018) avaliaram os atributos físicos, químicos e mineralógicos de diversas classes de solos no estado do Pará, evidenciando uma forte associação entre o teor de CO e as concentrações de fósforo, cálcio, magnésio, potássio e pH, principalmente na camada superficial do solo.

Tanto a MOS como o CO podem ser utilizados como medida para avaliar se a conversão de floresta em áreas agrícolas atuará como fonte ou dreno de carbono (Carvalho et al., 2010; Nair et al., 2009), sendo o manejo dos solos um fator determinante para o acúmulo de C no solo. Quando o sistema de plantio tem condições de garantir quantidades significativas de MO para o solo e manter a umidade, os teores de C microbiano se assemelham aos da vegetação nativa (Signor et al., 2018). Práticas como a aração do solo, por outro lado, podem ocasionar perda significativa de CO (Silva-Olaya et al., 2013).

Geralmente, a diminuição de CO ou do teor de MOS em áreas de cultivo se deve, entre outros fatores, à redução da quantidade de resíduos fornecidos pelas plantas na forma de serapilheira, ao aumento da atividade microbiana causada por melhores condições de aeração, temperatura mais elevada e maior amplitude de umedecimento e secagem no solo, que facilitam o processo de degradação da matéria orgânica (Silva-Júnior, 2007). O acúmulo de CO ao longo do perfil do solo de um sistema agrícola alterado pode demorar de 15 a 30 anos, aproximadamente, para apresentar padrões semelhantes ao da vegetação nativa (Monroe et al., 2016). Além disso, grande parte deste armazenamento se dá em frações orgânicas grosseiras (50-200 e 200-2000 μm), caracterizadas por alta instabilidade (Cardinael et al., 2015).

As florestas tropicais desempenham um papel particularmente importante no ciclo global de carbono (Malhi et al., 2009). O sequestro de C atmosférico envolve a captação de C através da fotossíntese e o armazenamento na biomassa vegetal e nos solos (Atangana et al., 2014). Estima-se que a floresta Amazônica armazene de 50 a 60 Pg (10^{15}g) de C na vegetação viva acima do solo (Mitchard et al., 2014). Diante destes fatos, pesquisas recentes têm buscado soluções que diminuam o impacto da atividade humana sobre o meio ambiente, principalmente no que se refere à emissão de carbono para atmosfera e consequente aumento do efeito estufa (Somarriba et al., 2013). O sequestro de carbono pelas plantas é uma maneira de contribuir com a mitigação dos efeitos decorrentes das mudanças climáticas, e pode ser alcançado através de projetos de reflorestamento e recuperação de área degradada (West et al., 2010).

O desmatamento da Amazônia no Brasil é responsável, em grande parte, pelas emissões de C do país (Berenguer et al., 2014). Porém, maior quantidade de C é armazenada no solo do que na biomassa vegetal acima do solo, fazendo com que a MOS seja um dos maiores reservatórios de C da superfície terrestre, algo em torno de 1200 a 1500 Pg de C (Lal, 1997). A adoção de práticas culturais conservacionistas, ao contrário do preparo do solo convencional (aração) e o uso do fogo (corte-e-queima), reduz a decomposição e a mineralização da MOS, preservando o C do solo.

2.3.3 Sistemas Agroflorestais (SAFs)

Sistemas agroflorestais (SAFs) são sistemas em que culturas agrícolas são consorciadas com árvores em arranjos espaciais e sequências ao longo do tempo, apresentando diversas vantagens e interações entre seus componentes (Coelho, 2017; Lagneaux et al., 2021; Sathish et al., 2022). Essas integrações podem variar e

envolver apenas integração lavoura–pecuária (ILP), integração pecuária–floresta (IPF) ou integração lavoura–floresta (ILF). Estima-se que já existam quase 15 milhões de hectares de área cultivada com algum tipo de sistemas de integração no Brasil (Ronquim, 2020). Na Amazônia brasileira, os SAFs ocorrem predominantemente em áreas de agricultura de corte-e-queima, mas também em quintais agroflorestais (Silva, 2012). A maioria dos SAFs amazônicos é do tipo silviagrícola, ou seja, em que espécies frutíferas ou alimentícias são associadas a espécies florestais, com o principal objetivo de fornecer alimentação e madeira, além de promover o enriquecimento da vegetação (Brienza-Júnior et al., 2009).

Os SAFs desempenham funções ecológicas importantes como o controle da erosão do solo, redução da lixiviação de nutrientes e aumento do sequestro de carbono (Wilson & Lovell, 2016), sendo considerados uma estratégia para recuperar serviços do ecossistema em áreas degradadas (Cardozo et al., 2022; Schwarza et al., 2021), inclusive em solos degradados após a queima (Celentano et al., 2020). Os SAFs permitem a manutenção e até mesmo o aumento da fertilidade do solo graças a sua capacidade de promover a ciclagem de nutrientes, protegendo e alimentando a camada de liteira da superfície do solo (Luizão et al., 2009). A ciclagem de nutrientes é maior nos SAFs do que nas monoculturas devido à crescente produção de serapilheira e maior atividade microbiológica no solo (Coelho, 2017), razão pela qual a disponibilidade do nitrogênio (N), por exemplo, tende a ser maior nos SAFs (Weil & Brady, 2017). Esta maior disponibilidade de N nos SAFs também pode estar relacionada à fixação de N pelas espécies florestais do sistema (Tschardt et al. 2011) e sua capacidade de, com sua rede de raízes profundas, capturar o N que de outra forma seria perdido por lixiviação (Kremen & Miles, 2012).

O fornecimento de material vegetal pelas árvores do SAF contribui para a cobertura do solo, protegendo-o contra o processo de erosão causado pela perda da camada protetora do solo formada pela serapilheira (Labrière et al., 2015). De acordo com Martins et al. (2019), a quantidade e a qualidade de serapilheira, micro e mesofauna do solo são maiores e melhores no SAF do que em áreas de pastagem, por exemplo. Segundo esses autores, os SAFs favorecem o aumento de serapilheira rica em N, que por sua vez, viabiliza a colonização da fauna do solo não somente onde foi implantado, mas também em áreas próximas. Por esta razão, a implantação de SAFs ajuda a restaurar a comunidade microbiana de solos degradados após a conversão de florestas nativas em sistemas de monocultivo (Wang et al., 2017).

A eficiência de um sistema agroflorestal depende de um bom arranjo e manejo (Coe et al., 2014). Wu et al. (2017) discutiram sobre a dificuldade de se criar um design de SAF com base em princípios ecológicos para superar as limitações ambientais dos plantios de monoculturas. É preciso considerar a inclusão de tanto maior número de espécies quanto possível, pois a maior diversificação na composição de arranjos agroflorestais fortalece e mantém a biodiversidade local (Salomão et al., 2014). De acordo com estes autores, a diversidade de espécies permite que o sistema seja mais resiliente ao proporcionar e manter altos níveis de matéria orgânica, favorecendo maior diversidade de microorganismos no solo e estimulando um sistema radicular mais robusto, capaz de explorar os diversos estratos do solo. Essas condições permitem manter o solo mais produtivo e eficiente na utilização de recursos cruciais para as plantas, como água, luz e nutrientes (Butzke et al., 2020).

De acordo com Schwarza et al. (2021), para que um SAF seja considerado um ecossistema biodiverso funcional, ele precisa atender a certos requisitos, como por exemplo, apresentar ao menos seis espécies florestais diferentes, de três grupos funcionais distintos: duas pioneiras de rápido crescimento, duas pioneiras fixadoras de N, e duas espécies intermediárias que sejam tolerantes à sombra. Espécies de crescimento rápido toleram

ambientes com alta incidência de luz e solos pouco férteis. Além disso, produzem grande quantidade de biomassa, sendo importantes para o sequestro de C da atmosfera (Silva et al., 2016).

O planejamento e o desenho dos arranjos de um SAF devem considerar os diferentes estratos a serem ocupados pelas plantas no decorrer do tempo, obedecendo-se os ciclos de vida de cada espécie e suas necessidades ecofisiológicas, de maneira a viabilizar a sucessão ecológica na área (Miccolis et al., 2016). A rápida recuperação da vegetação a partir do plantio de espécies pioneiras é fundamental para melhorar as condições microclimáticas locais e a fertilidade do solo, o que facilita o estabelecimento de outras espécies na sequência (Asase & Tetteh, 2016; Meli & Dirzo, 2013). Esta mistura de plantas que ocuparão diferentes estratos permite a otimização do espaço e melhor aproveitamento dos recursos (água, luz e nutrientes) ao longo do tempo.

Globalmente, a limitação de conhecimento científico a respeito dos SAFs, naturalmente complexos; a falta de apoio institucional e de recursos para o seu desenvolvimento e a escassez dos serviços de extensão rural e mão de obra são impedimentos para a sua adoção (Nair et al., 2009; Wilson & Lovell, 2016). No Brasil, ainda há escassez de estudos e informações sobre a adoção da agrofloresta (Braga et al., 2019). Esta baixa adoção pode ser explicada por fatores históricos e culturais e falta de conhecimento e de políticas públicas direcionadas para este fim (Coelho, 2017).

A maioria dos casos de estudo com SAFs nos trópicos úmidos envolve o uso de espécies frutíferas, notadamente cacau e café, em consórcio com espécies de crescimento rápido e alto valor de mercado, como eucalipto, teca ou seringueira (Arévalo-Gardini et al., 2015; Brienza-Júnior et al., 2009; Niether et al., 2018; Tschardt et al. 2011). Na Amazônia, a maior parte das espécies utilizadas em SAFs está voltada para a produção de alimentos, sendo necessário um trabalho de conscientização sobre a importância da adoção de espécies florestais nativas, pois, apesar de seu potencial econômico, estão sendo subutilizadas (Silva et al., 2008).

Brienza-Júnior et al. (2009) revisaram diversas publicações sobre SAFs na Amazônia. Segundo os autores, dentre as 330 espécies utilizadas, as mais frequentes são o cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*), a pupunha (*Bactris gasipaes*), castanha do Brasil (*Bertholletia excelsa*), banana (*Musa sp.*), mandioca (*Manihot esculenta*), mogno (*Swietenia macrophylla*), açaí (*Euterpe oleracea*), ingá (*Inga edulis*), milho (*Zea mays*), paricá (*Schyzobium amazonicum*), seringueira (*Hevea brasiliensis*) e cacau (*Theobroma cacao*). A grande maioria dos SAFs estudados, entretanto, utilizam no máximo seis espécies, evidenciando a complexidade e a dificuldade de manejo deste sistema de produção. Em outro estudo, Silva et al. (2008) avaliaram 108 SAFs na Amazônia para identificar as principais espécies florestais utilizadas na região. Os autores identificaram 48 espécies, sendo que aproximadamente um terço delas havia sido utilizado em apenas um sistema.

Estratégias de exploração de madeira em SAFs têm favorecido a recuperação da vegetação nativa na Amazônia, com efeitos benéficos para o sequestro de C, manutenção da vida selvagem e geração de renda para as famílias em longo prazo (Blinn et al., 2013), sendo por esta razão, recomendada como opção sustentável de uso do solo na região (Oliveira et al., 2017). Todavia, a escassez de informações a respeito do desempenho e capacidade específica das diversas espécies florestais em adaptarem-se aos estresses ambientais que afetam suas funções fisiológicas e o seu desenvolvimento limita o seu uso em áreas de reflorestamento (Craven et al., 2011; Park et al., 2010).

2.3.4 A importância da seleção das espécies

As espécies utilizadas para reflorestamento e recuperação de área degradada no bioma amazônico devem se comportar de maneira satisfatória diante das condições de solo prevalentes, como baixa fertilidade, alta concentração de alumínio trocável, alta taxa de lixiviação e acidez elevada (Chaves et al. 2020; Mantovanelli et al. 2016). Recomenda-se a utilização de plantas-chave que ocorrem no ecossistema de referência para facilitar o processo de recuperação dessas áreas (Campos & Sartorelli, 2015).

A seleção criteriosa das espécies a serem utilizadas em projetos de recuperação de áreas degradadas é fundamental para o sucesso da iniciativa (Salomão et al., 2013). O projeto de recuperação deve prever a inclusão de espécies de grupos e funções ecológicas distintas; espécies de baixa dispersão natural; espécies que ofereçam abrigo e fonte de alimentação para a avifauna, e espécies raras ou ameaçadas de extinção (Lamb & Gilmour, 2003). Aspectos ambientais como a capacidade de produção de biomassa, sequestro de carbono das espécies e seu potencial em prevenir erosão do solo também deverão ser considerados (Schwarza et al., 2021).

A seleção de espécies com vista à recuperação ecológica deve ser fundamentada em base científica a partir de pesquisas desenvolvidas no local a ser restaurado ou nas suas proximidades (Vieira et al., 2008). Espécies nativas apresentam grande potencial para promover a recuperação dos solos, a conservação dos recursos naturais e a manutenção da biodiversidade local (Gris et al., 2012). Historicamente, contudo, o plantio de espécies florestais na Amazônia brasileira não tem sido necessariamente voltado para a restauração da vegetação original e de seus benefícios ecossistêmicos, tendo por objetivo principal a obtenção de energia (madeira) (Souza et al., 2008).

Craven et al. (2011), ao avaliarem a taxa de crescimento e mortalidade de oito espécies florestais nativas no Panamá, em locais de fertilidades distintas e por diferentes períodos (estação seca e chuvosa), concluíram que, por mais que a precipitação e a fertilidade do solo tenham sido fatores importantes, o fator que mais influenciou o desenvolvimento e a mortalidade das plantas foi a própria espécie utilizada. Em solos pouco férteis, recomenda-se o uso de espécies que apresentam alto desempenho para a translocação de nutrientes (Machado et al., 2017) e que contribuam para o enriquecimento nutricional do solo a partir da produção de grande quantidade de MO, a fim de reabastecer a liteira e estimular a ciclagem de nutrientes (Celentano et al., 2020).

Os SAFs, mesmo sendo considerados prioritariamente como um sistema produtivo, apresentam grande potencial para promover a restauração florestal de áreas degradadas (Seoane et al., 2014). As raízes das espécies florestais dos SAFs, por explorarem áreas mais profundas dos solos do que as culturas anuais, podem extrair nutrientes dessas camadas e disponibilizá-los via senescência de folhas e galhos (Poggiani & Schumacher, 2000). A decomposição desse material vegetal pelos microrganismos do solo disponibiliza nutrientes que de outra forma não estariam disponíveis na camada superficial do solo. A *Acacia mangium*, por exemplo, favorece a disponibilização de P e S (Machado et al., 2017); a *Cecropia sp.* é eficiente em extrair Ca e Mg do solo (Tapia-Coral et al., 2005), enquanto a *Gliricidia sepium* pode ser uma fonte extra de N, obtido por fixação biológica (Kaba et al., 2021).

A utilização de espécies com sistemas radiculares de alcances diferentes ajuda a evitar a competição pelo uso de água e nutrientes, e melhorar sua eficiência. Neste sentido, a plasticidade das plantas também é um fator importante a ser considerado, ou seja, a capacidade da espécie de tolerar as variações de disponibilidade de água e radiação solar (Contin et al., 2014). A escolha das espécies deve, portanto, ser realizada de acordo com

suas características funcionais, e não de maneira aleatória. Salomão et al. (2014) avaliaram a dinâmica de crescimento de 89 espécies em áreas de restauração após mineração em Porto Trombetas, PA, classificando-as em classes de aptidão ecológica após treze anos de estudos. Três espécies foram consideradas de ótima aptidão: *Tapirira guianensis*, *Bowdichia nítida* e *Sclerolobium paniculatum*.

A espécie *Oenocarpus bacaba*, por exemplo, apresentou desempenho bastante satisfatório em projetos de restauração florestal em áreas degradadas na Amazônia, tendo sido eleita a melhor espécie-chave entre as 25 estudadas por Salomão et al. (2013) para este fim, apontada como de alta prioridade para garantir o sucesso de projetos de reflorestamento na região. Jardim et al. (2007), estudando o efeito de diferentes tamanhos de clareiras sobre o crescimento e a mortalidade de espécies arbóreas em Moju, PA, recomendaram o uso de *Jacaranda copaia* e *Newtonia suaveolens*. Souza et al. (2008), avaliando o desempenho de espécies florestais amazônicas para uso múltiplo no município de Manaus, destacaram o desempenho satisfatório de *Sclerolobium paniculatum*, *Hymenaea courbaril*, *Bertholletia excelsa*, *Swietenia macrophylla*, *Copaifera multijuga* e *Cedrela odorata*. Leão et al. (2005) avaliaram o crescimento de 29 espécies durante um período de 15 anos em Tucuruí, PA, tendo reportado os maiores incrementos em altura para a espécie *Acromia aculeata*. Costa-Azevedo (2014), estudando a dinâmica de crescimento de *C. guianensis* em Manaus, ressaltou o grande potencial de uso em reflorestamento desta espécie devido ao seu bom desempenho fotossintético e crescimento, tanto sob estresse hídrico moderado como em condições de plena luz solar. Rossi et al. (2003) testaram quinze espécies florestais, entre nativas e exóticas, em áreas de reflorestamento (monocultura) em Manaus, tendo destacado o melhor desenvolvimento de *Acacia mangium*, *Eucalyptus sp.* e *Schizolobium amazonicum*.

Em que pesem os estudos citados acima, pesquisas com espécies nativas ainda são necessárias a fim de facilitar a sua adoção em SAFs, sendo atualmente restrito o número de espécies utilizadas nesses sistemas na Amazônia (Costa & Morais, 2013; Herault et al., 2010; Jardim et al., 2007; Luizão et al., 2009; Silva et al., 2008). Compreender a dinâmica de sucessão em um ambiente de floresta e, portanto, o comportamento de cada espécie em condições naturais, permite utilizar a resiliência das florestas como estratégia de manejo para reduzir os impactos ambientais da atividade agrícola (Santos & Jardim, 2012; Schwarza et al., 2021). O conhecimento sistematizado e científico de espécies potenciais poderá, desta forma, servir de base para a promoção de desenvolvimento florestal sustentável e ocupação mais racional da Amazônia, revertendo o processo de degradação do bioma (Souza et al., 2008).

2.4 Considerações Finais

Os sistemas agroflorestais (SAFs) estão sendo utilizados na Amazônia para a recuperação de áreas degradadas pelo uso do fogo, e que perderam a fertilidade após a remoção da cobertura florestal. Esses sistemas alternativos são eficientes em manter ou repor a matéria orgânica dos solos, favorecendo desta forma a produção agroflorestal e a recuperação dos solos da região. A matéria orgânica produzida pelos SAFs pode ajudar a melhorar os atributos físicos, químicos e biológicos dos solos, contribuindo também para o sequestro de carbono da atmosfera. O sucesso de um projeto de recuperação, entretanto, depende da escolha das espécies a serem utilizadas, sendo recomendado o uso de plantas de diferentes grupos ecológicos, que sejam adaptadas às condições locais de clima e solo, e que, preferencialmente, produzam biomassa em abundância para manter a ciclagem de nutrientes no solo. Uma melhor compreensão do comportamento das espécies, especialmente as nativas da Amazônia, pode contribuir para uma maior eficiência no processo de restauração da qualidade de

solos degradados neste bioma, aliando produção agroflorestal com sustentabilidade ambiental. Neste sentido, é importante que trabalhos futuros avaliem o desempenho das diversas espécies nativas da Amazônia, assim como exóticas, no intuito de avaliar o seu potencial de uso para a recuperação de áreas degradadas, produção de biomassa, sequestro de carbono e outros aspectos do comportamento silvicultural dessas espécies nas condições estudadas.

Referências

- Almeida, A. S., Vieira, I. C. G., & Rocha, D. P. N. (2013). *Cenários para a Amazônia, clima, biodiversidade e uso da terra. Caracterização e mapeamento dos padrões de uso da terra na área de endemismo*. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi.
- Almeida, C. A. (2008). *Estimativa da Área de Ocorrência e do Tempo de Permanência da Vegetação Secundária da Amazônia Legal com Imagens TM/Landsat* [Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais].
- Arévalo-Gardini, E., Canto, M., Alegre, J., Loli, O., Julca, A., & Baligar, V. (2015). Changes in Soil Physical and Chemical Properties in Long Term Improved Natural and Traditional Agroforestry Management Systems of Cacao Genotypes in Peruvian Amazon. *PLoS ONE*, 10(7), e0132147. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0132147>
- Asase, A. & Tetteh, D. A. (2016). Tree diversity, carbon stocks, and soil nutrients in cocoa-dominated and mixed food crops agroforestry systems compared to natural forest in southeast Ghana. *Agroecol Sustain Food*, 40, 96–113.
- Atangana, A., Khasa, D., Chang, S., & Degrande, A. (2014). Carbon Sequestration in Agroforestry Systems. In A. Atangana, D. Khasa, S. Chang, & A. Degrande, *Tropical Agroforestry* (pp. 236-244). Springer Science+Business Media Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-007-7723-1_10
- Berenguer, E., Ferreira, J., Gardner, T. A., Aragão, L. E. O. C., Camargo, P. B. de, Cerri, C. E.; Durigan, M., Oliveira Junior, R. C. de, Vieira, I. C. G., & Barlow, J. (2014). A large-scale field assessment of carbon stocks in human-modified tropical forests. *Global Change Biology*, 20(12), 3713–3726.
- Bernardes, M. S., Pinto, L. F. G., & Righi, C. A. (2009). Interações biofísicas em sistemas agroflorestais. In R. Porro (Ed.), *A Alternativa agroflorestal na Amazônia em transformação* (pp. 423-446). Embrapa.
- Blinn, C. E., Browder, J. O., Pedlowski, M. A., & Wynne, R. H. (2013). Rebuilding the Brazilian rainforest: Agroforestry strategies for secondary forest succession. *Applied Geography*, 43, 171-181. <http://doi.org/10.1016/j.apgeog.2013.06.013>
- Bonilla-Bedoya, S., López-Ulloa, M., Vanwallegem, T., & Herrera-Machuca, M. A. (2017). Effects of Land Use Change on Soil Quality Indicators in Forest Landscapes of the Western Amazon. *Soil Science*, 182(4), 128-136. <http://doi.org/10.1097/SS.0000000000000203>
- Braga, D. P. P., Domene, F., & Gandara, F. B. (2019). Shade trees composition and diversity in cacao agroforestry systems of southern Para, Brazilian Amazon. *Agroforestry Systems*, 93,1409–1421. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0250-6>
- Brienza-Júnior, S., Manesch, R. Q., Mourão Júnior, M., Gazel Filho, A. B., Yared, J. A. G., Gonçalves, D., & Gama, M. B. (2009). Sistemas Agroflorestais na Amazônia Brasileira: Análise de 25 Anos de Pesquisas. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 60, 67-76.
- Bringezu, S., Schütz, H., Pengue, W., Brien, M. O., Garcia, F., Sims, R., & Weiss, J. (2014). *Assessing global land use: Balancing consumption with sustainable supply*. The International Resource Panel.
- Butzke, A. G., Oliveira, T. K., Paula, A. E. B., & Fiuza, S. S. (2020). Fertilidade e carbono orgânico do solo em sistemas agroflorestais de duas décadas compostos de castanheira, cupuaçuzeiro e pupunheira na Amazônia Ocidental. *Científica*, 48(2), 160–169. <http://doi.org/10.15361/1984-5529.2020v48n2p160-169>
- Caldeira, M. V. W., Godinho, T. D. O., Moreira, F. L., Campanharo, Í. F., Castro, K. C., Mendonça, A. R., & Trazzi, P. A. (2019). Litter as an ecological indicator of forest restoration processes in a dense ombrophylous lowland forest. *Floresta e Ambiente*, 26, 1–11. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.041118>
- Campos, F. E. M. & Sartorelli, P. A. R. (2015). *Guia De Identificação De Espécies-Chave Para Restauração Florestal na região de Alto Telles, Mato Grosso*. The Nature Conservancy.
- Cardinael, R., Chevallier, T., Barthès, B. G., Saby, N. P. A., Parent, T., Dupraz, C., Bernoux, M., & Chenu, C. (2015). Impact of alley cropping agroforestry on stocks, forms and spatial distribution of soil organic carbon - A case study in a Mediterranean context. *Geoderma*, 259-260, 288-299. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.015>
- Cardozo, E. G., Celentano, D., Rousseau, G. X., Silva, H. R. E., Muchavisoy, H. M., & Gehring, C. (2022). Agroforestry systems recover tree carbon stock faster than natural succession in Eastern Amazon, Brazil. *Agroforestry Systems*, 96, 941–956.
- Carvalho, J. L. N., Raucci, G. S., Cerri, C. E. P., Bernoux, M., Feigl, B. J., Wruck, F. J., & Cerri, C. C. (2010). Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. *Soil Tillage Research*, 110, 175-186.
- Celentano, D., Rousseau, G. X., Paixão, L. S., Lourenço, F., Cardozo, E. G., Rodrigues, T. O., Silva, H. R., Medina, J., Sousa, T. M., Rocha, A. E., & Reis, F. de O. (2020). Carbon sequestration and nutrient cycling in agroforestry systems on degraded soils of Eastern Amazon, Brazil. *Agroforestry Systems*, 94, 1781-1792. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00496-4>

