



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

**CRESCIMENTO E RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS DE
Bertholletia excelsa Bonpl. CULTIVADA EM DIFERENTES
SISTEMAS DE PLANTIO SOBRE ÁREA ALTERADA**

ALEXANDRE LEÃO GONÇALVES

MANAUS - AM
2023

ALEXANDRE LEÃO GONÇALVES

CRESCIMENTO E RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS DE
Bertholletia excelsa Bonpl. CULTIVADA EM DIFERENTES
SISTEMAS DE PLANTIO SOBRE ÁREA ALTERADA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Ciências de Florestas Tropicais - INPA, como
requisito para obtenção do título de mestre em Ciências
de Florestas Tropicais.

Orientador: Dr. José Francisco de Carvalho Gonçalves (INPA-LFBV)

Coorientadora: Dra. Karen Cristina Pires da Costa (UNIFESSPA - IEDAR)

Coorientadora: Dra. Josiane Celerino de Carvalho (INPA-LFBV)

MANAUS - AM
2023

Catalogação na Publicação (CIP-Brasil)

G365c Gonçalves, Alexandre Leão

Crescimento e respostas ecofisiológicas de *Bertholletia excelsa* cultivada em diferentes sistemas de plantio sobre área alterada/ Alexandre Leão Gonçalves; orientador: José Francisco de Carvalho Gonçalves. - Manaus:[s. 1.], 2023.

54p. : il. color.

Dissertação (Mestrado -Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais – CFT.) - Coordenação do Programa de Pós-Graduação, INPA, 2023.

1. *Bertholletia excelsa*. 2. Sistemas de plantio. I. Gonçalves, José Francisco de Carvalho . III. Título.

CDD 583.46



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS TROPICAIS

**ATA DE DEFESA PÚBLICA DE DISSERTAÇÃO
MESTRADO**

Ata da Defesa Remota de **ALEXANDRE LEÃO GONÇALVES**, ocorrido no dia 31/01/2023, via plataforma Google Meet.

Aos 31 dias de janeiro de 2023, às 09h (horário de Manaus/AM), realizou-se a Defesa Pública de Dissertação de **ALEXANDRE LEÃO GONÇALVES**, aluno do