- Chaves, S. F. da S., Gama, M. A. P., Alves, R. M., Oliveira, R. P., Neto, J. L. P., & Lima, V. M. N. (2020). Evaluation of physicochemical attributes of a yellow latosol under agroforestry system as compared to secondary forest in the Eastern Amazon. *Agroforestry Systems*, 94, 1903–1912. <https://doi.org/10.1007/s10457-020-00513-6>
- Chazdon, R. L. (2008). Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands. *Science*, 320, 1458–1460.
- Coe, R., Sinclair, F., & Barrios, E. (2014). Scaling up agroforestry requires research ‘in’ rather than ‘for’ development. *Curr Opin Environ Sustain*, 6, 73–77. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.013>
- Coelho, G. C. (2017). Ecosystem services in brazilian’s southern agroforestry systems. *Tropical and Subtropical Agroecosystems*, 20, 475–492.
- Contin, D. R., Soriani, H. H., Hernández, I., Furriel, R. P., Munné-Bosch, S., & Martínez, C. A. (2014). Antioxidant and photoprotective defenses in response to gradual water stress under low and high irradiance in two Malvaceae tree species used for tropical forest restoration. *Trees*, 28(6), 1705–1722.
- Corrêa, E. J., Vasconcelos, M., & Souza, M. S. de L. (2013) *Iniciação à metodologia: textos científicos*. NESCON-UFMG.
- Costa, A. C. L., Galbraith, D., Almeida, S., Portela, B. T. T., Costa, M. C., Silva Junior, J. A., Braga, A. P., Gonçalves, P. H. L., Oliveira, A. A. R., Fisher, R., Phillips, O. L., Metcalfe, D. B., Levy, P., & Meir, P. (2010). Effect of 7 yr of experimental drought on vegetation dynamics and biomass storage of an eastern Amazonian rainforest. *New Phytologist*, 187, 579–591.
- Costa, J. R., & Morais, R. R. (2013). *Carapa guianensis Aubl. (andirobeira) em Sistemas Agroflorestais*. Embrapa Documentos.
- Costa-Azevedo, G. F. (2014). Photosynthetic parameters and growth in seedlings of *Bertholletia excelsa* and *Carapa guianensis* in response to pre-acclimation to full sunlight and mild water stress. *Acta Amazonica*, 44(1), 67–78.
- Craven, D., Dent, D., Braden, D., Ashton, M. S., Berlyn, G. P., & Hall, J. S. (2011). Seasonal variability of photosynthetic characteristics influences growth of eight tropical tree species at two sites with contrasting precipitation in Panama. *Forest Ecology and Management*, 261, 1643–1653. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.09.017>
- Cravo, M. S., Corteletti, J., Nogueira, O. L., Smyth, T. J., & Souza, B. D. L. (2005). *Sistema Bragantino: Agricultura Sustentável para a Amazônia*. Embrapa Amazônia Oriental.
- Cravo, M. S., Viégas, I. J. M., & Brasil, E. C. (Eds.) (2020). *Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará* (2nd ed.) Embrapa.
- Doran, J. W., & Parkin, T. B. (1996). Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: J. W. Doran & A. J. Jones (Eds.), *Methods for Assessing Soil Quality*. Soil Science Society of America.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015a). *Status of the World’s Soil Resources (SWSR) – Main Report*. FAO and Intergovernmental Technical Panel on Soils.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (2015b). *Recursos Forestales Mundiales - Main Report*. FAO.
- Fonte, S. J., Barrios, E., & Six, J. (2010). Earthworms, soil fertility and aggregate-associated soil organic matter dynamics in the Quesungual agroforestry system. *Geoderma*, 155, 320–328.
- Fox, J. M., Castella, J. C., Ziegler, A. D., & Westley, S. B. (2014). Rubber plantations expand in mountainous Southeast Asia: what are the consequences for the environment? *Asia Pacific Issues*, 114, 1–8.
- Frare, J. C. V., Oliveira, I. A., & Freitas, L. (2017). Potencial agroecológico da agricultura familiar de comunidades ribeirinhas agroextrativistas do Marajó, Amazônia oriental. *Unimar Ciências*, 26(1-2), 41-53.
- Gibbs, H., Ruesch, A. S., Achard, F., Clayton, M. K., Holmgren, P., Ramankutty, N., & Foley, J. A. (2010). Tropical forests were the primary sources of new agricultural land in the 1980s and 1990s. *Proc. Natl.Acad. Science*, 107(38), 16732–16737.
- Gris, D., Temponi, L. G., & Marcon, T. R. (2012). Native species indicated for degraded area recovery in Western Paraná, Brazil. *Revista Árvore*, 365(1), 113-125.
- Herault, B., Ouallet, J., Blanc, L., Wagner, F., & Baraloto, C. (2010). Growth responses of neotropical trees to logging gaps. *Journal of Applied Ecology*, 47, 821–831.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2019). *Sistema IBGE de Recuperação Automática*. IBGE. <https://sidra.ibge.gov.br/acervo>
- Instituto de Desenvolvimento Florestal e da Biodiversidade do Estado do Pará (2021). *Cartilha de sistemas agroflorestais comerciais: estratégia produtiva sustentável para a agricultura familiar*. IDEFLOR-Bio.
- Instituto Nacional de Pesquisa Espacial (2022). *PRODES – Programa de Monitoramento do Desmatamento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite*. INPE. <http://www.dpi.inpe.br/prodesdigital/prodesmunicipal.php>
- Jardim, F. C. S., Serrão, D. R., & Nemer, T. C. (2007). Efeito de diferentes tamanhos de clareiras sobre o crescimento e a mortalidade de espécies arbóreas em Moju - PA. *Acta Amazonica*, 37, 37–38.

- Kaba, J. S., Yamoah, F. A., & Acquaye, A. (2021). Towards sustainable agroforestry management: Harnessing the nutritional soil value through cocoa mix waste. *Waste Management*, 124, 264–272. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.021>
- Kamau, S., Barrios, E., Karanja, N., Ayuke, F., & Lehmann, J. (2017). Soil macrofauna under dominant tree species increases along a soil degradation gradient. *Soil Biol. Biochem.*, 112, 35–46.
- Kremen, C. & Miles, A. (2012). Ecosystem services in biologically diversified versus conventional farming systems: benefits, externalities, and trade-offs. *Ecology and Society*, 17(4), 40–65.
- Labrière, N., Locatelli, B., Laumonier, Y., Freycon, V., & Bernoux, M. (2015). Soil erosion in the humid tropics: a systematic quantitative review. *Agric. Ecosyst. Environ.*, 203, 127–139.
- Lagneaux, E., Andreotti, F., & Neher, C. M. (2021). Cacao, copoazu and macambo: Exploring Theobroma diversity in smallholder agroforestry systems of the Peruvian Amazon. *Agroforestry Systems*, 95, 1359–1368. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00610-0>
- Lal, R. (1997). Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO-enrichment. *Soil & Tillage Research*, 43, 81–107.
- Lamb, D. & Gilmour, D. (2003). *Issues in forest conservation. Rehabilitation and restoration of degraded forests*. International Union for Conservation of Nature and Natural Resources, The World Wide Fund for Nature.
- Lammel, D. R., Nüsslein, K., Tsai, S. M., & Cerri, C. C. (2015). Land use, soil and litter chemistry drive bacterial community structures in samples of the rainforest and Cerrado (Brazilian Savannah) biomes in southern Amazonia. *European Journal of Soil Biology*, 66, 32–39.
- Leão, N. V. M., Ohashi, S. T., Vieira, I. C. G., & Ghilardi Júnior, R. (2005). *Ilha de germoplama de Tucuruí: uma reserva da biodiversidade para o futuro*. Eletronorte.
- Lima, S. S., Leite, L. F. C., Oliveira, F. C., & Costa, D. B. (2011). Atributos químicos e estoque de carbono e nitrogênio em Argissolo Vermelho-Amarelo sob sistemas agroflorestais e agricultura de corte e queima no norte do Piauí. *Revista Árvore*, 35(1), 51–60.
- Longo, R. M. & Espíndola, C. R. (2000). Alterações em características químicas de solo da região amazônica pela introdução de pastagens. *Acta Amazonica*, 30(1), 71–80.
- Lopes, A. S. & Guimarães Guilherme, L. R. (2016). A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil. *Advances in Agronomy*, 137, 1–73.
- Luizão, F. J., Fearnside, P. M., Cerri, C. E. P., & Lehmann, J. (2009). The maintenance of soil fertility in Amazonian managed systems. In M. Keller, M. Bustamante, J. Gash, & P. Silva Dias (Eds.), *Amazonia and Global Change - Geophysical Monograph Series*. American Geophysical Union (AGU), 186, 311–336.
- Machado, M. R., Camara, R., Sampaio, P. T. B., Pereira, M. G., & Ferraz, J. B. S. (2017). Land cover changes affect soil chemical attributes in the Brazilian Amazon. *Acta Scientiarum Agronomy*, 39(3), 385–391.
- Maia, R. S., Vasconcelos, S. S., & Carvalho, J. R. de (2015). Frações de fósforo e simbiose micorrízica em floresta secundária em resposta a disponibilidade de água e nutrientes na Amazônia oriental. *Acta Amazonica*, 45(3), 255–264. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201402894>
- Malhi, Y., Aragao, L. E. O. C., Metcalfe, D. B., Paiva, R., Quesada, C. A., Almeida, S., Anderson, L., Brando, P., Chambers, J. Q., Costa, A. C. L., Hutrya, L. R., Oliveira, P., Patino, S., Pyle, E. H., Robertson, A. L., & Teixeira, L. M. (2009). Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. *Global Change Biology*, 15, 1255–1274. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01780.x>
- Mantovanelli, B. C., Campos, M. C. C., Alho, L. C., Francisco, N. U., Nascimento, M. F., & Santos, L. A. C. (2016). Distribuição espacial dos componentes da acidez do solo em área de campo natural na região de Humaitá, Amazonas. *Ciência Agroambiental*, 14, 01–09.
- Martins, E. M., Da Silva, E. R., Campello, E. F. C., De Lima, S. S., Nobre, C. P., Correia, M. E. F., & De Resende, A. S. (2019). O uso de sistemas agroflorestais diversificados na restauração florestal na Mata Atlântica. *Ciência Florestal*, 29(2), 632–648. <https://doi.org/10.5902/1980509829050>
- Mcgrath, D. A., Smith, C. K., Gholz, H. L. de A., & Oliveira, F. (2001). Effects of Land-Use Change on Soil Nutrient Dynamics in Amazônia. *Ecosystems*, 4, 625–45.
- Meli, P. & Dirzo, R. (2013). Effects of grasses on sapling establishment and the role of transplanted saplings on the light environment of pastures: implications for tropical forest restoration. *Applied Vegetation Science*, 16(2), 296–304.
- Melo, V. F., Schaefer, C. E. G. R., Fontes, L. E. F., Chagas, A. C., Lemos Júnior, J. B., & Andrade, R. (2006). Physical chemical and mineralogical characteristics of soils from the agricultural colony of Apiaú (Roraima, Amazonia), under different land uses and after burning. *R. Bras. Ci. Solo*, 30, 1039–1050. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832006000600013>
- Miccolis, A., Peneireiro, F. M., Marques, H. R., Vieira, D. L. M., Arco-Verde, M. F., Hoffmann, M. R., Rehder, T., & Pereira, A. V. B. (2016). *Restauração Ecológica com Sistemas Agroflorestais: como conciliar conservação com produção. Opções para Cerrado e Caatinga*. ISPN/ICRAF.
- Mitchard, E. T. A., Feldpausch, T. R., Brienen, R. J. W., Lopez-Gonzalez, G., Monteagudo, A., Baker, T. R., Lewis, S. L., Lloyd, J., Quesada, C. A., Gloor, M., Steege, H. ter, Meir, P., Alvarez, E., Araujo-Murakami, A., Aragão, L. E. O. C., Arroyo, L., Aymard, G., Banki, O., Bonal, D., ... Phillips, O. L. (2014). Markedly divergent estimates of Amazon forest carbon density from ground plots and satellites. *Glob. Ecol. Biogeogr.*, 23, 935–946. <https://doi.org/10.1111/geb.12168>

- Monroe, P. H. M., Gama-Rodrigues, E. F., Gama-Rodrigues, A. C., & Marques, J. R. B. (2016). Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. *Agriculture, Eco-systems and Environment*, 221, 99–108. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.01.022>
- Moreira, A & Malavolta, E. (2004). Dinâmica da matéria orgânica e da biomassa microbiana em solo submetido a diferentes sistemas de manejo na Amazônia Ocidental. *Pesq. agropec. Bras.*, 39(11), 1103-1110.
- Moreira, F. M. S., Nóbrega, R. S. A., Jesus, E. C., Ferreira, D. F., & Pérez, D. V. (2009). Differentiation in the fertility of Inceptisols as related to land use in the upper Solimões river region, western Amazon. *Science of the Total Environment*, 408, 349–355.
- Muchane, M. N., W. Sileshi, G. W., Gripenberg, S., Jonsson, M., Pumariño, L., & Barrios, E. (2020). Agroforestry boosts soil health in the humid and sub-humid tropics: A metaanalysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 295, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106899>
- Nair, P. K. R., Kumar, B. M., & Nair, V. D. (2009). Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *J. Plant. Nutr. Soil. Sci.*, 172(1), 10–23. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800030>
- Niether, W., Armengot, L., Andres, C., Schneider, M., & Gerold, G. (2018). Shade trees and tree pruning alter throughfall and microclimate in cocoa (*Theobroma cacao* L.) production systems. *Annals of Forest Science*, 75, 38. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0723-9>
- Numata, I., Chadwick, O. A., Roberts, D. A., Schimel, J. P., Sampaio, F. F., Leonidas, F. C., & Soares, J. V. (2007). Temporal nutrient variation in soil and vegetation of post-forest pastures as a function of soil order, pasture age, and management, Rondônia, Brazil. *Agric Ecosyst Environ*, 118, 159–172. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.019>
- Oliveira, N. A., Silva, K. R., Silva, L. J. A., & Melo, A. H. (2017). Atributos químicos de solo sob diferentes sistemas de uso e manejo no projeto de assentamento Veneza - São Domingos do Araguaia, PA. *Revista Agroecossistemas*, 9(1), 170-179.
- Packham, C. (2015). *Wildlife of the world*. Dorling Kindersley Limited.
- Park, A., Van Breugel, M., Ashton, M. S., Wishnie, M., Mariscal, E., Deago, J., Ibarra, D., Cedeno, N., & Hall, J. S. (2010). Local and regional environmental variation influences the growth of tropical trees in selection trials in the Republic of Panama. *Forest Ecology and Management*, 260, 12–21.
- Pereira, G. H. A., Pereira, M. G., Anjos, L. H. C. dos, Amorim, T. de A., & Menezes, C. E. G. (2013). Decomposição da serapilheira, diversidade e funcionalidade de invertebrados do solo em um fragmento de Floresta Atlântica. *Biosci. Journal*, 29(5), 1317-1327.
- Perrin, A. S., Fujisaki, K., Petitjean, C., Sarrazin, M., Godeta, M., Garrica, B., Hortha, J. C., Balbino, L. C., Silveira Filho, A., Machado, P. L. O. A., & Brossard, M. (2014). Conversion of forest to agriculture in Amazonia with the chop-and-mulch method, Does it improve the soil carbon stock? *Ecosystems and Environment*, 184, 101–114. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.11.009>
- Primavesi, A. (2006). *Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais* (18th ed.). Nobel.
- Primavesi, A. (2016). *Manual do solo vivo* (2nd ed.) Expressão Popular.
- Poggiani, F. & Schumacher, M. V. (2000). Ciclagem de nutrientes em floresta nativa. In J. L. M. Golsalves & V. Benedetti. *Nutrição e fertilização florestal*. IPEF.
- Quesada, C. A., Lloyd, J., Anderson, L. O., Fyllas, N. M., Schwarz, M., & Czimeczik, C. I. (2011). Soils of Amazonia with particular reference to the RAINFOR sites. *Biogeosciences*, 8, 1415–1440. <https://doi.org/10.5194/bg-8-1415-2011>
- Quesada, C. A., Lloyd, J., Schwarz, M., Patiño, S., Baker, T. R., Czimeczik, C., Fyllas, N. M., Martinelli, L., Nardoto, G. B., Schmerler, J., Santos, A. J. B., Hodnett, M. G., Herrera, R., Luizão, F. J., Arneith, A., Lloyd, G., Dezzeo, N., Hilke, I., Kuhlmann, I., ... Paiva, R. (2010). Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. *Biogeoscience*, 7, 1515–1541. <https://doi.org/10.5194/bg-7-1515-2010>
- Reed, S., Townsend, A., Taylor, P., & Cleveland, C. (2011). Phosphorus cycling in tropical forests growing on highly weathered soils. *Soil Biol.*, 26, 295–316.
- Ribeiro, P. G., Martins, G. C., Gastauer, M., Junior, E. C. da S., Santos, D. C., Júnior, C. F. C., Cavalcante, R. B. L., Santos, D. S., Carneiro, M. A. C., Valadares, R. B. da S., Junior, W. da R. N., Oliveira, G. Filho, P. W. M. S., & Ramos, S. J. (2022). Spectral and Soil Quality Index for Monitoring Environmental Rehabilitation and Soil Carbon Stock in an Amazonian Sandstone Mine. *Sustainability*, 14, 597. <https://doi.org/10.3390/su14020597>
- Ronquim, C. C. (2020). *Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais* (2nd ed.) Embrapa Territorial.
- Rossi, L. M. B., Azevedo, C. P., Souza, C. R., & Lima, R. M. B. (2003, setembro 21-28). *Potential forest species for plantations in Brazilian Amazonia* [apresentação de trabalho]. XII World Forestry Congress, Quebec, Canada. <https://www.fao.org/3/xii/0537-b1.htm>
- Sá, T. D. A., Kato, O. R., Carvalho, C. J. R., & Figueiredo, R. O. (2007). Queimar ou não queimar? De como produzir na Amazônia sem queimar, *Revista USP*, 72, 90-97.
- Salomão, R. P., Brienza-Júnior, S., & Rosa, N. A. (2014). Dinâmica de reflorestamento em áreas de restauração após mineração em unidade de conservação na Amazônia. *Revista Árvore*, 38(1), 1-24.

- Salomão, R. P., Santana, A. C., & Brienza-Júnior, S. (2013). Seleção de espécies da floresta ombrófila densa e indicação da densidade de plantio na restauração florestal de áreas degradadas na Amazônia. *Ciência Florestal*, 23(1), 139-151.
- Santos, C. A. N., & Jardim, F. C. da S. (2012). Dinâmica da regeneração natural de *Vouacapoua americana* com diâmetro <5 cm, influenciada por clareiras, em Moju, Pará. *Floresta*, 42(3), 495-508.
- Sathish, B. N., Bhavya, C. K., Kushalappa, C. G., Nanaya, K. M., Dhanush, C., Devagiri, G. M., & Gajendra, C. V. (2022). Dynamics of native tree structure and diversity in coffee agroforest: a case study from Central Western Ghats. *Agroforestry Systems*, 96, 161–172. <https://doi.org/10.1007/s10457-021-00713-8>
- Schwarza, J., Schnabel, F., & Bauhus, J. (2021). A conceptual framework and experimental design for analyzing the relationship between biodiversity and ecosystem functioning (BEF) in agroforestry systems. *Basic and Applied Ecology*, 55, 133-151.
- Seoane, C. E., Froufe, L. C., Amaral-Silva, J., Arantes, A. C. V., Nogueira, R., & Steenbock, W. (2014, novembro 19-21). *Conservação Ambiental Forte Alcançada Através de Sistemas Agroflorestais Multiestratificados - Agroflorestas e a Restauração Ecológica de Florestas* [apresentação de trabalho]. I Seminário de Agroecologia da América do Sul, Dourados, MS, Brasil.
- Severino, A. J. (2016). *Metodologia do trabalho científico* (24th ed.). Cortez.
- Shearman, P., Bryan, J., & Laurance, W. F. (2012). Are we approaching “peak timber” in the tropics? *Biological Conservation*, 151, 17–21.
- Signor, D., Deon, M. D., Camargo, P. B., & Cerri, C. E. P. (2018). Quantity and quality of soil organic matter as a sustainability index under different land uses in Eastern Amazon. *Sci. Agric*, 75(3), 225-232. <http://doi.org/10.1590/1678-992X-2016-0089>
- Silva, K. D. A., Martins, S. V., Miranda Neto, A., Demolinari, R. D. A., & Lopes, A. T. (2016). Forest restoration after Bauxite mining: assessment of planted tree species. *Floresta e Ambiente*, 23(3), 309–319.
- Silva, P. de T. E., Brienza-Júnior, S., Yared, J. A. G., Barros, P. L. C., & Maciel, M. de N. M. (2008). Principais espécies florestais utilizadas em sistemas agroflorestais na Amazônia. *Rev. Cienc. Agrar.*, 49, 127-144.
- Silva, S. C. (2012). *Sistemas agroflorestais na Amazônia: fitossociologia, socioeconomia, análise de risco, comercialização e tendência de preços dos produtos* [Tese de Doutorado em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras].
- Silva, W. B., Périco, E., Dalzochio, M. S., Santos, M., & Cajaiba, R. L. (2018). Are litterfall and litter decomposition processes indicators of forest regeneration in the neotropics? Insights from a case study in the Brazilian Amazon. *Forest Ecology and Management*, 429, 189-197.
- Silva-Júnior, M. L. (2007). *Dinâmica do carbono e do fósforo em um Latossolo amarelo, textura argilosa, após conversão da floresta em capoeira e pastagens, na Amazônia oriental* [Tese de Doutorado em Ciências Agrárias, Universidade Federal Rural da Amazônia e Embrapa Amazônia Oriental].
- Silva-Júnior, M. L., Desjardins, T., Sarrazin, M., Melo, V. S., Martins, P. F., Santos, E. R., & Carvalho, C. J. R. (2009). Carbon content in Amazonian Oxisols after Forest conversion to pasture. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 9, 1603–1611. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832009000600009>
- Silva-Olaya, A. M., Cerri, C. E. P., La Scala Jr., N., Dias, C. T. S., & Cerri, C. C. (2013). Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. *Environmental Research Letters*, 8(1), 1-8. <http://doi.org/10.1088/1748-9326/8/1/015014>
- Somarrriba, E., Cerda, R., Orozco, L., Cifuentes, M., Davila, H., Espin, T., Mavisoy, H., Avila, G., Alvarado, E., Poveda, V., Astorga, C., Say, E., & Degevels, O. (2013). Carbon stocks and cocoa yields in agroforestry systems of Central America. *Agric Ecosystems Environment*, 173, 46–57. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2013.04.013>
- Sousa, S. G. A. de, Wandelli, E. V., Lourenço, J. N. de P., & Campos, L. da S. (2009, junho 22-26). *Estabelecimento de andiroba (Carapa guianensis Aubl e Carapa procera Condolle) em sistemas agroflorestais em estágio avançado de desenvolvimento* [apresentação de trabalho]. VII Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais, Brasília, DF, Brasil.
- Souza, C. R., Lima, R. M. B., Azevedo, C. P., & Rossi, L. M. B. (2008). Desempenho de espécies florestais para uso múltiplo na Amazônia. *Scientia Forestalis*, 36(77), 7-15.
- Souza, E. S., Fernandes, A. R., Braz, A. M. S., Oliveira, F. J., Alleoni, L. R. F., & Campos, M. C. C. (2018). Physical, chemical, and mineralogical attributes of a representative group of soils from the eastern Amazon region in Brazil. *Soil*, 4, 195–212.
- Souza-Filho, P. W. M., Souza, E. B., Silva-Júnior, R. O., Nascimento Jr., W. R., Mendonça, B. R. V., Guimarães, J. T. F., Dall'agnol, R., & Siqueira, J. O. (2016). Four decades of land-cover, land-use and hydroclimatology changes in the Itacaiúnas River watershed, southeastern Amazon. *Journal of Environmental Management*, 167, 175-184.
- Tapia-Coral, S. C., Luizão, F. J., Wandelli, E. V., & Fernandes, E. C. M. (2005). Carbon and nutrient stocks in the litter layer of agroforestry systems in Central Amazonia. *Agroforestry Systems*, 65, 33-42.
- Tremblay, S., Lucotte, M., Reveret, J. P., Davidson, R., Mertens, F., Passos, C. J. S., & Romana, C. A. (2015). Agroforestry systems as a profitable alternative to slash and burn practices in small-scale agriculture of the Brazilian Amazon. *Agroforestry Systems*, 89, 193-204.
- Tscharntke, T., Clough, Y., Bhagwat, S. A., Buchori, D., Faust, H., Hartel, D., Holscher, D., Juhmbandt, J., Kessler, M., Perfecto, I., Scherber, C., Schroth, G., Veldkamp, E., & Wanger, T. (2011). Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes - a review. *J Appl Ecol*, 48, 619–629.

- Veen, G. F., Wubs, E. R. J., Bardgett, R., Barrios, E., Bradford, M., Carvalho, S., De Deyn, G., De Vries, F., Giller, K., Kleijn, D., Landis, D., Rossing, W. A. H., Schrama, M., Six, J., Struik, P., Van Gils, S., Wiskerke, H., Van Der Putten, W. H., & Vet, L. E. M. (2019). Applying the aboveground-belowground interaction concept in agriculture: spatiotemporal scales matter. *Front. Ecol. Evol.* 7, 300. <https://doi.org/10.3389/fevo.2019.00300>
- Vieira, I. C. G., Veiga, J. B., Yared, J. A. G., Salomão, R. P., Ohashi, S. T., Brienza-Júnior, S., Silveira, C. T. E., & Biazatti, M. (2008). *Bases técnicas e referenciais para o programa de restauração florestal do Pará: um bilhão de árvores para a Amazônia*. Instituto de Desenvolvimento Econômico, Social e Ambiental do Pará.
- Wang, J., Chen, Y., Shao, X., Zhang, Y., & Cao, Y. (2012). Land use policy land use changes and policy dimension driving forces in China: Present, trend and future. *Land Use Policy*, 29(4), 737–749.
- Wang, J., Ren, C., Cheng, H., Zou, Y., Bughio, M. A., & Li, Q. (2017). Conversion of rainforest into agroforestry and monoculture plantation in China: Consequences for soil phosphorus forms and microbial community. *Science of the Total Environment*, 595, 769–778. <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.04.012>
- Weil, R. R., & Brady, N. C. (2017). *The Nature and Properties of Soil* (15th ed.). Pearson.
- West, P. C., Gibbs, H. K., Monfreda, C., Wagner, J., Barford, C. C., Carpenter, S. R., & Foley, J. A. (2010). Trading carbon for food: global comparison of carbon stocks vs. crop yields on agricultural land. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.*, 107(46), 19645–19648. <https://doi.org/10.1073/pnas.1011078107>
- Wilson, M. & Lovell, S. (2016). Agroforestry - the next step in sustainable and resilient agriculture. *Sustainability*, 8, 574. <https://doi.org/10.3390/su8060574>
- Wu, J., Liu, W., & Chen, C. (2017). How do plants share water sources in a rubber-tea agroforestry system during the pronounced dry season? *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 236, 69–77. <http://doi.org/10.1016/j.agee.2016.11.017>

3. IMPLANTAÇÃO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS SEM QUEIMA NA AMAZÔNIA: uma abordagem em duas etapas

Resumo

Os solos da Amazônia brasileira são geralmente ácidos e apresentam baixa fertilidade natural. Todavia, constituem a base da produção agrícola familiar da região. O preparo deste solo é tradicionalmente feito com uso de fogo, o que reduz a quantidade de matéria orgânica e contribui para a emissão de gás carbônico para atmosfera. O objetivo deste trabalho foi avaliar a dinâmica de crescimento de diversas espécies consorciadas em sistema agroflorestal como um modelo alternativo de uso do solo na região. O experimento foi instalado em áreas de clareiras sem queima e não adubadas na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará. Após três anos de acompanhamento, as espécies foram avaliadas e classificadas quanto a sua aptidão para plantio nas condições experimentais da área de estudo, sendo proposto um índice de recomendação com base na taxa de mortalidade das espécies, os índices de crescimento em altura e diâmetro, e potencial estimado de produção de biomassa. Os resultados indicam que espécies florestais como *Carapa guianensis*, *Vouacapoua americana*, *Colubrina glandulosa* e *Oenocarpus bacaba* apresentaram desenvolvimento satisfatório, sendo recomendadas em áreas de reflorestamento no estado. Por outro lado, as espécies frutíferas como *Carica papaya*, *Musa paradisaca* var. Pacoua e as do gênero *Theobroma* e *Psidium* obtiveram desempenho insatisfatório, devido, principalmente, às condições limitantes de fertilidade do solo, não sendo recomendadas para plantio da região sem antes se fazer a correção do mesmo. Estes resultados sugerem que a implantação de sistemas agroflorestais sem adubação na Amazônia deve ser realizada em duas etapas, introduzindo-se espécies florestais tolerantes às condições de baixa fertilidade dos solos antes de se introduzirem espécies frutíferas mais exigentes em termos nutricionais.

Palavras-chave: Conservação do solo; Agricultura de corte-e-queima; Qualidade do solo

Abstract

The soils of the Brazilian Amazon are generally acidic and have low natural fertility. However, they form the basis of small-scale agricultural production in the region. The preparation of this soil is traditionally done using fire, which reduces the amount of organic matter and contributes to the emission of carbon dioxide into the atmosphere. The objective of this work was to evaluate the growth dynamics of several species intercropped in an agroforestry system as an alternative model of land use in the region. The experiment was installed in areas of forest gaps without burning and without fertilizing in the National Forest of Caxiuanã, Pará. After three years of follow-up, the species were evaluated and classified according to their suitability for planting under the experimental conditions, and a recommendation index was proposed based on the mortality rate of the species, the growth rates, both in height and diameter, and estimated biomass production potential. The results indicate that forest species such as *Carapa guianensis*, *Vouacapoua americana*, *Colubrina glandulosa* and *Oenocarpus bacaba* showed satisfactory development, being recommended in reforestation areas in the state of Pará. On the other hand, fruit species such as *Carica papaya*, *Musa paradisaca* var. Pacoua and those of the genus *Theobroma* and *Psidium* obtained unsatisfactory performance, mainly due to the limiting conditions of the soil, not being recommended for planting in the region without first correcting its fertility. These results suggest that the implementation of agroforestry systems without fertilization in the Amazon should be carried out in two steps, introducing forest species tolerant to low soil fertility conditions before introducing fruit species that are more nutrient demanding.

Keywords: Soil conservation; Slash-and-burn agriculture; Soil quality.

3.1 INTRODUÇÃO

Sistemas agroflorestais (SAFs) são sistemas de uso da terra e técnicas de plantio e manejo envolvendo plantas lenhosas perenes e culturas agrícolas e/ou animais, ambas na forma de arranjos mistos ou sequências temporais, em que há interações ecológicas e econômicas entre seus diversos componentes (NAIR; KUMAR; NAIR, 2009). Os SAFs desempenham funções ecológicas importantes como o controle da erosão do solo, redução da lixiviação de nutrientes e aumento do sequestro de carbono (WILSON; LOVELL, 2016), sendo, por esta razão, considerados uma boa opção para recuperar serviços do ecossistema em áreas degradadas (SCHWARZA et al., 2021).

A agricultura de corte-e-queima é praticada com frequência entre os pequenos agricultores da Amazônia no intuito de aumentar a disponibilidade de nutrientes no solo e corrigir sua acidez (FRARE et al., 2017; TREMBLAY et al., 2015). Esta prática promove a fertilização pelas cinzas, aumentando os teores de nutrientes no solo (MACHADO et al., 2017), mas tem como principal efeito negativo a perda da matéria orgânica (SILVA-JÚNIOR, 2007). Os benefícios da queimada desaparecem rapidamente (NUMATA et al., 2007), e mesmo com a melhora após a queima, os solos continuam com baixos teores de nutrientes (MOREIRA; MALAVOLTA, 2004). Após curto período de tempo, estes solos ficam sujeitos à compactação, decrescem sua fertilidade e o acúmulo de carbono, e aumenta a sua susceptibilidade à erosão (SOUZA et al., 2018).

A utilização de SAFs, por outro lado, permite a manutenção e até mesmo o aumento da fertilidade do solo, graças a sua capacidade de promover a ciclagem de nutrientes, protegendo e alimentando a camada de liteira da superfície do solo (LUIZÃO et al., 2009). O componente arbóreo dos SAFs é responsável pelo aporte constante de matéria orgânica através de folhas e galhos, formando a serapilheira, que ao ser decomposta, promove a ciclagem de nutrientes no sistema (BERNARDES et al., 2009). A presença de árvores nos SAFs também contribui para a proteção dos mananciais, sendo uma prática importante para a conservação da água e dos solos (WARTENBERG et al., 2017). A maior porosidade dos solos dos SAFs ajuda na retenção de água (COELHO, 2017) e a diversidade de espécies,

densidade e estratificação afetam a interceptação da água da chuva, influenciando o microclima local (NIETHER et al., 2018).

A utilização de árvores combinadas com cultivos agrícolas ocorre há bastante tempo na Amazônia brasileira. Mesmo ocupando pequena parcela das terras cultivadas, os SAFs são uma importante opção de geração de renda para agricultores familiares na região (ROSA et al., 2009). As espécies escolhidas para comporem um SAF deverão ser preferencialmente de uso múltiplo, adaptadas às condições locais de solo e clima e pouco exigentes em adubação (SILVA et al., 2008). Neste contexto, é importante definir o espaçamento de cada espécie, pois a maior ou menor proximidade das culturas em um arranjo agroflorestal irá influenciar o grau de interação entre elas, o que pode repercutir na ciclagem de nutrientes no solo (RIGHI; BERNARDES, 2015). De acordo com Salomão, Brienza Júnior e Rosa (2014), a densidade inicial do plantio em áreas de restauração pode ajudar a proporcionar os benefícios ecológicos esperados pelo sistema, sendo importante realizar o plantio adensado de árvores, especialmente pioneiras, e priorizar as espécies adaptadas ao ambiente, que atinjam rapidamente a fase reprodutiva. Além do arranjo espacial, é de grande relevância a definição do arranjo temporal das espécies, que defina o cronograma de inserção de cada componente no sistema e o período de tempo que cada espécie deverá ali permanecer (IDEFLOR-Bio, 2021). Todavia, a seleção de espécies, a densidade de plantio e o manejo de SAFs são práticas negligenciadas pelos produtores, principalmente na região amazônica (NIETHER et al., 2018).

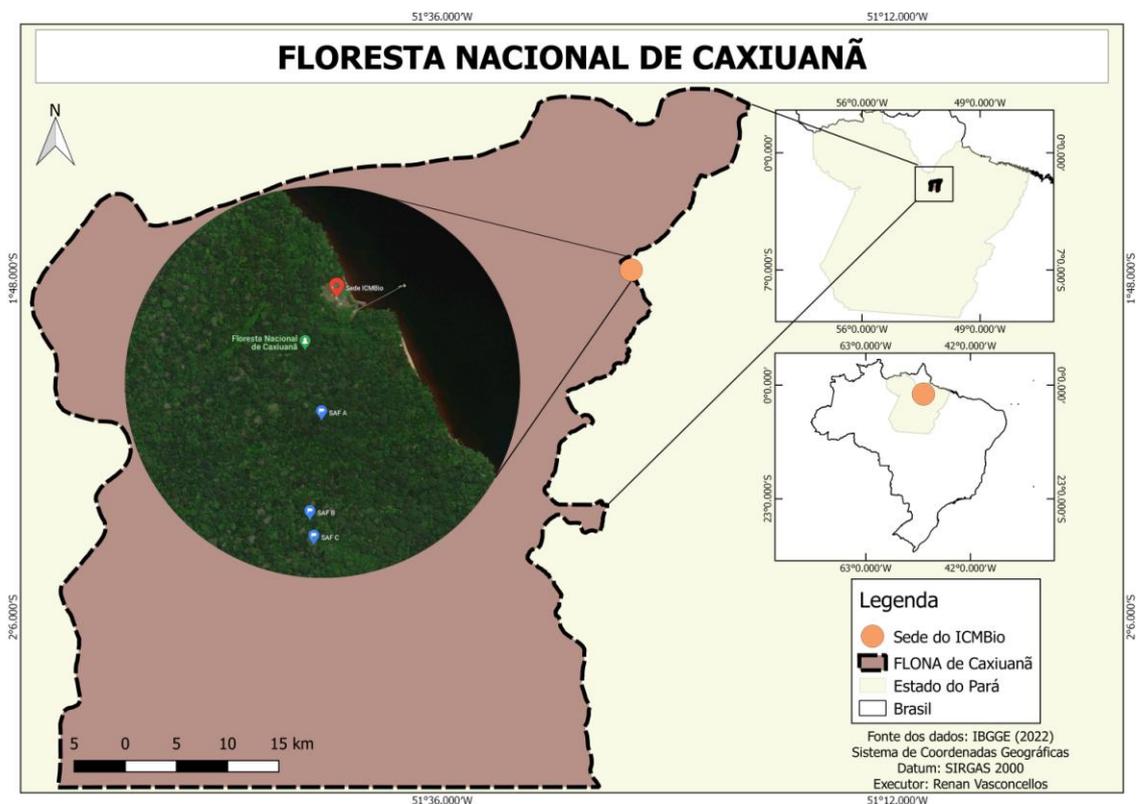
Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi avaliar o desempenho de diferentes espécies florestais e frutíferas cultivadas em sistemas agroflorestais em uma área recém-desmatada e sem queima na Floresta Nacional de Caxiuanã, Estado do Pará, e classificá-las de acordo com o seu desempenho através de um índice de recomendação de uso em áreas de reflorestamento na região.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1. Área experimental

O experimento - implantação, manutenção e acompanhamento de sistemas agroflorestais (SAFs) - foi desenvolvido em três áreas de clareira (A, B e C) em meio à floresta nativa localizada nas proximidades da sede do Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio), na Floresta Nacional (FLONA) de Caxiuana (figura 1).

Figura 1. Local do experimento: áreas de clareira e sede do ICMBio, localizados na Floresta Nacional de Caxiuana, Estado do Pará.



Fonte: o autor (2023)

A FLONA de Caxiuana é classificada como floresta tropical úmida de terra firme, cuja vegetação primária apresenta uma altura média do dossel de 35 metros (SILVA JUNIOR et al., 2013). A área é caracterizada por um relevo de planície relativamente uniforme, com temperatura média do ar anual de $25,7 \pm 0,8^\circ\text{C}$ (SILVA JUNIOR et al. 2013). A área experimental está situada a aproximadamente quinze metros acima do nível da baía de Caxiuana, nas coordenadas de $1^\circ 47' 32,6''\text{S}$, $51^\circ 26' 01,9''\text{N}$.

Segundo a classificação climática de Köppen, o clima da FLONA de Caxiuanã é do tipo tropical quente e úmido. A precipitação média anual varia de 2.000 a 2.500 mm (MEIR et al., 2018). Aproximadamente 70% das chuvas ocorrem durante o período chuvoso, compreendido entre dezembro e maio, enquanto os 30% restantes ocorrem no período mais seco do ano, entre junho e novembro (SILVA JUNIOR et al., 2013). A umidade relativa do ar média é de aproximadamente 80%, com ventos predominantes na direção NE (OLIVEIRA, 2007).

Os solos de Caxiuanã apresentam drenagem de moderada a boa e valores de pH entre 3,5 (muito ácido) a 5,5 (moderadamente ácido), sendo geralmente pobres em nutrientes (RUIVO et al., 2002). A maior parte do solo é constituída de Latossolo amarelo, com predominância da fração areia (SILVA JUNIOR et al., 2013).

3.2.2. Instalação do experimento

As áreas experimentais foram instaladas em clareiras abertas (A, B e C) como resultado de um experimento realizado na área dois meses antes da implantação dos SAFs (BURT et al., 2021). Este experimento derrubou quatro grandes árvores da floresta para medir a biomassa vegetal acima do solo, o teor de umidade e a densidade do tecido lenhoso das árvores, tendo sido necessária também a remoção completa da vegetação ao redor das árvores avaliadas, incluindo a limpeza de pequenos arbustos e plantas jovens.

A tabela 1 apresenta cada área experimental (SAF) de acordo com a distância da sede do ICMBio, sua área total aproximada, elevação, quantitativo de mudas plantadas em cada uma delas, a quantidade de linhas principais e secundárias, assim como a data do plantio das parcelas experimentais.

Tabela 1. Principais características das áreas experimentais (SAFs) de Caxiuanã.

SAF	Distância sede (m)	Elevação (m)	Área total ^a (m ²)	Mudas plantadas	^b Linhas principais	^b Linhas secundárias	Data do plantio
A	370	28	350	101	4	3	26/01/2019
B	680	33	500	149	5	4	19/11/2018
C	750	34	400	117	4	4	26/01/2019

^a valores aproximados. ^b Comprimento das linhas: 25m

Nota-se que a data do plantio do SAF B é anterior a de A e C. Por ser o maior em área e número de mudas plantadas, o SAF B foi escolhido para ser implantado primeiramente, uma vez que o transporte das mudas precisou ser feito em duas etapas. Inicialmente, a previsão era que o restante das mudas fossem transportadas e plantadas na semana seguinte, mas naquele ano houve atraso no início das chuvas, razão pela qual se optou por esperar até que houvesse melhores condições de umidade no solo. Ressalta-se, entretanto, que as mudas utilizadas no plantio das três áreas foram preparadas em um mesmo lote, na mesma data. Após a implantação do SAF B, foi preciso irrigar as mudas recém-plantadas para evitar mortalidade, enquanto as demais recebiam irrigação ainda no viveiro, de modo que no momento da implantação dos SAFs A e C, as mudas de todas as três áreas encontravam-se no mesmo tamanho em altura, conforme apresentado na tabela 2.

Tabela 2. Espécies utilizadas na implantação dos sistemas agroflorestais em Caxiuanã e circunstâncias do plantio.

Espécie	Altura das mudas (cm)	Área de Plantio (ind. avaliados)	Linha de plantio	Posição na linha
<i>E. oleracea</i>	30 a 40	B(6)	Secundária	Variável
<i>O. bacaba</i>	20	A(7), B(8), C(8)	Secundária	Variável
<i>M. paradisiaca</i>	50 a 80	A(10), B(15), C(19)	Principal	Fixa
<i>T. cacao</i>	20 a 30	A (3), B(8), C(5)	Principal	Fixa
<i>T. grandiflorum</i>	30 a 40	B(8)	Principal	Fixa
<i>T. subincanum</i>	30	A(3), C(6)	Principal	Fixa
<i>P. acutangulum</i>	15 a 20	A(5), C(8)	Secundária	Variável
<i>P. guajava</i>	20	A(6), C(8)	Secundária	Variável
<i>C. papaya</i>	30	B(14)	Principal	Fixa
<i>C. guianensis</i>	80 a 100	A(4), B(8), C(5)	Principal	Fixa
<i>C. glandulosa</i>	80 a 100	A(8), C(10)	Secundária	Variável
<i>V. americana</i>	40 a 50	A(3), B(9), C(6)	Principal	Fixa

Fonte: o autor (2023)

As mudas foram provenientes de lotes uniformes, produzidas no viveiro de mudas do Instituto Federal do Pará campus Breves, a partir de sementes coletadas na região, com exceção das espécies *T. cacao* (diferentes cultivares de cacau BRS de terra firme para evitar endogamia) e *M. paradisiaca* (variedade pacovan pacoua),

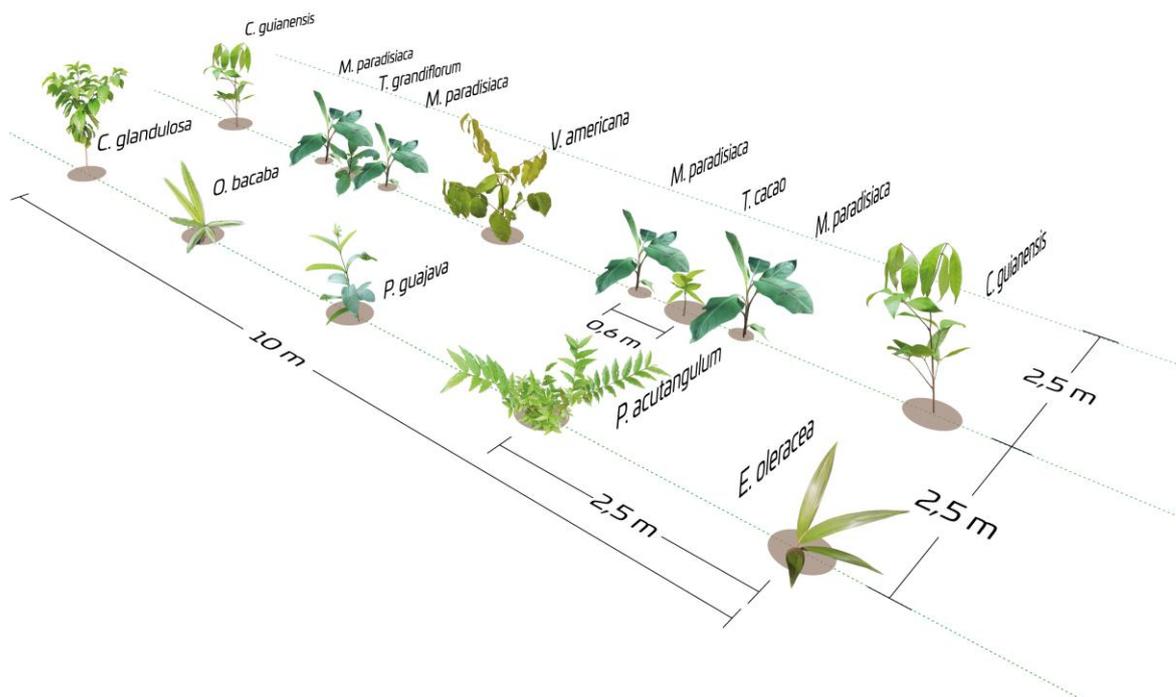
que foram obtidas junto ao IDEFLOR-bio - Instituto de Desenvolvimento Florestal e da Biodiversidade do Estado do Pará.

Devido ao experimento ocorrido anteriormente na área (BURT et al., 2021), no momento do plantio, o solo estava exposto, cobertos apenas com poucas folhas secas da mata adjacente e restos de serragem, oriunda do corte de árvores e arbustos. Não foi realizada adubação nem utilizado fogo para a preparação do solo antes do plantio. A tabela 2 apresenta também a lista das espécies utilizadas na implantação dos SAFs, a altura das mudas no momento do plantio, o número de indivíduos avaliados e o local (SAF) de plantio de cada muda, tipo de linha em que foi inserida e posição na linha de acordo com o esquema de espaçamento adotado.

As mudas das diferentes espécies foram plantadas em sistema agroflorestal compostos de linhas primárias e secundárias, ambas com comprimento de 25m, e espaçamento entre linhas de 2,5m. O espaçamento adotado em linha, ou seja, entre mudas, foi diferente para cada tipo de linha (primária e secundária), sendo a posição das espécies sempre fixa nas linhas primárias, e variável nas linhas secundárias. As espécies utilizadas foram selecionadas de acordo com a disponibilidade de mudas na região e com base em critérios técnicos, conforme discriminado no apêndice I.

As espécies plantadas nos três SAFs (A, B e C) foram *M. paradisiaca*, *T. cacao*, *C. guianensis*, *V. americana* (em linhas principais, posição fixa) e *O. bacaba* (linhas secundárias, posição variável). *E. oleracea* (linha secundária, posição variável), *T. grandiflorum* e *C. papaya*, ambas nas linhas principais, em posições fixas (*C. papaya* alternando com *M. paradisiaca*) foram plantadas apenas na área B. As espécies *P. acutangulum*, *P. guajava* e *C. glandulosa* foram plantadas exclusivamente nas áreas A e C, sempre em linhas secundárias e posição variável. *T. subincanum* foi inserido em posição fixa nas linhas principais de A e C em substituição a *T. grandiflorum*, utilizado apenas em B. A figura 2 apresenta o esquema de espaçamento adotado. Em cada linha principal de plantio, este esquema foi repetido de 10m em 10m, na ordem apresentada. Nas linhas secundárias, todavia, conforme já mencionado, a posição das espécies variou, sendo a ordem das espécies decididas ao acaso, e representadas aleatoriamente no esquema.

Figura 2. Esquema de plantio dos SAFs e espécies utilizadas, FLONA de Caxiuanã.



Fonte: o autor (2023)

Nota: linhas principais contêm *C. guianensis*, *M. paradisiaca*, *T. cacao*, *V. americana* e *T. grandiflorum*, na sequência em que foram plantadas, enquanto linhas secundárias contêm *E. oleracea*, *P. acutangulum*, *P. guajava*, *O. bacaba* e *C. glandulosa*, em ordem aleatória, aqui representadas de maneira ilustrativa

Seguindo uma prática comum entre produtores de cacau em sistemas agroflorestais (GAMA-RODRIGUES et al., 2021; NIETHER et al., 2018), as mudas de *T. subincanum*, *T. grandiflorum* e *T. cacao* foram plantadas em meio a bananeiras (*M. paradisiaca*) nas linhas principais, com intuito de lhes fornecer sombra, principalmente nos horários de sol a pino (próximo ao meio dia). Esta proteção é importante durante a fase inicial do desenvolvimento das mudas, até o final da fase de instalação das culturas, o que geralmente ocorre entre o segundo e o terceiro ano (BRAGA et al. 2019).

As covas foram abertas com tamanho de 20 x 20 x 20 cm. Durante o plantio foi incorporado calcário dolomítico na proporção padrão de 200g por cova, com objetivo de disponibilizar um pouco de cálcio e magnésio para as mudas durante o seu crescimento inicial. Apesar de recomendado o uso de adubação no primeiro ano de plantio para melhorar as chances de sobrevivência das espécies (SCHWARZA et al., 2021), optou-se por não utilizar nenhum fertilizante, simulando desta forma a

realidade das condições de cultivo comumente adotadas pelos ribeirinhos locais (FRARE; OLIVEIRA; FREITAS, 2017). A estratégia utilizada foi adotar uma abordagem sem interferência (“*a hands-off approach*”), conforme mencionado por SCHWARZA et al. (2021). A cada cinco metros nas linhas secundárias foram plantadas doze sementes de mucuna-verde (*Mucuna pruriens*) no primeiro ano.

3.2.3. Acompanhamento e manutenção das parcelas experimentais

No primeiro ano de condução do experimento, foram realizadas quatro visitas de manutenção, uma a cada três meses, aproximadamente, sendo duas durante o período chuvoso, e outras duas na estação seca. A partir de 2020 foram realizadas duas visitas ao ano, uma no auge da estação chuvosa (entre fevereiro e março), outra no ápice da estação seca (entre outubro e novembro). Em 2021 não foi realizada a medição no período chuvoso por problemas logísticos. Durante as visitas foi realizado o monitoramento visual das parcelas experimentais quanto à presença de pragas e sintomas de doenças, planta a planta. A taxa de sobrevivência/mortalidade das espécies também foi avaliada. Durante estas visitas também foram feitas capinas manuais (coroamento das mudas e a limpeza das entrelinhas) sempre que necessárias, para evitar a mato competição. As espécies nativas da vegetação espontânea foram cortadas manualmente com auxílio de um facão/terçado, e espalhadas sobre as linhas de plantio como fonte de matéria orgânica para as espécies do SAF.

3.2.4. Parâmetros avaliados e cálculos de incremento anual

Foram mensurados o diâmetro e altura de todas as espécies florestais e frutíferas estudadas no momento do plantio e pelos próximos três anos, uma vez ao ano, ou seja, aos 0, 12, 24 e 36 meses. Todos os indivíduos plantados foram medidos e avaliados, inclusive aqueles presentes em linhas próximas à floresta (a 3m de distância), que foram excluídos dos cálculos para evitar o efeito de bordadura, seguindo orientações de SCHWARZA et al. (2021). O diâmetro foi medido à altura do coleto (d.a.c.), ou seja, a 1 cm do solo, sendo que para *M. paradisiaca* o crescimento em diâmetro foi medido no pseudocaule (lançamento de folhas), uma vez que a espécie não apresenta caule aéreo, apenas roseta foliar (EMBRAPA, 2016). A altura foi medida do solo até a gema apical das plantas, com exceção de *E. oleracea*, *O. bacaba* e *M. paradisiaca*, para as quais a altura foi medida do solo até a

projeção da copa, com auxílio de uma régua em formato de “T”. O d.a.c. foi determinado utilizando-se um paquímetro de aço de precisão de 0,02mm; a altura das plantas foi medida com auxílio de uma fita métrica metálica de 5m. Para indivíduos acima de 5m foi providenciada uma haste de madeira de 5m de comprimento, utilizada em complementação à fita métrica.

Foram calculados o incremento médio anual em diâmetro (IMAD) e em altura (IMAH), além do incremento periódico anual em diâmetro (IPAD) e em altura (IPAH), sendo essas medidas diretas que refletem a produção de biomassa e produtividade das espécies avaliadas (BACCA-ACOSTA et al., 2021). O IMAD foi calculado aos três anos após o plantio utilizando-se a seguinte equação: $IMAD = [(\sum_{j=1}^n d.a.c)/N_{ij}]/(I)$, onde I = idade do plantio (em anos); N_{ij} = número de indivíduos i da espécie j; $\sum_{j=1}^n d.a.c$ = soma dos diâmetros dos indivíduos i da espécie j (mm). Equação semelhante foi utilizada para calcular a IMAH, substituindo-se a variável d.a.c. por H (altura), em cm. O IPAD e IPAH foram calculados anualmente por período de três anos para cada medição (M1, M2...M4), subtraindo-se M1 de M2, e dividindo o resultado obtido pelo intervalo de tempo (em anos) registrado entre ambas as medições, e assim sucessivamente. Enquanto o incremento periódico anual (IPA) expressa o crescimento médio de uma árvore em um determinado período de tempo qualquer, o incremento médio anual (IMA) expressa a média do crescimento total a certa idade da árvore, considerada a partir do tempo zero (IMAÑA-ENCINAS; SILVA; PINTO, 2005).

Além dos cálculos de incremento de biomassa vegetal foram também estimados os valores de potencial de sequestro de carbono de cada espécie avaliada nos SAFs, para utilização na composição de um índice de recomendação das espécies. Para calcular o acúmulo de C pelas plantas foi utilizada a seguinte equação, proposta por Moraes Junior et al. (2019): $C_{ij} = [0.000353 \times (d.a.c)^{1,20242} \times (H)^{0,781883}]$, ($R^2 = 82,12\%$), onde C_{ij} = acúmulo de carbono de cada indivíduo i da espécie j (kg); d.a.c = diâmetro na altura do coleto (mm); e H = altura das plantas (cm). Em seguida, foi calculado o incremento de carbono médio anual (IMACO₂) para cada espécie, a partir da equação $IMACO_{2j} = [(\sum_{i=1}^n CO_{2j})/N_j]/(I)$ (MORAIS JUNIOR et al., 2019), onde I = idade das plantas (3 anos); N_j = número de indivíduos da espécie j; $\sum_{i=1}^n CO_{2j}$ = soma de dióxido de carbono (CO₂) dos indivíduos i da

espécie j (kg). Converteu-se C em CO_2 levando-se em conta a relação do peso molecular de cada molécula, ou seja, de 44 kg CO_2 para 12 kg C.

3.2.5. Índice de recomendação das espécies

As espécies avaliadas no presente estudo foram divididas em três categorias, compondo um índice de recomendação de uso baseado na metodologia descrita por Salomão, Brienza Júnior e Rosa (2014). Foram adotados três critérios para a classificação das espécies: índice de mortalidade, potencial de produção de biomassa - com base nos cálculos de Morais Junior et al. (2019) - e padrão gráfico de crescimento das plantas (SCOLFORO et al., 2008) (ver Apêndice II). Por a taxa de sobrevivência ser considerada a variável de maior interesse em relação às demais, uma vez que algumas espécies apresentam naturalmente um crescimento mais lento em relação a outras, foram atribuídos pesos às variáveis, com base nas proposições de Martins et al. (2020): peso 3 para mortalidade; peso 2 para o potencial de produção de biomassa; e peso 1 para o padrão gráfico de crescimento, conforme apresentado pela tabela 3.

Tabela 3. Critérios utilizados para classificação das espécies, pesos atribuídos a cada um deles e definição dos intervalos de pontuação.

Critério:	Mortalidade	Biomassa	Crescimento
Peso:	3	2	1
Nota:	3	Acima de 5t de CO_2 /ha/ano	Exponencial
	2	Entre 1 e 5 t de CO_2 /ha/ano	Paralelo
	1	Abaixo de 1 t de CO_2 /ha/ano	Decrescente

Fonte: o autor (2023)

Nota: Os intervalos de mortalidade utilizados foram estabelecidos com base em Salomão, Brienza Júnior e Rosa (2014), os intervalos de biomassa pelo autor, e os de crescimento com base no trabalho de Scolforo et al. (2008).

Os intervalos de pontuação foram estabelecidos entre 6 (mínimo) e 18 (máximo). Espécies que apresentaram pontuação entre 15 e 18 foram consideradas

muito recomendadas para o plantio nas condições estudadas, ou recomendadas sem ressalvas; as espécies que obtiveram pontuação entre 11 e 14 foram consideradas razoavelmente recomendadas; e, finalmente, espécies que apresentaram pontuação entre 6 e 10 foram pouco recomendadas. Neste último caso, as espécies podem até ser indicadas para uso na região, desde que observadas recomendações complementares como, por exemplo, serem introduzidas numa etapa posterior às demais, para assegurar a sua sobrevivência.

3.2.6. Coleta e análise de solo

As amostras de solo foram realizadas em dois momentos durante o desenvolvimento do experimento, uma após um ano de plantio, e outra no final do terceiro ano. As amostras de solo foram coletadas com auxílio de uma pá cavadeira na profundidade de 20 cm, em zigue-zague, a cada quatro metros, aproximadamente, sendo uma amostra simples retirada da linha de plantio e outra na entrelinha, e assim sucessivamente, conforme recomendação de amostragem de solos em pomares de culturas perenes, adotadas também para sistemas agroflorestais (SENAR, 2017). Devido à homogeneidade do terreno onde foram implantados os SAFs, para cada conjunto de linha e entrelinha amostrada foram retiradas seis amostras simples, formando uma amostra composta. Também foram realizadas coletas de solo em uma área demarcada de 0,5 hectare de floresta adjacente, para servir de testemunha, sendo obtidas três amostras compostas (formadas por seis amostras simples cada) no primeiro ano, e apenas uma amostra composta no terceiro ano.

Após a coleta, as amostras de solo foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de malha de 2 mm de diâmetro. Os parâmetros químicos do solo avaliados foram pH, fósforo (P), fósforo remanescente, potássio (K), sódio (Na), enxofre (S), cálcio (Ca), magnésio (Mg), alumínio (Al), acidez potencial (H+Al), matéria orgânica (MO), carbono orgânico (CO), nitrogênio total (N), boro (B), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn) e zinco (Zn). Calculou-se também a soma de bases (SB), a CTC potencial (T), a CTC efetiva (t), a saturação por bases (V%) e a saturação por alumínio (m%). A textura dos solos também foi analisada. O pH do solo foi determinado em água na proporção de solo para água de 1:2,5; Mg, Ca e Al trocáveis foram extraídas com solução de 1M de KCl e determinadas por

espectroscopia de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP-AES Spectro Genesis, Kleve, Alemanha); Na, P, K, Zn, Fe, Mn e Cu foram extraídos por solução de Mehlich-1 (0,05M HCl + 0,0125M H₂SO₄) e também determinadas por espectroscopia (TEIXEIRA et al., 2017). O B foi analisado por método de água quente (CRAVO; VIÉGAS; BRASIL, 2020). A MO foi determinada através do método de oxidação com dicromato de potássio e o CO, estimado dividindo-se o teor de MO por 1,724 (“fator Van Bemmelen”). O teor de S foi determinado utilizando-se fosfato monobásico cálcio 0,01M. O nitrogênio foi determinado através do método Kjeldahl, e o fósforo remanescente, em uma suspensão (1:10; v:v) de solo e solução 60 mg/L P + 10 mmol/L CaCl₂. A textura dos solos foi determinada pelo método de pipeta (BOUYOUCOS, 1927). Detalhes metodológicos podem ser obtidos em Teixeira et al. (2017).

3.2.7. Análises estatísticas

Os dados de crescimento em diâmetro e altura foram sujeitos à análise de variância (ANOVA) com fator duplo, e as médias, comparadas por meio do teste Tukey (a 5% de probabilidade). Os pressupostos da ANOVA, homogeneidade (teste de Bartlett a 5% de significância) e normalidade dos resíduos (teste de Shapiro-Wilk a 5% de significância), foram checados. Ressalta-se que os indivíduos avaliados não foram utilizados individualmente nas análises estatísticas. Optou-se, ao invés de selecionar indivíduos específicos aleatoriamente entre as linhas de plantio, por se fazer uma média dos valores por linha, que, naturalmente, continham ao menos um indivíduo de cada espécie, mas geralmente de dois a três. Os números apresentados, portanto, não representam apenas um indivíduo, mas todos os indivíduos de uma determinada espécie em uma mesma linha de plantio. Esta estratégia foi uma tentativa de reduzir a influência da variação genética naturalmente esperada entre indivíduos não clones de uma mesma espécie. As análises estatísticas foram realizadas utilizando-se os softwares R (R Core Team, 2022) e *Past Statistics* (HAMMER; HARPER; RYAN, 2001).

3.3. RESULTADOS

3.3.1. Atributos químicos dos solos estudados

Os solos avaliados apresentaram, em geral, baixa fertilidade, estando os teores de cálcio (Ca), magnésio (Mg), potássio (K) e fósforo (P) abaixo dos valores críticos para a maioria das culturas cultivadas no Pará (CRAVO; VIÉGAS; BRASIL, 2020). Os teores de Ca, Mg e K são significativamente menores nas áreas de SAFs quando comparadas às áreas de floresta. Os teores de P entre as áreas não diferiram, variando de 2,1 mg/dm³ na floresta a 2,8 mg/dm³ no SAF (Tabela 4).

Tabela 4. Atributos químicos dos solos, antes e depois da conversão da floresta em sistema agroflorestal.

Tipo de cobertura	pH	Ca	Mg	SB ^a	Al ³⁺	H+Al ^b
	----- cmol _c /dm ³ -----					
Floresta	5,0 a	0,2 a	0,4 a	0,7 a	0,8 b	7,5 a
SAF	4,7 ± 0,15 b	0,05 ± 0,01b	0,08 ± 0,05 b	0,2 ± 0,05 b	1,7 ± 0,1 a	5,5 ± 1,6 b
Nível crítico ^c :	<5 (baixo)	<1,5 (baixo)	<0,5 (baixo)	-----	>1 (alto)	-----
	K	P	N total	V ^d	m ^e	CTC _{ef} ^f
	----- mg/dm ³ -----		----- % -----			cmol _c /dm ³
	29,2 a	2,1 a	0,19 a	8,8 a	52 b	1,5 b
	22,9 ± 2,27 b	2,8 ± 1,17 a	0,16 ± 0,02 a	4,0 ± 1,2 b	89 ± 1,7 a	1,9 ± 0,15 a
	<0,1 (baixo)	<5 (baixo)	-----	-----	>20-40 (alto)	<2 (muito baixo)
	MO ^g	B	Cu	Fe	Mn	Zn
	----- mg/dm ³ -----					
	3,8 a	0,13 a	0,1 a	537 a	3,0 a	0,4 b
	3,2 ± 0,6 b	0,12 ± 0,03 a	0,1 ± 0,01 a	414 ± 6 b	2,2 ± 0,4 b	0,8 ± 0,3 a
	>3 (alto)	0,5	1,0	-----	5,0	1,0

^aSB = soma de bases; ^bH+Al = acidez potencial; ^c = em pH 6,0, segundo Cravo, Viégas e Brasil (2020);

^dV = saturação por bases; ^em = saturação por alumínio; ^fCTC_{ef} = capacidade de troca de cátions efetiva

^gMO = matéria orgânica. Fonte: o autor (2023)

Nota: Os valores individuais dos atributos do solo da floresta foram comparados às médias do SAF utilizando-se one-sample test (t test) do programa PAST (HAMMER; HARPER; RYAN, 2001). Letras iguais sinalizam que os valores não são diferentes entre si.

Os teores de matéria orgânica (MO), fósforo (P), potássio (K), alumínio (Al³⁺), saturação por bases (V) e CTC efetiva não apresentaram diferenças entre o primeiro e terceiro anos de experimento. A saturação por alumínio (m), ferro (Fe) e

pH, entretanto, aumentaram com o passar dos anos, enquanto que a soma de bases, cálcio (Ca), magnésio (Mg) e boro (B), diminuíram (Tabela 5).

Tabela 5. Alteração dos atributos químicos dos solos dos SAFs três anos após remoção da cobertura florestal – Floresta Nacional de Caxiuanã.

SAF	pH	Ca	Mg	SB ^a	m ^b	B	Fe
		----- cmol _c /dm ³ -----			%	----- mg/dm ³ -----	
ANO 1	4,3 ± 0,15 b	0,25 ± 0,06 a	0,29 ± 0,05 a	0,63 ± 0,04 a	69,3 ± 4,1 b	0,28 ± 0,03 a	161 ± 82 b
ANO 3	4,7 ± 0,15 a	0,05 ± 0,01 b	0,08 ± 0,05 b	0,20 ± 0,05 b	89,3 ± 1,8 a	0,12 ± 0,03 b	414 ± 67,5 a
SAF	P	K	S	Al ³⁺	CTC _{ef} ^c	V ^d	MO ^e
		----- mg/dm ³ -----			---- cmol _c /dm ³ ----	----- % -----	
ANO 1	5,0 ± 0,9 a	27,0 ± 2,2 a	12,8 ± 2,7 a	1,4 ± 0,2 a	2,1 ± 0,19 a	6,1 ± 2,3 a	2,5 ± 0,8 a
ANO 3	2,8 ± 1,2 a	22,9 ± 2,2 a	8,7 ± 1,5 a	1,7 ± 0,1 a	1,9 ± 0,15 a	4,0 ± 1,2 a	3,2 ± 0,6 a

^aSB= soma de bases; ^bm=saturação por alumínio; ^cCTC_{ef}= CTC efetiva; ^dV= saturação por bases; ^eMO= matéria orgânica

Fonte: o autor (2023)

Nota: Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

3.3.2. Incidência de pragas e doenças e sintomas de deficiência mineral nas plantas

Os indivíduos das espécies avaliadas não apresentaram sintomas expressivos de doenças, com exceção de *T. cacao* e *T. grandiflorum*. Para essas espécies observou-se em alguns indivíduos superbrotamento de gemas apicais, sintoma típico da doença conhecida como vassoura-de-bruxa (*Crinipellis pernicioso*), provavelmente associada à deficiência mineral (NAKAYAMA et al., 1998). Também foram observados sintomas de deficiência de magnésio (Mg) nas culturas de cacau (*T. cacao*) e cupuí (*T. subincanum*) durante o período chuvoso nos SAFs B e C, com clorose internerval intensa nas folhas velhas (LIMA, 2002). Algumas bananeiras apresentaram sintomas de deficiência mineral, com sintoma de murcha abiótica associada à deficiência aguda de potássio (EMBRAPA, 1998). Além disso, foi observada a presença ocasional de pragas como gafanhotos e lagartas generalistas em indivíduos de *E. oleracea*, principalmente na época chuvosa.

3.3.3. Taxa de Mortalidade e incrementos anuais

Cinco das doze espécies estudadas apresentaram sobrevivência de 100% ao final dos três anos de avaliação: *P. acutangulum*, *C. guianensis*, *O. bacaba*, *T.*

grandiflorum e *P. guajava*. Por outro lado, duas delas, *M. paradisiaca* e *C. papaya*, apresentaram altas taxas de mortalidade, de 93,2 e 100%, respectivamente. *Carica papaya* apresentou, já no primeiro ano, mortalidade de 78,6%. Outras espécies como *V. americana*, *C. glandulosa* e *T. subincanum* apresentaram taxas de mortalidade inferior a 12%. As espécies *T. cacao* e *E. oleracea* apresentaram mortalidade próxima de 30%, ou seja, um terço dos indivíduos plantados, aproximadamente, não sobreviveu até o final do experimento (Tabela 6).

Tabela 6. Mortalidade média das espécies avaliadas após um e três anos da implantação dos SAFs na Floresta Nacional de Caxiuanã, PA.

Taxa de mortalidade (%)		
Espécies	ANO 1	ANO 3
<i>Euterpe oleracea</i>	0,0	33,3
<i>Oenocarpus bacaba</i>	0,0	0,0
<i>Musa paradisiaca</i>	25,0	93,2
<i>Theobroma cacao</i>	6,3	31,3
<i>Theobroma grandiflorum</i>	0,0	0,0
<i>Theobroma subincanum</i>	11,1	11,1
<i>Psidium acutangulum</i>	0,0	0,0
<i>Psidium guajava</i>	0,0	0,0
<i>Carica papaya</i>	78,6	100,0
<i>Carapa guianensis</i>	0,0	0,0
<i>Colubrina glandulosa</i>	5,6	5,6
<i>Vouacapoua americana</i>	5,6	5,6

Fonte: o autor (2023)

Após três anos de avaliação, os três maiores incrementos médios anuais em diâmetro (IMAD) foram observados para as espécies *C. glandulosa* (19,7 mm), *E. oleracea* (9,1 mm) e *O. bacaba* (8,7 mm). Os menores IMAD foram observados em *P. guajava* (1,6 mm), *T. subincanum* (1,9 mm) e *V. americana* (3,1 mm). Os três maiores incrementos médios anuais em altura (IMAH) foram observados para as espécies *C. glandulosa* (197,2 cm), *C. guianensis* (53,7 cm) e *O. bacaba* (39,6 cm), enquanto os menores IMAH foram observados para *T. subincanum* (12,2 cm), *P. guajava* (17,1 cm) e *T. grandiflorum* (18,6 cm) (Tabela 7).

Tabela 7. Incremento médio anual (IMA) em diâmetro (D) e em altura (H) das dez espécies dos SAFs de Caxiuanã que alcançaram os três anos de idade.

Espécie	IMAD (mm)	IMAH (cm)
<i>Euterpe oleracea</i>	9,1 ± 2,5	38,4 ± 17,9
<i>Oenocarpus bacaba</i>	8,7 ± 2,3	39,6 ± 6,8
<i>Theobroma cacao</i>	3,3 ± 1,6	23,5 ± 6,8
<i>Theobroma grandiflorum</i>	3,7 ± 0,7	18,6 ± 9,3
<i>Theobroma subincanum</i>	1,9 ± 0,6	12,2 ± 3,3
<i>Psidium acutangulum</i>	3,4 ± 1,4	29,9 ± 12,2
<i>Psidium guajava</i>	1,6 ± 0,5	17,1 ± 2,5
<i>Carapa guianensis</i>	4,7 ± 2,2	53,7 ± 28,3
<i>Colubrina glandulosa</i>	19,7 ± 2,4	197,2 ± 17,5
<i>Vouacapoua americana</i>	3,1 ± 0,8	39,2 ± 11,9
Valores médios	5,9	46,9

Fonte: o autor (2023)

Observou-se que não houve efeito de área no crescimento de *P. guajava*, mas houve efeito de tempo, sendo que no terceiro ano de experimento o incremento em diâmetro da espécie foi significativamente menor (Tabela 8). Da mesma forma, para *C. glandulosa* não foi possível verificar diferença de crescimento entre as áreas, mas o incremento em diâmetro foi significativamente maior no terceiro ano.

Tabela 8. Incremento periódico anual em diâmetro (IPAD) e altura (IPAH) de *Psidium guajava*, *Psidium acutangulum* e *Colubrina glandulosa* nos SAFs A e C em três momentos (anos 1, 2 e 3) após a implantação dos SAFs em Caxiuanã.

SAF/	Incremento periódico anual em diâmetro (IPAD)			Incremento periódico anual em altura (IPAH)		
	<i>P. guajava</i>	<i>P. acutangulum</i>	<i>C. glandulosa</i>	<i>P. guajava</i>	<i>P. acutangulum</i>	<i>C. glandulosa</i>
ANO	----- mm -----			----- cm -----		
A/1	1,9 ± 1,05 Aa	6,0 ± 0,1 Aa	14,2 ± 3,0 Ab	26,2 ± 7,7 Ba	56,4 ± 5,32 Aa	144,9 ± 28,4 Ab
C/1	3,3 ± 0,5 Aa	4,1 ± 0,7 Aa	16,5 ± 1,5 Ab	51,7 ± 3,4 Aa	46,0 ± 5,1 Ba	120,0 ± 35,3 Ab
A/2	1,7 ± 0,1 Aa	3,3 ± 1,0 Ab	18,1 ± 0,8 Ab	23,0 ± 3,2 Aa	27,7 ± 21,1 Ab	223,2 ± 16,3 Aa
C/2	2,3 ± 0,2 Aa	2,2 ± 0,3 Aab	18,0 ± 3,6 Ab	13,3 ± 6,4 Ab	11,8 ± 2,2 Bb	221,8 ± 21,4 Aa
A/3	0,9 ± 0,6 Ab	4,6 ± 1,3 Aab	22,0 ± 6,0 Aa	5,0 ± 4,3 Ab	41,2 ± 16,8 Ab	230,1 ± 32,3 Aa
C/3	0,4 ± 0,5 Ab	0,9 ± 0,6 Bb	26,3 ± 4,7 Aa	2,7 ± 4,6 Ab	7,7 ± 5,9 Bb	207,2 ± 27,3 Aa

Fonte: o autor (2023)

Nota 1: Médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

Nota 2: (Diâmetro) Para *P. guajava* e *C. grandulosa*, letras maiúsculas comparam o efeito simples (sem desdobramento) entre diferentes áreas, independentemente do ano, enquanto letras minúsculas comparam efeito simples entre os anos, independentemente da área. Para *P. acutangulum*, letras maiúsculas comparam as diferentes áreas dentro de um mesmo ano, enquanto letras minúsculas comparam os anos dentro de uma mesma área.

Nota 3: (Altura) Para *P. acutangulum* e *C. grandulosa*, letras maiúsculas comparam o efeito simples (sem desdobramento) entre diferentes áreas, independentemente do ano, enquanto letras minúsculas comparam efeito simples entre os anos, independentemente da área. Para *P. guajava*, letras maiúsculas comparam as diferentes áreas dentro de um mesmo ano, enquanto letras minúsculas comparam os anos dentro de uma mesma área.

As espécies *T. subincanum* e *T. cacao*, semelhantemente ao demonstrado pelas espécies do gênero *Psidium*, apresentaram maior crescimento no primeiro ano de estudo, enquanto *T. gradiflorum* não apresentou diferença na taxa de crescimento entre os anos avaliados (Tabela 9).

Tabela 9. Incremento periódico anual em diâmetro (IPAD) e altura (IPAH) de *T. subincanum*, *T. gradiflorum* e *T. cacao* nas áreas de SAFs de Caxiuanã em diferentes períodos de tempo após sua implantação.

Incremento periódico anual		
<i>T. subincanum</i>		
C/1	3,76 ± 1,12 a	23,84 ± 8,35 a
C/2	0,29 ± 0,29 b	14,67 ± 2,49 ab
C/3	2,02 ± 0,81 ab	4,58 ± 6,74 b
<i>T. cacao</i>		
B/1	5,14 ± 0,60 Aa	41,46 ± 8,43 Aa
B/2	2,14 ± 1,05 Ab	18,65 ± 4,93 Ab
C/1	5,26 ± 2,35 Aa	43,57 ± 10,35 Aa
C/2	2,05 ± 1,05 Ab	22,90 ± 1,59 Ab
<i>T. gradiflorum</i>		
B/1	3,70 ± 1,09 a	24,19 ± 19,13 a
B/2	2,36 ± 0,59 a	16,99 ± 5,59 a
B/3	4,88 ± 1,11 a	16,14 ± 6,08 a

Fonte: o autor (2023)

Nota: médias seguidas da mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Para T. grandiflorum, os pressupostos da ANOVA foram violados. Neste caso, o teste de Kruskal-Wallis não identificou diferenças entre as medianas, sendo consideradas estatisticamente semelhantes.

A tabela 10 apresenta a pontuação final e a classificação das espécies de acordo com o índice ponderado proposto, com base nos critérios de taxa de mortalidade, potencial de produção de biomassa e padrão gráfico de crescimento das espécies.

Tabela 10. Classificação das espécies avaliadas nos SAFs de Caxiuanã de acordo com o índice de recomendação proposto.

Espécie	Pontuação Mortalidade	Pontuação Biomassa	Pontuação IPA	Pontuação Final	Classificação^a
<i>E. oleracea</i>	2	2	3	13	R
<i>O. bacaba</i>	3	2	3	16	MR
<i>M. paradisiaca</i>	1	3	1	10	PR
<i>T. cacao</i>	2	1	1	9	PR
<i>T. grandiflorum</i>	3	1	2	13	R
<i>T. subincanum</i>	3	1	1	12	R
<i>P. acutangulum</i>	3	1	2	13	R
<i>P. guajava</i>	3	1	1	12	R
<i>C. papaya</i>	1	2	1	8	PR
<i>C. guianensis</i>	3	2	3	16	MR
<i>C. glandulosa</i>	3	3	3	18	MR
<i>V. americana</i>	3	1	3	14	R

^a MR = muito recomendado; R = recomendado; PR = pouco recomendado

Fonte: o autor (2023)

3.4. DISCUSSÕES

3.4.1. Características dos solos de Caxiuanã

A caracterização dos atributos químicos dos solos das áreas de SAFs de Caxiuanã é semelhante àquela observada em outros Latossolos da Amazônia

(MOREIRA; MALAVOLTA, 2004; MALHI et al., 2009; SOUZA et al., 2018; CHAVES et al., 2020), em que se evidenciam baixos valores de pH, alto teor de alumínio, alta saturação por alumínio e muito baixa capacidade de troca de cátions efetiva.

De acordo com a tabela 4, os teores de Ca, Mg e K são significativamente menores nas áreas de SAFs quando comparadas às áreas de floresta. A remoção da cobertura vegetal original pode reduzir o teor de matéria orgânica, o pH, e a disponibilidade de nutrientes para as plantas, alterando a composição microbológica do solo e interferindo no processo de decomposição da matéria orgânica (WANG et al., 2017). Pereira et al. (2017), em estudos sobre a dinâmica de P e K em Latossolos Amarelos na Amazônia, relataram que a baixa disponibilidade de K nos solos da região está provavelmente relacionada à maior susceptibilidade deste elemento à lixiviação. Áreas sem cobertura vegetal e propensas a maior entrada de água e luz solar são ainda mais susceptíveis à lixiviação (CALDEIRA et al., 2019). De acordo com Moreau (2021), os maiores teores de nutrientes como Ca, Mg e K no solo da floresta podem estar relacionados à grande quantidade de serapilheira oriunda da cobertura vegetal. A serapilheira compreende o material orgânico depositado na superfície do solo, sendo considerada uma importante fonte de nutrientes para as plantas (DINIZ et al., 2015).

O fósforo apresenta boa taxa de mobilidade nas plantas, o que faz com que ele seja redistribuído antes da abscisão foliar, sendo pouco presente na serapilheira (MAIA et al., 2015; PEREIRA et al., 2017). Este fator ajuda a explicar porque o teor de P dos solos dos SAFs não foi considerado diferente do solo de floresta, uma vez que a remoção da serapilheira tende a não alterar por si só a disponibilidade de P. Todavia, o teor de fósforo no solo após conversão da floresta em área agrícola tende a diminuir, especialmente na camada superficial do solo, de 0 a 20 cm (SUAREZ et al., 2021). As baixas concentrações de P nos solos da Amazônia é um dos fatores limitantes à agricultura na região (GUEDES et al., 2018). Em geral, esta condição está relacionada à escassez deste nutriente no material de origem de formação dos solos (MOREIRA et al., 2009).

A diminuição dos teores de macronutrientes nas áreas de SAFs pode ser uma evidência de que houve perda da fertilidade dos solos depois da conversão da floresta para a implantação de sistema agroflorestal. A perda de cátions como Ca,

Mg e K pode ter favorecido o maior índice de acidez nos solos de SAF (4,7) quando comparado ao da floresta (5). Esta diminuição pode estar relacionada à interrupção do processo de ciclagem desses nutrientes após a remoção da vegetação e consequente redução da deposição de serapilheira. Nestas circunstâncias, os nutrientes disponíveis podem ter reduzido, tanto por terem sido absorvidos pelas culturas do SAF, como possivelmente perdidos por lixiviação.

A matéria orgânica (MO) é importante fonte e reserva de nutrientes para os microrganismos do solo e plantas, principalmente N e S, sendo também uma das principais fontes de P na forma disponível para as plantas, em liberação contínua por meio da mineralização do fósforo orgânico (SILVA JÚNIOR, 2007). Os teores de matéria orgânica do solo nos dois tipos de cobertura vegetal analisados podem ser considerados médios de acordo com Cravo, Viégas e Brasil (2020), estando situados entre 2 e 4%. O teor de MO dos solos de SAFs (3,2%) foi menor que o da floresta (3,8%). Segundo Primavesi (2006), os solos agrícolas em condições tropicais, ao contrário dos solos das florestas, apresentam predomínio de bactérias aeróbias de atividade intensa, e a acumulação de húmus é mais difícil devido ao processo de decomposição rápida da matéria orgânica. Além disso, a MO do solo é sensível às práticas de manejo, podendo ser reduzida a menos de 50% após a conversão de floresta em áreas de cultivo em função da maior decomposição microbiana e susceptibilidade à erosão destes solos (SILVA JÚNIOR, 2007). A remoção da serapilheira é outro fator que pode prejudicar a atividade dos microrganismos do solo, com consequências negativas para a ciclagem de nutrientes (MAIA et al., 2015; REED et al., 2011).

A matéria orgânica é responsável por grande parte da CTC de Latossolos e Argissolos da Amazônia (EFFGEN et al., 2012). Níveis extremamente baixos de CTC em solos tropicais geralmente estão relacionados à alta taxa de intemperismo dos minerais dos solos, a uma reserva muito baixa de nutrientes para as plantas e grande potencial de lixiviação de cátions (LOPES; GUIMARÃES GUILHERME, 2016). A CTC do solo na floresta geralmente é maior devido a um maior teor de MO (LONGO; ESPÍNDOLA, 2000). Contudo, a capacidade de troca de cátions (CTC) efetiva dos solos dos SAFs ($1,9 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$) foi maior que na floresta ($1,5 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$). Ambas podem ser consideradas CTC muito baixas de acordo com Buol et al. (1975), que estabeleceu o valor crítico de $4 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ para este atributo. Os valores de

soma de bases (SB) do solo da floresta ($0,7 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$) foi maior que no SAF ($0,2 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$), influenciado principalmente pelo maior teor de Mg, Ca, K e MO desses solos. A SB dá uma indicação do número de cargas negativas dos colóides que está ocupado por bases (RONQUIM, 2020). Esse resultado é uma evidência de que o calcário aplicado nas covas durante a implantação dos SAFs não aumentou o valor de SB no sistema como um todo.

Outro índice importante relacionado à disponibilidade de nutrientes do solo é a saturação por bases (V). Os valores de V% no solo da floresta também foram maiores (8,8%) do que no SAF (4%). Um valor de V% baixo significa que há pequena proporção de cátions como Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ nas cargas negativas dos colóides, e que, portanto, a maioria está ocupada por H^+ e Al^{3+} (RONQUIM, 2020). De acordo com este autor, solos com V% menor que 50% são considerados pouco férteis e podem conter alumínio em nível tóxico para as plantas. A maioria das culturas apresenta boa produtividade quando V% alcança valores de 50% e 80% (CRAVO; VIÉGAS; BRASIL, 2020).

Os teores de nitrogênio (N) avaliados não foram considerados estatisticamente diferentes, variando de 0,16% nos solos dos SAFs a 0,19% no solo da floresta. O conteúdo de N do solo está diretamente relacionado à MO, sendo, em geral, maior em floresta do que em áreas agrícolas (MACHADO et al., 2017). A maior parte do N total do solo é o N orgânico. Por esta razão, a remoção da cobertura vegetal geralmente promove uma diminuição dos teores de N no solo, também associada a mudanças significativas na estrutura do solo, o que afeta a atividade biológica (MOREIRA; MALAVOLTA, 2004). A maior quantidade de N, assim como de carbono orgânico está concentrada no horizonte superficial dos solos, nos primeiros 20 cm, por ser nesta camada onde ocorre o maior acúmulo de matéria orgânica (LONGO; ESPÍNDOLA, 2000). Segundo Lopes e Guimarães Guilherme (2016) o estresse hídrico, pH baixo e deficiência generalizada de nutrientes são condições limitantes para o processo de mineralização do N nos solos. Em solos ácidos, perdas significativas de nitrogênio podem ocorrer devido à volatilização da amônia durante o processo mineralização do N orgânico pelos microorganismos do solo (GROPPO et al., 2015). Segundo estes autores, a perda de N mineral pode estar associada ao aumento da temperatura (alteração do microclima) devido à mudança no uso da terra, o que acelera os processos de

lixiviação, desnitrificação e decomposição da matéria orgânica. Na Amazônia ocidental, as maiores concentrações de nitrogênio em solos de cultivo estão relacionadas a técnicas mais sustentáveis de produção, como o plantio direto e a rotação de culturas (DE MORAES SÁ et al., 2013). A utilização de adubação verde, com o plantio em linha de mucuna no primeiro ano de implantação das culturas, pode ter ajudado a aumentar o teor de N no solo do SAF, fazendo com que não diferisse do teor verificado no solo da floresta.

O teor de Al dos solos dos SAFs ($1,7 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$) foi maior quando comparado com o da floresta ($0,8 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$), o que pode estar relacionado à menor disponibilidade de macronutrientes e à maior acidez dos solos do SAF. De acordo com Ronquim (2020), solos com acidez elevada, além do baixo teor de bases catiônicas, geralmente apresentam elevado teor de alumínio, alta fixação de fósforo nos coloides do solo e deficiência de micronutrientes. A saturação por alumínio (m) foi de 52% para a floresta e 89% para as áreas de SAF. Essa proporção de alumínio nos sítios de troca próxima de 90% observada nos solos dos SAFs é considerada muito alta e pode representar um impeditivo para o adequado desenvolvimento de muitos cultivos agrícolas (CRAVO; VIÉGAS; BRASIL, 2020). Valores de m% acima de 20% já são considerados tóxicos para as culturas mais sensíveis ao alumínio (LOPES e GUIMARÃES GUILHERME, 2016).

As concentrações de micronutrientes em solos amazônicos são geralmente baixas (MOREIRA et al., 2009). Esses autores destacam que concentrações de fósforo e boro, além da acidez ativa, são fatores limitantes ao crescimento das plantas e podem também limitar o crescimento de microorganismos no solo. Os teores de B e Cu do solo das áreas estudadas não apresentaram diferenças entre si, sendo de $0,1 \text{ mg}/\text{dm}^3$ para ambos micronutrientes, considerado abaixo do nível crítico de $0,5 \text{ mg}/\text{dm}^3$ (LOPES E GUIMARÃES GUILHERME, 2016). O teor de Zn do SAF ($0,8 \text{ mg}/\text{dm}^3$) foi maior que o da floresta ($0,4 \text{ mg}/\text{dm}^3$). Apesar disso, esses teores ainda encontram-se abaixo do nível crítico de $1 \text{ mg}/\text{dm}^3$ e, portanto, também podem ter imposto limitação ao desenvolvimento das culturas dos SAFs.

O aumento do pH de 4,3 para 4,7 e a diminuição dos teores de macronutrientes como Ca e Mg, conforme apontado pela tabela 5, pode ser considerada uma tendência incomum. Geralmente espera-se que o aumento do pH

leve a um aumento dos teores desses nutrientes. É possível que a aplicação inicial de calcário na cova das mudas dos SAFs tenha favorecido a disponibilidade de Ca e Mg no primeiro ano de experimento e que a perda de macronutrientes com o passar dos anos esteja associada à diminuição da ciclagem de nutrientes, maior exportação desses nutrientes e maior susceptibilidade à erosão e lixiviação dos solos nesta área (SUAREZ et al., 2021). O acréscimo constante de material orgânico oriundo de poda, por outro lado, pode estar alimentando a microbiota do solo, que por sua vez, poderia estar imobilizando temporariamente os nutrientes do solo durante o processo de decomposição da matéria orgânica – pelo menos de sua fração lábil, formada por substâncias de baixo peso molecular que se decompõem mais rapidamente, de semanas a meses (PILLON; MIELNICZUK; NETO, 2002). Desta forma, uma fração dos nutrientes (Ca e Mg) pode estar sendo perdida pela lixiviação, e parte pelo sequestro das bases pela microbiota do solo. As coletas de solo foram realizadas durante o período chuvoso, ou seja, sem restrição hídrica, o que pode ter favorecido a plena atividade dos microorganismos do solo, que estariam utilizando os nutrientes disponíveis para decompor a MO. Apesar disso, a aplicação de calcário nas covas das mudas dos SAFs, conforme mencionado previamente, não foi capaz de suprir toda a demanda de Ca e Mg do sistema nem neutralizar a acidez do solo. Geralmente, a diminuição do teor de MO em solos de cultivo se deve, entre outros fatores, à redução da quantidade de resíduos fornecidos pelas plantas na forma de serapilheira, ao aumento da atividade microbiana causada por melhores condições de aeração, temperatura mais elevada e maior amplitude de umedecimento e secagem no solo, que facilitam o processo de degradação da matéria orgânica (SILVA JÚNIOR, 2007). A remoção da cobertura vegetal que antecedeu à implantação do SAF no local possivelmente alterou a ciclagem dos nutrientes (diminuição da produção de serapilheira) e a taxa de infiltração da água no solo, aumentando as taxas de lixiviação, o que leva a uma redução das bases e aumento de m%.

3.4.2. Sobrevivência das espécies

Segundo Salomão, Brienza Júnior e Rosa (2014), taxas de mortalidade de 10 a 20% são comuns em projetos de revegetação, sendo, portanto, consideradas aceitáveis. Em um experimento de reflorestamento em áreas de restauração após mineração em Porto Trombetas, PA, Salomão, Brienza Júnior e Rosa (2014)

avaliaram a mortalidade de 89 espécies florestais por treze anos consecutivos. Uma taxa de mortalidade abaixo de 18,7% foi considerada muito baixa em relação à média geral dos indivíduos avaliados. Neste estudo, os autores relataram uma taxa de mortalidade de 25% para a bacaba (*Oenocarpus bacaba*) e 100% para a goiaba (*P. guavaja*) e açaí (*E. oleracea*), provavelmente desfavorecidas pelas condições de pleno sol. De acordo com Barigah et al. (1998), as condições de luminosidade mais amenas do presente estudo, devido ao efeito das clareiras onde foram implantados os SAFs de Caxiuanã, podem ajudar a explicar a maior taxa de sobrevivência dessas e outras espécies.

Algumas espécies necessitam de cuidados adicionais para sobreviverem após o plantio (JARDIM; SERRÃO; NEMER, 2007). Schwartz et al. (2013) discutem as possíveis causas ou fatores que podem estar relacionados à mortalidade das espécies, como a falta de adubação ou manejo inadequado, a qualidade das mudas e a idade de plantio das mesmas, o que interfere no desenvolvimento do sistema radicular. No presente estudo, a taxa de 100% de sobrevivência de espécies nativas como *P. acutangulum*, *C. guianensis*, *O. bacaba*, *T. grandiflorum*, assim como da exótica *P. guava* indicam a boa procedência das mudas e adaptação dessas espécies às condições do experimento.

Outro fator associado à mortalidade das plantas diz respeito a variações nas condições microclimáticas, sendo maior a frequência de sobrevivência de certas populações, como as espécies pioneiras, nas áreas que recebem mais luz solar, e de tolerantes onde há mais sombra (D'ARACE, 2019). A maior mortalidade de plântulas geralmente ocorre nos períodos mais secos do ano, estando relacionados, também, à disponibilidade de água (FREITAS et al., 2019). O plantio em áreas de clareira, como neste experimento, em que a insolação é menor e, conseqüentemente, há menor perda de água por evapotranspiração, pode ter favorecido a taxa de sobrevivência das espécies estudadas. Segundo Lunz et al. (2011), em um estudo acerca do desempenho de café (*Coffea arabica*), açaí (*E. oleracea*) e andiroba (*C. guianensis*) em sistema de monocultivo e consorciado, a andiroba durante estiagem severa apresentou 11% de mortalidade em monocultura e 2% em SAF. O açaí em sistemas de monocultura apresentou taxa de mortalidade de 80%, enquanto que no SAF este valor foi de 34%, resultado similar ao do presente estudo.

Souza et al. (2008), avaliando o desempenho de nove espécies florestais amazônicas para uso múltiplo no município de Manaus, em condições bastante semelhantes de clima e solo (mas com adubação), reportaram que *C. guianensis* apresentou sobrevivência de 100% nos três primeiros anos. A andiroba apresenta boa plasticidade fisiológica e estratégia de adaptação de tolerância à seca (DÜNISCH, 2002), conseguindo manter sua capacidade fotossintética mesmo em condições adversas (COSTA; MORAIS, 2013). Além disso, as suas sementes contêm nutrientes em quantidade suficiente para garantir a sobrevivência e o desenvolvimento da espécie nos primeiros anos, fazendo o seu plantio ser recomendado em diversos tipos de ambientes (COSTA AZEVEDO, 2014).

As mudas de *C. glandulosa* plantadas nos sistemas agroflorestais de Caxiuanã apresentaram baixa mortalidade, com índice de sobrevivência de 95%. Segundo Jacobs et al. (2005), existe uma alta correlação entre o tamanho das mudas no momento do plantio e sua sobrevivência no campo, uma vez que parâmetros como o diâmetro e o volume da parte aérea podem ser relacionados à massa de raízes. Este fator pode ajudar a explicar o bom estabelecimento dos indivíduos desta espécie em Caxiuanã. Ademais, a *C. glandulosa* é considerada bastante tolerante à seca, em parte devido a sua capacidade de diminuir ou aumentar rapidamente a produção de fotossíntese, de acordo com a disponibilidade de água no solo (CRAVEN et al., 2010). Segundo esses autores, as plantas de crescimento rápido geralmente possuem folhas mais largas que maximizam a interceptação da luz e aumentam a assimilação de carbono em condições favoráveis de umidade no solo, reduzindo seu metabolismo na ausência de água. Quando comparada àquela obtida por outros autores, a taxa de sobrevivência de *C. glandulosa* verificada no presente estudo pode ser considerada bastante satisfatória. Gama et al. (2013), por exemplo, em um experimento realizado com a espécie no Estado de Rondônia, em condições climáticas similares, relatou uma taxa de mortalidade de 15%, enquanto que em outro estudo com a espécie no bioma da Mata Atlântica esta taxa foi de 40%, mesmo com adubação de plantio e cobertura (MORAIS JUNIOR et al. 2019).

Resultados semelhantes foram verificados para o acapu (*V. americana*), cujas altas taxas de sobrevivência podem estar relacionadas às condições de luminosidade das clareiras onde foram implantados os SAFs, consideradas ideais

para a cultura. Para Jardim, Serrão e Nemer (2007), a reserva de nutrientes dos cotilédones das sementes da espécie também é um fator importante que confere maiores chances de sobrevivência nos primeiros meses após o plantio. Em amostragens de áreas de plantio de recuperação de área degradada por mineração, avaliadas em Paragominas, PA, a mortalidade dos indivíduos de *V. americana* chegou a 33% (MARTINS, 2020). A taxa de radiação solar em ambientes a pleno sol não favorece o crescimento da espécie, sendo esperada uma alta mortalidade na fase inicial de desenvolvimento, quando a radiação atinge valores acima do tolerável pela planta (SANTOS; JARDIM, 2012). Em um estudo de regeneração natural de *V. americana*, Santos e Jardim (2012) reportaram uma alta taxa de mortalidade e baixo ingresso natural, sendo comum a morte das mudas tanto a pleno sol quanto no interior da mata, ou seja, em condições extremas tanto de luz como de sombra.

Em relação a *C. papaya* e *M. paradisiaca*, um fator que pode ter contribuído para a alta taxa de mortalidade das espécies é a condição de baixa fertilidade dos solos estudados, conforme apresentado. A alta mortalidade das plantas, exatamente no período em que deveriam estar em plena fase de frutificação, pode ser considerada um indicativo de que a disponibilidade de nutrientes do solo esteve abaixo das necessidades dessas culturas. Essas espécies podem ter apresentado maior dificuldade de sobreviver ao período menos chuvoso do ano por estarem mais debilitadas nutricionalmente do que as demais, provavelmente com um sistema radicular menos desenvolvido do que o esperado.

3.4.3. Crescimento das espécies

De acordo com Tonini, Arco-Verde e Sá (2005), uma espécie de plantio florestal com crescimento em diâmetro maior que 10 mm/ano pode ser considerada com um incremento melhor do que as espécies em regeneração natural. Os valores de incremento anual encontrados para as espécies florestais nos SAFs de Caxiuanã estão próximos aos resultados de outros experimentos avaliados no estado do Pará. Em um plantio adubado de reflorestamento em áreas de restauração após mineração em Porto Trombetas, PA, Salomão, Brienza Júnior e Rosa (2014) avaliaram a dinâmica de crescimento de 69 espécies florestais por treze anos consecutivos. Para efeito de comparação, o IMAD médio das espécies calculado pelos autores foi de 4,8 (\pm 4,1) mm/ano, enquanto o IMAH médio, 37 (\pm 31) cm/ano,

ambos menores do que no presente estudo (tabela 7). De acordo com os estes autores, um IPAH superior a 68 cm ao ano, como a o de *C. glandulosa* em Caxiuanã ($197,2 \pm 17,5$), pode ser considerado muito alto, enquanto considera-se como de muito baixo crescimento espécies cujos incrementos apresentaram valores inferiores a 6 cm/ano. Em diâmetro, um crescimento menor que 0,7 mm/ano foi considerado muito baixo. Nos SAFs de Caxiuanã, todas as espécies apresentaram IMAH maiores que 12 cm/ano e o menor IMAD foi de 1,6 mm/ano, para *P. guajava*. *Oenocarpus bacaba*, por exemplo, apresentou maiores valores de IMAD no presente estudo (8,7 mm/ano) e IMAH (39,6 cm/ano) quando comparados aos de Porto Trombetas (5,6 mm e 20 cm, respectivamente). O desempenho bastante satisfatório desta espécie em projetos de restauração florestal em áreas degradadas na Amazônia fez com que fosse eleita a melhor espécie-chave entre as 25 estudadas por Salomão, Santana e Brienza Júnior (2013) para este fim, tendo sido apontada como de alta prioridade para garantir o sucesso de projetos de reflorestamento na região.

De maneira geral, os incrementos em diâmetro e altura das espécies frutíferas dos SAFs de Caxiuanã apresentaram valores menores que das espécies florestais, e, em muitos casos, abaixo do esperado. *T. grandiflorum* talvez seja uma exceção, uma vez que a espécie apresenta crescimento naturalmente mais lento (LEÃO et al., 2005). Segundo Hérault et al. (2010), é normal que as taxas de crescimento das plantas variem com o tamanho das árvores, sendo esperado que algumas espécies apresentem maior crescimento quando jovens e menor crescimento quando adultos, enquanto outras apresentem comportamento oposto. A diversidade de espécies utilizadas nos SAFs de Caxiuanã, que incluiu indivíduos de diversos grupos ecológicos e diferentes famílias botânicas, com estruturas anatômicas distintas entre elas, ajuda a explicar as diferenças observadas nas taxas de crescimento entre plantas. As espécies, dependendo do grupo funcional a que pertençam, apresentam velocidade de crescimento mais lenta ou mais rápida que as demais (CRAVEN et al., 2010; IMAÑA-ENCINAS; SILVA; PINTO, 2005). Espécies tolerantes à sombra geralmente apresentam sementes grandes para estabelecerem-se com sucesso, como *V. americana*, mas possuem baixas taxas de crescimento inerentes (HERAULT et al., 2010). Por outro lado, plantas de crescimento rápido, como *C. glandulosa*, desenvolvem-se mais rapidamente do que espécies do grupo das secundárias ou clímax. Em um estudo comparativo de taxas de crescimento entre

castanha do Brasil e andiroba, por exemplo, verificou-se que a andiroba cresce mais rapidamente devido a maior taxa fotossintética da espécie, maior produção de folhas e área foliar específica, apresentando maior eficiência no uso de nitrogênio do que a castanheira (COSTA AZEVEDO, 2014).

A fertilidade dos solos é um fator de grande interferência no crescimento das espécies (PARK et al., 2010). Messias e Paulilo (2012) relacionaram um menor crescimento de mudas de *C. glandulosa* em solo de floresta do que em viveiro à maior quantidade de alumínio e elevada acidez desses solos. Em condições favoráveis para o desenvolvimento das plantas, há uma tendência de as raízes das plantas se concentrarem na superfície do solo, o que ajuda a absorver os nutrientes de maneira mais eficiente (WU et al., 2017). Como consequência dessa concentração de raízes, nos períodos mais secos do ano, as plantas podem passar por estresse hídrico, o que afeta o seu crescimento (LOPES; GUIMARÃES GUILHERME, 2016). Se por um lado o estresse hídrico pode estimular o crescimento de raízes em profundidade, a toxidez causada por alumínio pode inibir o crescimento tanto do sistema radicular como da parte aérea das plantas (RAIJ, 2008). Esta situação é especialmente prejudicial para as plantas nas condições de solos tropicais, em que os nutrientes são altamente susceptíveis à lixiviação (QUESADA et al., 2010; RONQUIM, 2020). Estes fatores ajudam a explicar porque, de modo geral, as espécies florestais dos SAFs de Caxiuanã apresentaram melhor crescimento que as frutíferas. As condições limitantes de fertilidade dos solos provavelmente estão comprometendo mais o desenvolvimento radicular das espécies frutíferas do que das florestais, evidenciando o efeito negativo que a toxicidade de Al, aliada à deficiência de Ca e outros nutrientes, podem causar às plantas cultivadas.

As espécies *O. bacaba* e *E. oleracea* apresentaram tendência de crescimento regular, ainda que esta última tenha apresentado um período de certa estagnação entre os dois primeiros anos de estudo, provavelmente devido a estresse hídrico. A espécie prefere áreas úmidas (SHANLEY; MEDINA, 2005) e pode ter enfrentado um período de dificuldade durante os primeiros anos, na fase de estabelecimento no local, quando seu sistema radicular ainda não estava bem desenvolvido. A espécie *M. paradisiaca*, por outro lado, apesar do bom crescimento no primeiro ano, passou por um período de estagnação no ano seguinte, quando já deveria ter entrado em

frutificação (EMBRAPA, 2016). A bananeira é uma cultura exigente em nutrientes, especialmente Mg e K, sendo recomendado o uso de calcário dolomítico em solos com teores de Mg abaixo de $0,5 \text{ cmol/dm}^3$, e aplicação de fertilizantes à base de potássio durante a fase de formação (CRAVO; VIÉGAS; BRASIL, 2020). Segundo estes autores, a saturação por alumínio (m%) desejada é de 10%. A alta taxa de mortalidade dos indivíduos da espécie nos SAFs de Caxiuanã a partir do segundo ano devido à deficiência mineral inviabilizou o acompanhamento do seu crescimento nos anos seguintes, tendo alcançado valores médios de altura próximos de 1,6m nesta idade, enquanto o seu potencial de crescimento é de 3 a 3,5 m (EMBRAPA, 2016).

A andiroba (*C. guianensis*) é uma espécie de crescimento rápido que tolera sombra nas etapas iniciais do plantio, e apresenta demanda crescente por luminosidade, aumentando o seu crescimento com a abertura no dossel na floresta (COSTA; MORAIS, 2013). Barigah et al. (1998) relatou uma altura média de 1,5m para a espécie aos 24 meses de idade, resultados semelhantes aos encontrados nos SAFs de Caxiuanã, de 1,7m. A espécie apresentou a maior taxa de crescimento entre as dez avaliadas pelos autores em experimento em plantios em estufas na Guiana Francesa, sem uso de fertilizante. Por outro lado, neste mesmo estudo, *V. americana* atingiu apenas 0,4m de altura aos dois anos, contra 1m do presente estudo.

Em um estudo de reflorestamento com *C. glandulosa* na Amazônia, Gama et al. (2013) relataram que a maioria dos indivíduos da espécie atingiu mais de 3m de altura aos 24 meses de idade. Resultados similares foram encontrados por Craven et al. (2010), estudando a influência da sazonalidade sob o crescimento da espécie: plantas com dois anos de idade alcançaram, em média, 3 e 4 m de altura, em regiões de menor (1392 mm) e maior (2220 mm) precipitação anual, respectivamente. Os resultados de ambos os trabalhos, em que foram feitas adubações e correção da acidez do solo, são bastante próximos aos encontrados no presente estudo (4m de altura), evidenciando o bom desempenho de *C. glandulosa* nos SAFs de Caxiuanã, mesmo sem o uso de insumos. Esta alta taxa de crescimento pode estar relacionada ao fato de que a *C. glandulosa* não é uma espécie exigente em termos de fertilidade do solo (MELO JUNIOR et al., 2018).

As espécies do gênero *Psidium* foram as que apresentaram as menores alturas dentre todas as avaliadas. Ambas as espécies diminuíram o ritmo de crescimento no último ano, crescendo muito pouco do segundo para o terceiro ano. Não foram encontrados na literatura dados referentes ao crescimento destas espécies no bioma amazônico. Todavia, os resultados de crescimento avaliados podem ser considerados insatisfatórios, uma vez que no terceiro ano de cultivo a goiabeira já deveria entrar em produção, com uma produtividade média esperada de aproximadamente 15 t de frutos por hectare (BARBOSA; LIMA, 2010). O desenvolvimento abaixo do esperado dessas culturas pode estar relacionado às condições de baixa fertilidade dos solos estudados, conforme mencionado. De acordo com Barbosa e Lima (2010), a goiabeira, apesar de ser uma planta pouco exigente em fertilidade do solo, podendo desenvolver-se em solos com pH de 4,5 a 8,0, apresenta uma faixa ótima de desenvolvimento entre 5,0 e 6,5. A cultura adapta-se a vários tipos de solo, mas prefere os areno-argilosos profundos, bem drenados e ricos em matéria orgânica (BARBOSA; LIMA, 2010). A saturação por bases (V) ideal indicada para a cultura é de 70%, muito longe das condições experimentais, sendo recomendada adubação de plantio de P_2O_5 em solos com teor de P menor que 6 mg/dm^3 , como é o caso (CRAVO; VIÉGAS; BRASIL, 2020). Segundo estes autores, a partir do segundo ano deve-se realizar adubação de produção para viabilizar a frutificação da espécie no Estado do Pará, quando o fornecimento de micronutrientes, principalmente boro (B) e zinco (Zn) é crucial para a cultura. Segundo Raji (2008), as condições limitantes de fertilidade dos solos com as dos SAFs de Caxiuanã, que apresentam teores de Ca menores que $0,2 \text{ cmol}_c/\text{dm}^3$ e saturação por alumínio acima de 80%, podem comprometer o desenvolvimento radicular das plantas cultivadas.

Dentre as espécies do gênero *Theobroma*, a que apresentou o menor crescimento foi *T. subincanum*, que aos três anos de idade atingiu 68 cm de altura, em média. As demais espécies, *T. cacao* e *T. grandiflorum* obtiveram crescimento em altura um pouco maior, de 94 cm e 98 cm, em média, respectivamente. As espécies *T. subincanum* e *T. cacao*, semelhantemente ao demonstrado pelas espécies do gênero *Psidium*, apresentaram maior crescimento no primeiro ano de estudo, enquanto *T. grandiflorum* não apresentou diferença na taxa de crescimento entre os anos avaliados, sugerindo estar mais adaptado às condições experimentais

do que as demais espécies do gênero. A cultura do cacau, por exemplo, é bastante exigente quanto à correção do pH do solo. Recomenda-se a aplicação de 200 a 300g de calcário dolomítico (PRNT 100%) na cova para cada tonelada de calcário calculada para a área (CRAVO; VIÉGAS; BRASIL, 2020). Segundo estes autores, é importante garantir adubações de P e K durante os três primeiros anos, sendo indicada a aplicação de 90g de P_2O_5 e 60g de K_2O por planta. Também é preciso fornecer N, S e B nas quantidades calculadas a partir da análise de solo. Para o cupuaçu, a porcentagem de saturação por bases desejada é de 50%, sendo também recomendada a adição de fertilizantes ricos em K, P e N (CRAVO; VIÉGAS; BRASIL, 2020).

3.4.4. Avaliação do arranjo utilizado (proposição de índice de aptidão)

De acordo com a classificação proposta no presente estudo (tabela 10), as espécies *C. glandulosa*, *O. bacaba*, e *C. guianensis* foram consideradas, nesta ordem, muito recomendadas para uso em SAFs na região estudada, uma vez que apresentaram uma alta taxa de sobrevivência em campo, bom potencial de produção de biomassa e crescimento satisfatório, dentro dos parâmetros esperados para cada espécie. *V. americana*, *T. grandiflorum*, *P. acutangulum*, *E. oleracea*, *P. guajava* e *T. subincanum* são recomendadas devido a sua alta taxa de sobrevivência em campo, em geral, apesar do baixo potencial de produção de biomassa e crescimento considerado abaixo do esperado, provavelmente devido a restrições impostas pela baixa fertilidade do solo. *Musa paradisiaca*, *T. cacao* e *C. papaya*, por outro lado, são as espécies menos recomendadas ou recomendadas com ressalvas. Neste caso, esta classificação indica que as espécies podem ser utilizadas, desde que implantadas num segundo momento ou com adição considerável de corretivos agrícolas e fertilizantes, porque apresentaram altos índices de mortalidade e crescimento insatisfatório nas condições estudadas. Desta maneira, é importante avaliar o momento ideal de plantio dessas espécies, que deverá ocorrer apenas após a estabilização de espécies-chave que permitam maior equilíbrio das condições microclimáticas e nutricionais do sistema. Esta abordagem silvicultural em duas etapas (ou dois passos), como sugerido por Morais Junior et al. (2019), ajudaria a melhorar o desempenho do sistema e a taxa de sobrevivência e crescimento das mudas, especialmente de espécies não pioneiras ou mais exigentes em nutrientes. Num primeiro momento, recomenda-se utilizar espécies

adaptadas às condições locais (baixa fertilidade, “pleno” sol) e a segunda etapa consistiria de um plantio de enriquecimento com espécies não pioneiras ou mais exigentes em fertilidade. Sousa et al. (2009), por exemplo, estudaram um SAF com *Theobroma grandiflorum*, entre outras espécies, com manejo de pouco insumo e sem adubação. Após o terceiro ano foi introduzido *Euterpe oleracea* e após quatro anos, *Colubrina glandulosa* e *Carapa guianensis*. Segundo esses autores, a adoção de técnicas de manejo que objetivam manter a cobertura do solo e aumentar o aporte de resíduos vegetais no sistema pode ser uma estratégia para manter a fertilidade dos solos e melhorar a produtividade agrícola na região Amazônica.

Götsch (1996) relata que bananeiras também não se estabeleceram em solos com baixa fertilidade em suas experimentações práticas com agricultura sintrópica no sul da Bahia. Segundo este autor, existe um momento ideal de introdução para cada espécie no processo de implantação agroflorestal, que deve imitar a sucessão natural e levar em consideração o grupo ecológico das mesmas. O conceito de agrofloresta sucessional, em contraponto a SAFs estáticos, está baseado na rotação de culturas e na sucessão de espécies com o passar do tempo, de maneira que o sistema produtivo seja desenhado a partir de estratégias que facilitem o seu manejo (PAIVA et al., 2021).

Os nutrientes nos solos tropicais estão vulneráveis à perda se não forem tomadas medidas de manutenção e manejo da matéria orgânica para trabalhar/construir a fertilidade destes solos (FALESI, 1976; MELO et al., 2006; MOREIRA et al., 2009). Por essas razões, adotar o plantio em duas etapas pode ser uma boa estratégia para garantir a produtividade agrícola na Amazônia. A alta mortalidade das bananeiras e mamoeiros nos SAFs de Caxiuana, assim como o desenvolvimento insatisfatório das frutíferas banana, mamão, araçá, goiaba, cacau e cupuaçu são indícios de que as culturas mais exigentes em fertilidade deveriam ser implantadas algum tempo depois da estabilização deste sistema. Um exemplo desta estratégia são os SAFs de Cacau do Mosaico de Áreas Protegidas do Extremo Sul da Bahia (MAPES), que foram implantados em áreas degradadas onde o componente arbóreo é o primeiro a ser introduzido. Nesses sistemas (SAF cacau cabruca), o cacauzeiro apenas é introduzido após o estabelecimento do dossel e oferta de sombra pelas árvores (PAIVA et al., 2021). Os autores discutem o conceito de manejo dinâmico, em que podas para alimentar a ciclagem de nutrientes e

controlar a disponibilidade de luz são realizadas com frequência, dependendo das necessidades das culturas e seus estágios de desenvolvimento.

A partir do índice proposto, que aponta alta taxa de mortalidade para as culturas da banana e mamão, pode-se evidenciar que pequenas áreas degradadas, dentro da floresta, não são recomendadas para uso dessas espécies – pelo menos não antes de se haver corrigido as deficiências minerais do solo. Os baixos valores de V% encontrados no presente estudo podem ter sido uma das principais causas para o baixo desenvolvimento das plantas, inclusive para a alta taxa de mortalidade dessas espécies. Em experimentos conduzidos na região pelo autor (dados não publicados), verificou-se que espécies mais indicadas para plantio em SAFs num primeiro momento nestas áreas estão as frutíferas nativas *Inga sp.* (ingá), *Annona mucosa* (biribá) e *Spondias monbin* (taperebá), as florestais *Hevea brasiliensis* (seringueira), *Virola surinamensis* (virola) e *Caryocar glabrum* (piquiarana), e as exóticas *Syzygium malaccense* (jambo vermelho), *Acacia mangium* e *Eucalyptus sp.* O plantio de espécies de adubo verde como *Arachis pintoii* (amendoim forrageiro) e *Mucuna pruriens* (mucuna) também é indicado, assim como culturas pouco exigentes em fertilidade como *Ananas sp.* (abacaxi) e *Manihot esculenta* (macaxeira). À medida que o sistema evolui, recomenda-se a poda das espécies de crescimento rápido como fonte de nutrientes e controle da incidência de luz solar no sistema. A implantação de SAFs em duas etapas também pode ser indicado em áreas de corte e queima, uma vez que os efeitos benéficos de liberação das cinzas pela queima são temporários e passageiros (NUMATA et al., 2007). Diante destas constatações, a produção agroflorestal sem queima e sem adição de fertilizantes apresenta-se como promissora para promover o desenvolvimento rural sustentável na região.

3.5 CONCLUSÕES

A avaliação do arranjo das espécies utilizadas nos sistemas agroflorestais de Caxiuana revelou que espécies como *C. glandulosa*, *C. guianensis* e *O. bacaba* são fortemente recomendadas para plantio em áreas de clareiras, ao passo que espécies frutíferas como *M. paradisiaca*, *C. papaya* e as do gênero *Theobroma* e *Psidium* devem ser inseridas no sistema somente após a melhoria da fertilidade do

solo. A implantação de SAFs na região deverá, portanto, ocorrer em duas etapas, introduzindo-se inicialmente espécies florestais tolerantes às condições naturais de elevada acidez e baixa fertilidade dos solos amazônicos, antes de se introduzirem culturas mais exigentes em termos nutricionais, como as frutíferas. As práticas de manejo adotadas também deverão ser observadas, tomando-se o cuidado de promover a manutenção da cobertura no solo para evitar a lixiviação de nutrientes como cálcio e magnésio. O plantio de *V. americana* sem adubação mostrou-se uma estratégia viável de conservação da espécie, atualmente em estado de vulnerabilidade, apresentando baixa taxa de mortalidade e crescimento satisfatório nas condições estudadas.

REFERÊNCIAS

- BACCA-ACOSTA, P. P. et al. Growth potential of *Carapa guianensis* (Aubl.) in Tumaco, Colombia. **Revista Chapingo Serie Ciencias Forestales y del Ambiente**, v. 27, n. 3, p. 401–412, 2021.
- BALIGAR, V. C. et al. Light Intensity Effects on Growth and Nutrient-use Efficiency of Tropical Legume Cover Crops. *In*: JOSE, S.; GORDON, A. M. (eds.). **Toward Agroforestry Design: An Ecological Approach**. Springer, 2008. 308 p.
- BARBOSA, F. R.; LIMA, M. F. (eds.). **A cultura da goiaba** (Coleção Plantar, 66). 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. 180 p.
- BARIGAH, T. S.; IMBERT, P.; HUC, R. Croissance et assimilation nette foliaire de jeunes plants de dix arbres de la forêt guyanaise, cultivés à cinq niveaux d'éclaircissement. **Ann. Sci. For**, v. 55, p. 681-706, 1998.
- BERNARDES, M. S.; PINTO, L. F. G.; RIGHI, C. A. Interações biofísicas em sistemas agroflorestais. *In*: **A Alternativa agroflorestal na Amazônia em transformação**, 2009. p. 423-446. cap. 4.
- BOUYOUCOS, G. J. The hydrometer as a new method for the mechanical analysis of soils. **Soil Sci.**, v. 23, p. 343–354, 1927.
- BRAGA, D. P. P.; DOMENE, F.; GANDARA, F. B. Shade trees composition and diversity in cacao agroforestry systems of southern Para, Brazilian Amazon. **Agroforest Systems**, v. 93, p. 1409–1421, 2019.
- BRIENZA JUNIOR, S. et al. Sistemas Agroflorestais na Amazônia Brasileira: Análise de 25 Anos de Pesquisas. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, n. 60, p. 67-76, dez. 2009.
- BUOL, S. W. et al. Soil fertility capability classification: a technical soil classification for fertility management. *In*: BORNEMISZA, E., ALVARADO, A. (eds.) **Soil Management in Tropical America**. Raleigh: North Carolina State University, 1975. p. 25–45.

- BURT, A. et al. New insights into large tropical tree mass and structure from direct harvest and terrestrial lidar. **R. Soc. Open Sci.**, v. 8, 2021.
- BUTZKE, A. G. et al. Fertilidade e carbono orgânico do solo em sistemas agroflorestais de duas décadas compostos de castanheira, cupuaçuzeiro e pupunheira na Amazônia Ocidental. **Científica**, v. 48, n. 2, p.160–169, 2020.
- CALDEIRA, M. V. W. et al. Litter as an ecological indicator of forest restoration processes in a dense ombrophylous lowland forest. **Floresta e Ambiente**, v. 26, p. 1–11, 2019.
- CHAVES, S. F. da S. et al. Evaluation of physicochemical attributes of a yellow latosol under agroforestry system as compared to secondary forest in the Eastern Amazon. **Agroforest Systems**, v. 94, p. 1903–1912, 2020.
- COELHO, G. C. Ecosystem services in brazilian's southern agroforestry systems. **Tropical and Subtropical Agroecosystems**, v. 20, p. 475–492, 2017.
- COSTA, J. R.; MORAIS, R. R. **Carapa Guianensis Aubl. (andirobeira) em Sistemas Agroflorestais**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2013. 32 p. Documentos n. 112
- COSTA AZEVEDO, G. F. Photosynthetic parameters and growth in seedlings of *Bertholletia excelsa* and *Carapa guianensis* in response to pre-acclimation to full sunlight and mild water stress. **Acta Amazonica**, v. 44, n. 1, p. 67–78, 2014.
- CRAVEN, D. et al. Seasonal variability of photosynthetic characteristics influences growth of eight tropical tree species at two sites with contrasting precipitation in Panama. **Forest Ecology and Management**, v. 261, p. 1643–1653, 2010.
- CRAVO, M. S.; VIÉGAS, I. J. M; BRASIL, E. C. (eds). **Recomendações de calagem e adubação para o estado do Pará**. 2. ed. Brasília: Embrapa, 2020.
- D'ARACE, L. M. B. **Regeneração natural em clareiras após a colheita florestal na Amazônia oriental**. Orientador: Ademir Roberto Ruschel. 2019. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2019.
- DE MORAES SÁ, J. C. et al. Soil-specific inventories of landscape carbon and nitrogen stocks under no-till and native vegetation to estimate carbon offset in a subtropical ecosystem. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 77, n. 6, 2013.
- DINIZ, A. R. et al. Biomassa, estoque de carbono e de nutrientes em estádios sucessionais da Floresta Atlântica, RJ. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 10, n. 3, p. 443-451, 2015.
- DÜNISCH, O. et al. Light, water, and nutrient demand for the growth of three high quality timber species (Meliaceae) of the Amazon. **Journal of Applied Botany**, v. 76, p. 29-40, 2002.
- EFFGEN, E. M. et al. Atributos químicos de um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico sob cultivo de eucalipto e pastagem no sul do Espírito Santo. **Scientia Forestalis**, v. 40, n. 95, p. 375-381, 2012.
- EMBRAPA. **BRS Pacoua, nova cultivar de bananeira do tipo pacovan**. Brasília: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2016. Folheto técnico

_____. **Murcha abiótica da bananeira**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 1998. Folheto 7489

FALESI, I. **Ecosistema de pastagem cultivada na Amazônia brasileira**. Belém: EMBRAPA-CPATU, 1976. 193 p. Boletim Técnico 1

FEARNSIDE, P. M.; LEAL FILHO, N. **Solo e desenvolvimento na Amazônia**: lições do projeto dinâmica biológica de fragmentos florestais. Manaus: INPA, 2002.

FRARE, J. C. V.; OLIVEIRA, I. A.; FREITAS, L. Potencial agroecológico da agricultura familiar de comunidades ribeirinhas agroextrativistas do Marajó, Amazônia oriental. *Unimar Ciências*, v. 26, n. (1-2), p. 41-53, 2017.

FREITAS, L. J. M. et al. **Silvicultura em clareiras**: estratégia de conservação in situ de *Euxylophora paraensis* (pau-amarelo) no Nordeste Paraense. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2019.

GAMA, M. M. B. et al. Reforestation feasibility in area formerly used for cattle raising in the state of Rondônia, northwest Brazilian Amazon. **Revista Árvore**, v. 37, n. 6, p.1001-1010, 2013.

GAMA-RODRIGUES, A. C. et al. Cacao-based agroforestry systems in the Atlantic Forest and Amazon Biomes: An ecoregional analysis of land use. **Agricultural Systems**, v. 194, 2021.

GÖTSCH, E. **O renascer da agricultura**. 2. ed. São Paulo, Assessoria e Serviços a Projetos em Agricultura Alternativa (AS-PTA), 1996. Tradução: Patrícia Vaz.

GROPPO J. D. et al. Changes in soil carbon, nitrogen, and phosphorus due to land-use changes in Brazil. **Biogeosciences**, v. 12, n. 15, p. 4765–4780, 2015.

GUEDES, R. et al. Adsorption and risk of phosphorus loss in soils in Amazonia. **Journal of Soils and Sediments**, v. 18, p. 917–928, 2018.

HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. **PAST**: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis, 2001. Disponível em: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm.

HERAULT, B. et al. Functional traits shape ontogenetic growth trajectories of rain forest tree species. **Journal of Ecology**, v. 99, p. 1431–1440, 2011.

HERAULT, B. et al. Growth responses of neotropical trees to logging gaps. **Journal of Applied Ecology**, v. 47, p. 821–831, 2010.

HOLSTE, E. K.; KOBE, R. K.; VRIESENDORP, C. F. Seedling growth responses to soil resources in the understory of a wet tropical forest. **Ecology**, v. 92, p. 1828-1838, 2011.

ICMBio (Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade). **Plano de Manejo da Floresta Nacional de Caxiuanã**: Volume I – Diagnóstico. Brasília: ICMBio, 2012.

IDEFLOR-Bio (Instituto de Desenvolvimento Florestal e da Biodiversidade do Estado do Pará). **Cartilha de sistemas agroflorestais comerciais**: estratégia produtiva sustentável para a agricultura familiar. Belém, Diretoria de Desenvolvimento de Cadeias Florestais (DDF), 2021.

- IMANÃ-ENCINAS, J.; SILVA, G. F.; PINTO, J. R. R. **Idade e crescimento das árvores**. Brasília: Universidade de Brasília. Departamento de Engenharia Florestal, 2005. 43 p.
- JACOBS, D. F.; SALIFU, K. S.; SEIRFERT, J. R. Relative contribution of initial root and shoot morphology in predicting field performance of hardwood seedlings. **New Forests**, v. 302-303, p. 235-251, 2005.
- JARDIM, F. C. S.; SERRÃO, D. R.; NEMER, T. C. Efeito de diferentes tamanhos de clareiras sobre o crescimento e a mortalidade de espécies arbóreas em Moju - PA. **Acta Amazônica**, v. 37, p. 37–38, 2007.
- LEÃO, N. V. M. et al. **Ilha de germoplasma de Tucuruí: uma reserva da biodiversidade para o futuro**. Brasília: Eletronorte, 2005. 232 p.
- LIMA, M. M. **Crescimento, composição mineral e sintomas de deficiência de macronutrientes em plantas de cupuaçuzeiro (*Theobroma grandiflorum*)**. Orientador: Dilson Augusto Capucho Frazão. 2002. 77 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural Da Amazônia. Belém, 2002.
- LONGO, R. M., ESPÍNDOLA, C. R. Alterações em características químicas de solo da região amazônica pela introdução de pastagens. **Acta Amazônica**, v. 30, n. 1, p. 71-80, 2000.
- LOPES, A. S.; GUIMARÃES GUILHERME, L. R. A Career Perspective on Soil Management in the Cerrado Region of Brazil. **Advances in Agronomy**, ISSN 0065-2113, 2016.
- LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 3. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2016. 384 p.
- LUIZÃO, F. J. et al. The maintenance of soil fertility in Amazonian managed systems. *In*: KELLER, M. et al. (eds.) Amazonia and Global Change. Geophysical Monograph Series. **American Geophysical Union (AGU)**, v. 186, p. 311-336, 2009.
- LUNZ, A. M. P. et al. Avaliação do cafeeiro em monocultivo e em sistema agroflorestal com açaí e andiroba. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS, 8., 2011, Belém. **Anais** [...]. Belém: SBSAF, Embrapa Amazônia Oriental, UFRA, CEPLAC, EMATER, ICRAF, 2011. 1 CD-ROM.
- MACHADO, M. R. et al. Land cover changes affect soil chemical attributes in the Brazilian Amazon. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 39, n. 3, p. 385-391, 2017.
- MAIA, R. S.; VASCONCELOS, S. S.; CARVALHO, J. R. de. Frações de fósforo e simbiose micorrízica em floresta secundária em resposta a disponibilidade de água e nutrientes na Amazônia oriental. **Acta Amazonica**, v. 45, n. 3, p. 255-264, 2015.
- MALHI, Y. et al. Comprehensive assessment of carbon productivity, allocation and storage in three Amazonian forests. **Global Change Biology**, v. 15, p. 1255–1274, 2009.
- MARTINS, W. B. R. **Restauração de ecossistemas degradados pela mineração na Amazônia Oriental**. Orientador: Francisco de Assis Oliveira. 2020. 140 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) - Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2020.
- MARTINS, W. B. R. et al. Survival, growth and regeneration of forest species in mining areas in the Eastern Amazonia. **Scientia Plena**, v. 16, n. 6, 2020.

MEIR, P. et al. Short-term effects of drought on tropical forest do not fully predict impacts of repeated or long-term drought: gas exchange versus growth. **Phil. Trans. R. Soc. B**, v. 373, 2018.

MELO, V. F. et al. Physical chemical and mineralogical characteristics of soils from the agricultural colony of Apiaú (Roraima, Amazonia), under different land uses and after burning. **R. Bras. Ci. Solo.**, v. 30, p. 1039–1050, 2006.

MESSIAS, R.; PAULILO, M. T. S. Crescimento inicial de *Colubrina glandulosa* Perkins var. reitzii (M.C. Johnston) M.C. Johnston em campo e viveiro sob diferentes intensidades de luz. **INSULA Revista de Botânica**, v. 41, p. 73-82, 2012.

MORAIS JUNIOR, V. T. M. de M. et al. Early assessment of tree species with potential for carbon offset plantations in degraded area from the southeastern Brazil. **Ecological Indicators**, v. 98, p. 854–860, 2019.

MOREAU, J. S. **Serapilheira e aporte de nutrientes em cronossequência de áreas em restauração ecológica**. Orientador: Marcos Vinicius Winckler Caldeira. 2021. 66 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2021.

MOREIRA, A; MALAVOLTA, E. Dinâmica da matéria orgânica e da biomassa microbiana em solo submetido a diferentes sistemas de manejo na Amazônia Ocidental. **Pesq. agropec. bras.**, v. 39, n. 11, p. 1103-1110, 2004.

MOREIRA, F. M. S. et al. Differentiation in the fertility of Inceptisols as related to land use in the upper Solimões river region, western Amazon. **Science of the Total Environment**, v. 408, p. 349–355, 2009.

NAIR, P. K. R.; KUMAR, B. M.; NAIR, V. D. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. **J. Plant. Nutr. Soil. Sci.**, v. 172, n. 1, p. 10–23, 2009.

NAKAYAMA, L. H. I. et al. Influência da nutrição mineral na ocorrência da vassoura-de-bruxa (*Crinipellis pernicioso* (STAHEL) Singer) em cacauero. L: Sintomas visuais de deficiência de nutrientes e da doença e observações estruturais. **Agrotrópica**, v. 10, n. 2, p. 79-86, 1998.

NIETHER, W. et al. Shade trees and tree pruning alter throughfall and microclimate in cocoa (*Theobroma cacao* L.) production systems. **Annals of Forest Science**, v. 75, 2018.

NUMATA, I. et al. Temporal nutrient variation in soil and vegetation of post-forest pastures as a function of soil order, pasture age, and management, Rondônia, Brazil. **Agric Ecosyst Environ.**, v. 118, p. 159–172, 2007.

OLIVEIRA, L. L. **Avaliação da interceptação da precipitação pela vegetação na floresta nacional de Caxiuanã, Pará**. Orientador: Francisco de Assis Salviano de Sousa. 2007. 123 f. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, 2007.

PAIVA, A. L. X. P. et al. **Guia de agrofloresta na Mata Atlântica: experiências em mosaicos de unidade de conservação**. São Paulo: Agroicone, 2021. 49 p.

PARK, A. et al. Local and regional environmental variation influences the growth of tropical trees in selection trials in the Republic of Panama. **Forest Ecology and Management**, v. 260, p. 12–21, 2010.

- PEREIRA, D. N. et al. Influência da remoção de serapilheira no teor de fósforo e potássio na Amazônia Oriental. **Rev. Bras. Ciências Agrárias**, v. 12, p. 380–385, 2017.
- PILLON, C. N.; MIELNICZUK, J.; NETO, L. M. **Dinâmica da matéria orgânica no ambiente**. Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2002. 41 p. Documentos n. 105
- PRIMAVESI, A. **Manejo ecológico do solo: a agricultura em regiões tropicais**. 18. ed. São Paulo: Nobel, 2006. 549 p.
- QUESADA, C. A. et al. Variations in chemical and physical properties of Amazon forest soils in relation to their genesis. **Biogeosciences**, v. 7, p. 1515–1541, 2010.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing, 2022. URL <http://www.R-project.org>.
- RAIJ, B. van. **Gesso na Agricultura**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2008. 233 p.
- RAIJ, B. van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres, Potafos, 1991. 343 p.
- REED, S. et al. Phosphorus cycling in tropical forests growing on highly weathered soils. **Soil Biol.**, v. 26, p. 295–316, 2011.
- RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T.; VENEGAS, V. H. A. (eds.) **Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais, 1999. 322 p.
- RIGHI, C. A.; BERNARDES, M. B. (eds). **Cadernos da Disciplina Sistemas Agroflorestais**. Piracicaba: Série Difusão, v. 1, 2015. 108 p.
- RONQUIM, C. C. **Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais**. 2. ed. Campinas: Embrapa Territorial, 2020. 34 p.
- ROSA, L. S. et al. Limites e oportunidades para a adoção de sistemas agroflorestais pelos agricultores familiares da microrregião Bragantina, PA. *In*: PORRO, R. (org.) **Alternativa agroflorestal na Amazônia em transformação**. Brasília: Embrapa/Icraf, 2009. p. 645-670.
- RUIVO, M. L. P. et al. Propriedades do solo e fluxos de CO₂ em Caxiuanã, Pará: Experimento LBA-ESECAFLOR. *In*. Contribuições a geologia da Amazônia (CGA-3). **Sociedade Brasileira de Geologia**, v. 3, p. 291-299, 2002.
- SALOMÃO, R. P.; SANTANA, A. C.; BRIENZA JÚNIOR, S. Seleção de espécies da floresta ombrófila densa e indicação da densidade de plantio na restauração florestal de áreas degradadas na Amazônia. **Ciência Florestal**, v. 23, n. 1, p. 139-151, 2013.
- SALOMÃO, R. P.; BRIENZA JÚNIOR, S.; ROSA, N. A. Dinâmica de reflorestamento em áreas de restauração após mineração em unidade de conservação na Amazônia. **Revista Árvore**, v. 38, n. 1, p. 1-24, 2014.
- SANTOS, C. A. N.; JARDIM, F. C. da S. Dinâmica da regeneração natural de *Vouacapoua americana* com diâmetro <5 cm, influenciada por clareiras, em Moju, Pará. **Floresta**, v. 42, n. 3, p. 495 - 508, jul./set. 2012.
- SANTOS, C. C. et al. Soil carbon stock and Plinthosol fertility in smallholder land-use systems in the eastern Amazon, Brazil. **Carbon Management**, v. 9, p. 655-664, 2018.

SCHWARZA, J.; SCHNABELB, F.; BAUHUSA, J. A conceptual framework and experimental design for analyzing the relationship between biodiversity and ecosystem functioning (BEF) in agroforestry systems. **Basic and Applied Ecology**, v. 55, p. 133-151, 2021.

SCHWARTZ, G.; FALKOWSKI, V.; PEÑA-CLAROS, M. Natural regeneration of tree species in the Eastern Amazon: Short-term responses after reduced-impact logging. **Forest Ecology and Management**, v. 385, p. 97–103, 2017.

SCHWARTZ, G. et al. Post-harvesting silvicultural treatments in logging gaps: a comparison between enrichment planting and tending of natural regeneration. **For. Ecol. Manage.**, v. 293, p. 57–64, 2013.

SCOLFORO, J. R. et al. Trajetórias de crescimento de espécies de florestas semidecíduais. In: SCOLFORO, J. R.; MELO, J. M.; SILVA, C. P. C. (eds.) **Inventário florestal de Minas Gerais**: floresta estacional semidecidual e ombrófila-florística, estrutura, diversidade, similaridade, distribuição diamétrica e de altura, volumetria, tendências de crescimento e áreas para manejo florestal. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2008. p. 633-647.

SENAR (Serviço Nacional de Aprendizagem Rural). **Sistemas Agroflorestais (SAFs)**: conceitos e práticas para implantação no bioma amazônico. 1. ed. Brasília: SENAR, 2017. 140 p.

SHANLEY, P.; MEDINA, G. (eds.). **Frutíferas e plantas úteis na vida amazônica**. Belém: CIFOR, Embrapa Amazônia Oriental, IMAZON, 2005. 300 p.

SILVA JUNIOR, J. A. et al. Fluxos de CO₂ do solo na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará, durante o experimento ESECAFLOR/LBA. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 28, n. 1, p. 85-94, 2013.

SILVA JÚNIOR, M. L. **Dinâmica do carbono e do fósforo em um latossolo amarelo, textura argilosa, após conversão da floresta em capoeira e pastagens, na Amazônia oriental**. Orientador: Thierry Desjardins. 2007. 213 f. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias) - Universidade Federal Rural da Amazônia e Embrapa Amazônia Oriental, Belém, 2007.

SILVA, P. de T. E. et al. Principais espécies florestais utilizadas em sistemas agroflorestais na Amazônia. **Rev. Cienc. Agrar.**, v. 49, p.127-144, 2008.

SOUSA, S. G. A. de et al. Estabelecimento de andiroba (*Carapa guianensis* Aubl e *Carapa procera* Condolle) em sistemas agroflorestais em estágio avançado de desenvolvimento. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS, 7., 2009, Luziânia. Diálogo e integração de saberes em sistemas agroflorestais para sociedades sustentáveis: **Anais [...]**. Sociedade Brasileira de Sistemas Agroflorestais; EMATER-DF; Embrapa, 2009. 1 CD-ROM.

SOUZA, C. R.; LIMA, R. M. B.; AZEVEDO, C. P.; ROSSI, L. M. B. Desempenho de espécies florestais para uso múltiplo na Amazônia. **Scientia Forestalis**, v. 36, n. 77, p. 7-15, 2008.

SOUZA, E. S. et al. Physical, chemical, and mineralogical attributes of a representative group of soils from the eastern Amazon region in Brazil. **Soil**, v. 4, p. 195–212, 2018.

SUAREZ, 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, p. 107-349, 2021.

TEIXEIRA, P. C. et al. **Manual de Métodos de Análise de Solo**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2017.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M. F.; SÁ, S. P. P. Dendrometria de espécies nativas em plantios homogêneos no estado de Roraima: andiroba (*Carapa guianensis* Aubl), castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), ipê-roxo (*Tabebuia avellanedae* Lorentz ex Griseb) e jatobá (*Hymenaea courbaril* L.). **Acta Amazonica**, v. 35, n. 3, p. 353–362, 2005.

WANG, J. et al. Conversion of rainforest into agroforestry and monoculture plantation in China: Consequences for soil phosphorus forms and microbial community. **Science of the Total Environment**, v. 595, p. 769–778, 2017.

WARTENBERG, A. et al. Does shade tree diversity increase soil fertility in cocoa plantations? **Agric., Ecosyst. Environ.**, v. 248, p. 190–199, 2017.

WILSON, M.; LOVELL, S. Agroforestry—the next step in sustainable and resilient agriculture. **Sustainability**, v. 8, 574, 2016.

WU, J.; LIU, W.; CHEN, C. How do plants share water sources in a rubber-tea agroforestry system during the pronounced dry season? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 236, p. 69–77, 2017.

Apêndice I. Sistemas agroflorestais em Caxiuanã: arranjo e espécies utilizadas

A tabela 11 apresenta os componentes arbóreos e frutíferos dos SAFs implantados, bem como características funcionais das espécies escolhidas.

Tabela 11. Espécies selecionadas para composição de SAFs de acordo com sua função no sistema e características de interesse.

Uso predominante	Grupo Botânico	Família Botânica ^a	Nome científico	Nome comum	Adaptabilidade local	Grupo Ecológico ^f	Características relevantes
Espécies frutíferas	Mon. ^b	Arecaceae	<i>Euterpe oleracea</i>	Açaí	nativa	Intermediária	Potencial econômico, segurança alimentar
	Mon.	Arecaceae	<i>Oenocarpus bacaba</i>	Bacaba	nativa	Intermediária	Segurança alimentar
	Mon.	Musaceae	<i>Musa paradisiaca</i>	Banana	var. Pacoua ^d	pioneira	Rápida cobertura do solo, ciclo curto
	Eud. ^c	Malvaceae	<i>Theobroma cacao</i>	Cacau	var. BRS ^d	Intermediária	Potencial econômico
	Eud.	Malvaceae	<i>Theobroma grandiflorum</i>	Cupuaçu	nativa	Intermediária	Potencial econômico
	Eud.	Malvaceae	<i>Theobroma subincanum</i>	Cupuí	nativa	Intermediária	Diversificação, serviço ambiental
	Eud.	Myrtaceae	<i>Psidium acutangulum</i>	Araçá do Pará	nativa	pioneira	Diversificação, serviço ambiental
	Eud.	Myrtaceae	<i>Psidium guajava</i>	Goiaba	var. regional ^e	pioneira	Segurança alimentar, serviço ambiental
Espécies florestais	Eud.	Caricaceae	<i>Carica papaya</i>	Mamão	var. regional ^e	pioneira	Segurança alimentar, ciclo curto
	Eud.	Meliaceae	<i>Carapa guianensis</i>	Andiroba	nativa	Intermediária	cresc. rápido, potencial econômico
	Eud.	Rhamnaceae	<i>Colubrina glandulosa</i>	Capoeirão	nativa	pioneira	cresc. rápido, biomassa abundante
	Eud.	Fabaceae	<i>Vouacapoua americana</i>	Acapu	nativa	clímax	Fixadora de N, ameaçada de extinção

^a= APG IV (*Angiosperm Phylogeny Group*); ^b= Monocotiledônea; ^c= Eudicotiledônea; ^d= recomendada para a região; ^e= adaptada; ^f= baseado em Budowsky, 1965.

Fonte: o autor (2023)

Psidium sp.

O araçá-pera ou araçá-do-Pará (*Psidium acutangulum*) é uma espécie nativa do norte da América do Sul, na Amazônia brasileira, encontrada abundantemente no estado silvestre, apesar de ser pouco cultivada. A árvore apresenta pequeno porte, podendo alcançar de 6 a 8m de altura, e seus frutos são do tipo baga globosa ou piriforme, pesando até 240g (CAVALCANTE, 2010).

A goiaba (*Psidium guajava*) é uma árvore de pequeno porte, de 10 a 12 m de altura, provavelmente originária da região dos Andes, no México, sendo bastante comum na Amazônia brasileira, tanto em pomares cultivados como em surgimentos subespontâneos, devido à alta taxa de dispersão de suas sementes por mamíferos e aves (CAVALCANTE, 2010). A susceptibilidade a ventos é um dos fatores que pode interferir no desenvolvimento da cultura, cuja temperatura média anual ótima é de 25 °C (BARBOSA; LIMA, 2010). Segundo os autores, o cultivo de goiabeira deve ser feito em ambiente protegido de ventos fortes a fim de evitar o ressecamento das folhas e das flores.

Mamão

O mamoeiro (*Carica papaya* L.) é uma espécie de crescimento rápido, tipicamente tropical, originária das Américas. O Brasil é o maior produtor mundial de mamão, sendo cultivado em quase todo o território nacional. A planta produz frutos o ano todo, sendo bastante apreciados no mercado interno e no exterior (EMBRAPA, 2009). Produz frutos de boa qualidade em regiões de grande insolação, com temperaturas variando de 22 °C a 26 °C, pluviosidade de 1.800 mm a 2.000 mm anuais. A faixa de pH ideal para a cultura é de 5,5 a 6,7 (EMBRAPA, 2009). O mamoeiro é muito sensível às variações climáticas e ambientais, particularmente, quando ainda jovem, daí sua exigência por um suprimento hídrico adequado. Seu consumo anual de água oscila entre 1.200 mm e 3.125 mm, e as irrigações devem ser mais frequentes quando as plantas são mais jovens e não dispõem de um sistema radicular extenso (EMBRAPA, 2009). O mamoeiro apresenta um ciclo de vida relativamente curto (de dois anos a dois anos e meio) e pode ser usado como cultura intercalar com diversas fruteiras de ciclo mais longo. O surgimento das primeiras flores varia entre cultivares e variedades, podendo correr dos três aos

cinco ou até nove meses após o plantio, a uma altura média de 60 a 80 cm (EMBRAPA, 2009).

Cupuí

O cupuí (*Theobroma subincanum*) é uma espécie originária da Amazônia brasileira, dispersa do Pará aos países vizinhos, de ocorrência predominante nas terras altas às margens úmidas dos igarapés. Seu porte é mediano, raramente ultrapassando 20 m de altura e 30 cm de diâmetro no tronco. Os frutos são bastante apreciados pela população local, sendo procurados por diversos animais, especialmente macacos (CAVALCANTE, 2010).

Cupuaçu

O cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* Willd. ex Spreng. Schum.) é uma espécie nativa do Pará, de ocorrência predominante nas matas virgens da floresta tropical úmida, sendo cultivado em toda a região amazônica. Quando cultivado, geralmente alcança de 4 a 8 m de altura, podendo alcançar até 18 m em estado silvestre na mata alta (LIMA, 2002). Seus frutos são muito apreciados pela população local, consumidos na forma de sucos, sorvetes, bolos, cremes, entre outros (CAVALCANTE, 2010). A faixa de temperatura média ideal para o desenvolvimento da cultura é de 21 a 27,5 °C, preferindo ambientes com alta umidade, acima de 60%. O cupuaçuzeiro prefere solos de terra firme, profundos, com boa retenção de água e fertilidade adequada (LIMA, 2002).

Cacau

O cacau (*Theobroma cacao* L.) é uma cultura de importância comercial bastante relevante para a economia de países tropicais (BAI et al., 2017). A América do sul e Central são atualmente responsáveis por aproximadamente 15% da produção mundial de cacau (GAMA-RODRIGUES et al., 2021), sendo o estado do Pará o maior produtor de cacau do Brasil, responsável por metade da produção nacional (IBGE, 2019), principalmente cultivado às sombras de árvores nativas (SCHROTH et al., 2016). O cacaueiro é uma planta tolerante à sombra que pode ser cultivada em associação com outras espécies para fornecer sombra à cultura nos estágios iniciais do seu desenvolvimento, sendo amplamente utilizado em SAFs na região tropical (VAAST; SOMARRIBA, 2014). Müller e Gama-Rodrigues (2012)

estudaram um modelo de SAF de cacau com erythrina, conforme recomendado pela CEPLAC, devido a suas características de rápido crescimento, boa altura e copa pouco fechada, o que permite a passagem de luz em quantidade suficiente. No Brasil, a produção consorciada de cacau tem como características a agricultura familiar, o baixo custo de produção e uma produtividade mediana (GAMA-RODRIGUES et al., 2021). A associação de cacau com árvores em SAF ajuda a recuperar a qualidade dos solos em áreas degradadas (SUAREZ et al., 2021) e contribui para a regulação da disponibilidade de água e a diminuição dos efeitos dos ventos e incidência de pragas e doenças (MÜLLER; VALLE, 2012). A recomposição da Reserva Legal pelos proprietários e posseiros rurais mediante o plantio de cacau em sistemas agroflorestais no Estado do Pará é regulamentada por instrução normativa estadual (IDEFLOR-Bio, 2021).

Banana

A banana (*Musa paradisiaca*) é a segunda fruta mais produzida no Pará, precedida apenas pelo açaí, sendo o estado o maior produtor da região norte do Brasil (EMBRAPA, 2016). A bananeira é uma das frutas exóticas mais utilizadas em SAFs, especialmente em consórcio com o cacau nas regiões tropicais (ARÉVALO-GARDINI et al., 2015; NIETHER et al., 2018; TSCHARNTKE et al. 2011). Segundo dados do IBGE (2019), a banana e o cacau são as duas principais lavouras permanentes do estado do Pará por ordem de valor da produção, enquanto o açaí e a madeira em tora são os principais produtos de atividades extrativistas. A variedade utilizada nesse experimento, Pacovan Pacoua, é resistente a doenças como sigatoka-amarela e mal-do-panamá e medianamente resistente à sigatoka-negra, convivendo bem com a doença no estado do Pará (EMBRAPA, 2016).

Açaí

O açazeiro (*Euterpe oleracea* Mart.) é uma palmeira perenifólia e heliófita, nativa do Estado do Pará, Amazônia Oriental, com maior ocorrência no estuário do rio Amazonas, onde ocupa uma área de 10.000 km² (SHANLEY; MEDINA, 2005). Os açazais mais densos ocorrem naturalmente em áreas de várzea e igapó; suas palmeiras chegam a alcançar mais de 25 m, com troncos múltiplos (que perfilham) de 9 a 16 centímetros de diâmetro, possuindo em média de 4 a 9 filhos (SHANLEY; MEDINA, 2005). O açaí é, em muitos casos, a principal fonte de alimentação da

população ribeirinha da região, principalmente por causa dos seus frutos maduros, a partir dos quais se produz o vinho ou suco, além do palmito (SILVA et al., 2008). Segundo Silva et al. (2008), o açaí é uma das espécies mais utilizadas em SAFs no Pará (em terceiro lugar) porque, além de ser fonte de renda e subsistência para o produtor rural, é uma cultura adaptada ao ecossistema de várzea porque apresenta crescimento rápido nesses ambientes, tolera certo nível de degradação dos solos e entra em produção nos primeiros quatro anos após o plantio. Quando plantado em áreas de sequeiro, entretanto, apresenta desenvolvimento mais lento no campo (LORENZI, 2016).

Bacaba

A bacaba (*Oenocarpus bacaba*) é uma palmeira nativa da Amazônia, sendo bastante frequente nos estados do Pará e Amazonas, onde habita a mata virgem alta de terra firme, assim como as regiões de várzea (CAVALCANTE, 2010). Apresenta tronco solitário (não perfilha), podendo alcançar até 20m de altura. Os frutos, ricos em óleo, são apreciados pela população local que utiliza sua polpa de maneira semelhante ao açaí, consumindo-a principalmente na entressafra deste (CAVALCANTE, 2010). Plântulas novas de bacabeira preferem sombra nos estágios iniciais de desenvolvimento, para não perderem muita água por transpiração, e quando atingem de 3 a 4 metros de altura começam a frutificar, o que geralmente ocorre aos seis anos após o plantio (SHANLEY; MEDINA, 2005).

Capoeirão

A espécie *Colubrina glandulosa* Perkins, conhecida popularmente como sobrasil, maranhoto ou capoeirão, entre outros nomes, ocorre desde a costa leste do Brasil até o Paraguai e Peru, sendo pouco encontrada na floresta primária sombria porque prefere áreas abertas como clareiras e capoeiras (CAUS; PAULILO, 2000; GAMA et al. 2013; LORENZI, 2016). A espécie prefere solos úmidos, mas pode ser plantada a pleno sol, propiciando um ambiente de sombra para espécies menos tolerantes à radiação, sendo cruciais para a dinâmica sucessional da vegetação (SILVA et al., 2015). Apresenta rápido crescimento, tolera solos pouco férteis e produz grande quantidade de sementes viáveis e intensa regeneração natural, o que evidencia seu grande potencial de utilização em projetos de recuperação de áreas degradadas e em sistemas agroflorestais (BRANCALION et al., 2011; CAMARA et

al., 2017; MELO JUNIOR et al., 2018; SILVA et al., 2008). Produz madeira de qualidade, de alta densidade, bastante resistente ao apodrecimento, mesmo em contato com o solo e a umidade, apresentando boa durabilidade (SILVA et al., 2008). É atrativa para a fauna (BRAGA et al. 2019).

Acapu

O acapu (*Vouacapoua americana* Aubl.) é uma espécie de grande porte que ocupa o estrato dominante das florestas, atingindo em média de 30 a 40 m de altura e 100 cm de diâmetro à altura do peito (CRUZ; PEREIRA, 2016). É uma espécie clímax, tolerante à sombra, que se instala como secundária tardia no processo de sucessão, atingindo o dossel quando adulta, sendo necessário o sombreamento na fase inicial para o estabelecimento da planta (CRUZ; PEREIRA, 2016; SANTOS; JARDIM, 2012). Nativa da Amazônia, o acapu é uma espécie fixadora de N, bastante utilizada na construção civil (LORENZI, 2016). Devido à exploração extrativista e desordenada, a espécie está ameaçada de extinção (BRASIL, 2014), considerado como criticamente em perigo (IUCN, 2018). Nos últimos dez anos, somente no Estado do Pará, foram extraídos da floresta nativa aproximadamente duzentos mil m³ de madeira em toras da espécie (PARÁ, 2016).

Andiroba

A andiroba (*Carapa guianensis* Aubl.) é uma espécie perenifólia e heliófita que ocorre em toda a Amazônia, tanto nas florestas de terra firme como em várzeas, sendo encontrada principalmente na mata primária em ecossistemas de várzea (SHANLEY; MEDINA, 2005). Apresenta boa regeneração natural nas capoeiras e produz grande quantidade de sementes, muito apreciadas pela fauna silvestre, tendo crescimento rápido no campo (LORENZI, 2016). A andiroba é uma árvore de médio a grande porte, de copa densa, com sapopemas e tronco reto que pode alcançar 30 m de altura, podendo iniciar a floração aos quatro anos de idade (BRITO et al., 2002). A espécie apresenta uso múltiplo, sendo sua madeira bastante utilizada na construção civil e suas sementes, ricas em óleos e propriedades medicinais, utilizada para diversas finalidades (COSTA; MORAIS, 2013). Devido às suas características, a andiroba apresenta grande potencial para uso em SAFs (SHANLEY; MEDINA, 2005). Em SAFs em Tomé-açu, no Estado do Pará, a andiroba figura entre as espécies arbóreas de maior interesse no consórcio com

cacau, cupuaçu e açaí (BARROS; HOMMA, 2009), e no Amazonas, com cacau e bacaba (JAKOVAC et al., 2008), apresentando maior tendência de crescimento em ambientes mais iluminados, com espaçamento iguais ou maiores que 3x3. Quando plantadas em espaçamento menor, as plantas ficam mais suscetíveis ao ataque da broca do ponteiro (COSTA; MORAIS, 2013).

REFERÊNCIAS

APG IV. An update of the angiosperm phylogeny group classification for the orders and families of flowering plants: APG IV. *Botanical Journal of the Linnean Society*, 181, 1-20. 2016. <https://doi.org/10.1111/boj.12385>.

ARÉVALO-GARDINI, E. et al. Changes in Soil Physical and Chemical Properties in Long Term Improved Natural and Traditional Agroforestry Management Systems of Cacao Genotypes in Peruvian Amazon. **PLoS ONE**, v. 10, n. 7, 2015.

BAI, S. H. et al. Effects of shade-tree species and spacing on soil and leaf nutrient concentrations in cocoa plantations at 8 years after establishment. **Agric. Ecosyst. Environ.**, v. 246, p. 134–143, 2017.

BARBOSA, F. R.; LIMA, M. F. (eds.). **A cultura da goiaba** (Coleção Plantar, 66). 2. ed. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2010. 180 p.

BARROS, A. V. L. de; HOMMA, A. K. O. Percepção dos agricultores nipo-brasileiros do município de Tomé-Açu, Pará, sobre sistemas agroflorestais. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS*, 7., 2009, Luziânia. **Anais [...]**. Brasília: Embrapa, 2009. CD-ROM.

BRAGA, D. P. P.; DOMENE, F.; GANDARA, F. B. Shade trees composition and diversity in cacao agroforestry systems of southern Para, Brazilian Amazon. **Agroforest Systems**, v. 93, p. 1409–1421, 2019.

BRANCALION, P. H. S.; MONDO, V. H. V.; NOVENBRE, A. D. L. C. Escarificação química para a superação da dormência de sementes de saguaraji-vermelho (*Colubrina glandulosa* perk. – Rhamnaceae). **Revista Árvore**, v. 35, n. 1, p.119-124, 2011.

BRASIL. Portaria nº 443, de 17 de dezembro de 2014. Reconhece como espécies da flora brasileira ameaçadas de extinção aquelas constantes da "Lista Nacional Oficial de Espécies da Flora Ameaçadas de Extinção". **Diário Oficial da União**: Brasília, DF, 18 dez. 2014. Seção 1, p. 110-121.

BRITO, A. M. et al. Sistemas agroflorestais com o cacauzeiro: uma tentativa de busca do desenvolvimento sustentável do Estado do Amazonas, Brasil. **Agrotrópica**, v. 14, p. 61–72, 2002.

BUDOWSKY, G. Distribution of tropical american rain forest species in the light of successional processes. **Turrialba**, v. 15, n. 1, p. 40-42, 1965.

CAMARA, R. et al. Influência do substrato e inoculação micorrízica na produção de mudas de *Colubrina glandulosa* Perkins. **Floresta**, v. 47, n. 4, p. 449 - 458, 2017.

CAUS, C.; PAULILO, M. T. S. Influência da quantidade de luz no crescimento inicial de duas espécies arbóreas da Mata Atlântica. **Insula**, v. 29, p. 107-115, 2000.

CAVALCANTE, P. B. **Frutas comestíveis na Amazônia**. 7. ed. Belém: Museu Paraense Emílio Goeldi, 2010. 282 p.

COSTA, J. R.; MORAIS, R. R. **Carapa Guianensis Aubl. (andirobeira) em Sistemas Agroflorestais**. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2013. 32 p. Documentos n. 112

CRUZ, E. D.; PEREIRA, A. G. Germinação de sementes de espécies amazônicas: acapu (*Vouacapoua americana* Aubl.) Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2016. Comunicado técnico n. 299

EMBRAPA. **A cultura do mamão**. 3. ed. Brasília: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2009. 119 p. Coleção Plantar, n. 65

_____. **BRS Pacoua, nova cultivar de bananeira do tipo pacovan**. Brasília: Embrapa Mandioca e Fruticultura Tropical, 2016. Folheto técnico

GAMA, M. M. B. et al. Reforestation feasibility in area formerly used for cattle raising in the state of Rondônia, northwest Brazilian Amazon. **Revista Árvore**, v. 37, n. 6, p.1001-1010, 2013.

GAMA-RODRIGUES, A. C. et al. Cacao-based agroforestry systems in the Atlantic Forest and Amazon Biomes: An ecoregional analysis of land use. **Agricultural Systems**, v. 194, 2021.

IBGE. **Sistema IBGE de Recuperação Automática**. Rio de Janeiro: IBGE, 2019. Disponível em: <https://sidra.ibge.gov.br/acervo>. Acesso em: março 2022.

IDEFLOR-Bio (Instituto de Desenvolvimento Florestal e da Biodiversidade do Estado do Pará). **Cartilha de sistemas agroflorestais comerciais: estratégia produtiva sustentável para a agricultura familiar**. Belém, Diretoria de Desenvolvimento de Cadeias Florestais (DDF), 2021.

IUCN (International Union for Conservation of Nature). **IUCN Red List of Threatened Species**. Disponível em: <https://www.iucn.org/>. Acesso em: 10 Dez. 2021.

JAKOVAC, A. C. C.; BENTOS, T. V.; MESQUITA, R. C. G. Enriquecimento de capoeiras na Amazônia Central: desenvolvimento de oito espécies nativas sob diferentes condições de luminosidade. Valorização da floresta em pé: o enriquecimento de capoeiras em pequenas propriedades da Amazônia. In: CONFERÊNCIA CIENTÍFICA INTERNACIONAL AMAZÔNIA EM PERSPECTIVA, 2008, Manaus. **Ciência integrada para um futuro sustentável: conference abstracts**. Manaus: LBA/GEOMA/PPBlo, 2008. Resumo 475.

LIMA, M. M. **Crescimento, composição mineral e sintomas de deficiência de macronutrientes em plantas de cupuaçuzeiro (*Theobroma grandiflorum*)**. Orientador: Dilson Augusto Capucho Frazão. 2002. 77 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal Rural Da Amazônia. Belém, 2002.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 3. ed. Nova Odessa: Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2016. 384 p.

- MELO JUNIOR, J. L. DE A. et al. Germination and morphology of seeds and seedlings of *Colubrina glandulosa* Perkins after overcoming dormancy. **Australian Journal of Crop Science**, v. 12, n. 4, p. 639-647, 2018.
- MESSIAS, R.; PAULILO, M. T. S. Crescimento inicial de *Colubrina glandulosa* Perkins var. reitzii (M.C. Johnston) M.C. Johnston em campo e viveiro sob diferentes intensidades de luz. **INSULA Revista de Botânica**, v. 41, p. 73-82, 2012.
- MÜLLER, M. W.; GAMA-RODRIGUES, A. C. Sistemas agroflorestais com cacauero. In: VALLE, R. R. (ed.) **Ciência, Tecnologia e Manejo do Cacauero**. Brasília: CEPLAC/CEPEC, 2012. p. 246–271.
- MÜLLER, M. W.; VALLE, R. R. Ecofisiologia do cacauero. In: VALLE, R. R. (ed.) **Ciência, Tecnologia e Manejo do Cacauero**. Brasília: CEPLAC/CEPEC, 2012. p. 655–672.
- NIETHER, W. et al. Shade trees and tree pruning alter throughfall and microclimate in cocoa (*Theobroma cacao* L.) production systems. **Annals of Forest Science**, v. 75, 2018.
- PARÁ (Estado). **Extração e movimentação de toras de madeira nativa**. Belém: Secretaria de Estado de Meio Ambiente, 2016. Disponível em: <http://monitoramento.semas.pa.gov.br/sisflora/relatorios.html>. Acesso em: 16 nov. 2022.
- SANTOS, C. A. N.; JARDIM, F. C. da S. Dinâmica da regeneração natural de *Vouacapoua americana* com diâmetro <5 cm, influenciada por clareiras, em Moju, Pará. **Floresta**, v. 42, n. 3, p. 495 - 508, jul./set. 2012.
- SCHROTH, G. et al. Commodity production as restoration driver in the Brazilian Amazon? Pasture re-agro-forestation with cocoa (*Theobroma cacao*) in southern Para. **Sustain. Sci.**, v. 11, p. 277–293, 2016.
- SHANLEY, P.; MEDINA, G. (eds.). **Frutíferas e plantas úteis na vida amazônica**. Belém: CIFOR, Embrapa Amazônia Oriental, IMAZON, 2005. 300 p.
- SILVA, K. D. A. et al. Semeadura direta com transposição de serapilheira como metodologia de restauração ecológica. **Revista Árvore**, v. 39, n. 5, p. 811-820, 2015.
- SILVA, P. de T. E. et al. Principais espécies florestais utilizadas em sistemas agroflorestais na Amazônia. **Rev. Cienc. Agrar.**, v. 49, p.127-144, 2008.
- SUAREZ, 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, p. 107-349, 2021.
- TSCHARNTKE, T. Multifunctional shade-tree management in tropical agroforestry landscapes—a review. **J Appl Ecol.**, v. 48, p. 619–629, 2011.
- VAAST, P.; SOMARRIBA, E. Trade-offs between crop intensification and ecosystem services: the role of agroforestry in cocoa cultivation. **Agrofor Syst.**, v. 88, p. 947–956, 2014.

Apêndice II. Potencial de sequestro de C das espécies utilizadas e padrão gráfico de crescimento das plantas, utilizados para compor o índice de recomendação.

O potencial de sequestro de C por espécies tropicais é muito variável, sendo a escolha das espécies adequadas um fator determinante para aumentar a quantidade de C assimilado em sistemas agroflorestais (NAIR; KUMAR; NAIR, 2009). Destaca-se o grande potencial de sequestro de C de *C. glandulosa*, com valor estimado de 12,1 toneladas de CO₂ por hectare por ano, caso o espaçamento adotado fosse o de 3x3 comumente utilizado em reflorestamentos (SCHERER-LORENZEN et al., 2005). Nenhuma outra espécie avaliada mostrou desempenho semelhante, acima de 10t CO₂/ha/ano. Outras espécies florestais apresentaram valores muito abaixo, como *O. bacaba*, cujo potencial estimado foi de 2t CO₂/ha/ano, ou *C. guianensis* (1,8t CO₂/ha/ano). Os menores potenciais estimados foram calculados para as espécies do gênero *Psidium*, variando de 0,1 a 0,4 t CO₂/ha/ano (tabela 12).

Tabela 12. Potencial de sequestro de carbono das espécies dos SAFs de Caxiuanã (valores médios).

ESPÉCIE	DAC ^a	ALTURA	C	IMAD ^b	IMAH ^c	CO ₂	IMACO ₂ ^d	IMACO ₂
	mm	cm	kg	mm/ano	cm/ano	kg	kg CO ₂ /pl	t CO ₂ /ha ^e
<i>E. oleracea</i>	34,8	182,5	1,48	11,6	60,6	5,4	1,8	2,0
<i>O. bacaba</i>	32,9	133,2	1,08	10,9	44,2	4,0	1,3	1,5
<i>M. paradisiaca</i>	94,1	269,0	6,62	31,2	89,3	24,3	8,1	9,0
<i>T. cacao</i>	13,8	89,0	0,28	4,6	29,6	1,0	0,3	0,4
<i>T. grandiflorum</i>	17,1	104,0	0,41	5,7	34,5	1,5	0,5	0,5
<i>T. subincanum</i>	11,3	73,0	0,19	3,8	24,2	0,7	0,2	0,3
<i>P. acutangulum</i>	12,6	115,3	0,31	4,2	38,3	1,1	0,4	0,4
<i>P. guajava</i>	7,1	68,8	0,10	2,4	22,9	0,4	0,1	0,1
<i>C. papaya</i>	23,3	151,8	0,79	7,7	50,4	2,9	1,0	1,1
<i>C. guianensis</i>	25,5	256,3	1,32	8,5	85,1	4,9	1,6	1,8
<i>C. glandulosa</i>	62,3	743,0	8,92	20,7	246,8	32,7	10,9	12,1
<i>V. americana</i>	15,8	167,5	0,54	5,3	55,6	2,0	0,7	0,7

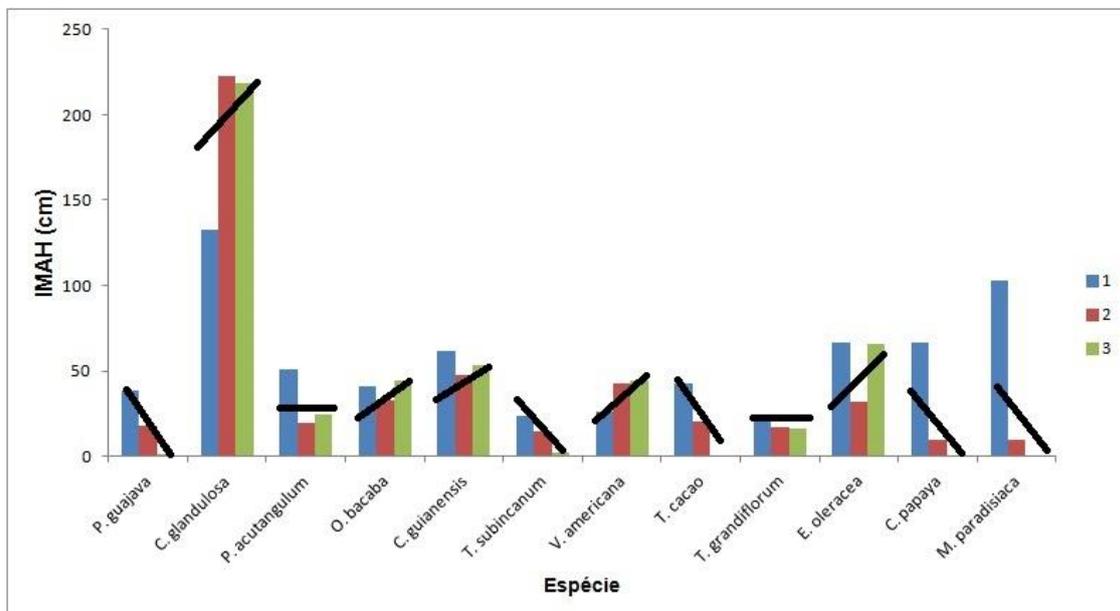
^aDAC = diâmetro na altura do coleto; ^bIMAD = Incremento médio anual (IMA) em diâmetro; ^cIMAH = IMA em altura;

^dIMACO₂ = IMA em CO₂; ^e = Espaçamento considerado de 3x3m

Fonte: o autor (2023)

As espécies que apresentaram crescimento contínuo durante três anos seguidos ou durante os últimos dois anos foram *C. glandulosa*, *O. bacaba*, *C. guianensis*, *V. americana* e *E. oleracea*. *P. acutangulum*, *T. grandiflorum* apresentaram um bom desempenho apenas no primeiro ano, seguido de desempenhos estáveis nos anos seguintes; *P. guajava*, *T. subincanum*, *T. cacao*, *C. papaya* e *M. paradisiaca* apresentaram incrementos decrescentes, sinalizando que não se adaptaram às condições locais (Figura 3).

Figura 3. Crescimento em altura das espécies dos SAFs de Caxiuanã - padrão gráfico de crescimento com base nos incrementos anuais calculados.



Nota: baseado nos padrões gráficos de Scolforo et al. (2008) - Fonte: o autor (2023)

REFERÊNCIAS

NAIR, P. K. R.; KUMAR, B. M.; NAIR, V. D. Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. **J. Plant. Nutr. Soil. Sci.**, v. 172, n. 1, p. 10–23, 2009.

SCHERER-LORENZEN, M. et al. The design of experimental tree plantations for functional biodiversity research. In: SCHERER-LORENZEN, M.; KÖRNER, C.; SCHULZE, E.-D. (eds.) **Ecological studies, analysis and synthesis: Forest diversity and function: Temperate and boreal systems**. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2005. v. 176, p. 347-376.

SCOLFORO, J. R. et al. Trajetórias de crescimento de espécies de florestas semidecíduais. In: SCOLFORO, J. R.; MELO, J. M.; SILVA, C. P. C. (eds.) **Inventário florestal de Minas Gerais: floresta estacional semidecidual e ombrófila-florística, estrutura, diversidade, similaridade, distribuição diamétrica e de altura, volumetria, tendências de crescimento e áreas para manejo florestal**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2008. p. 633-647.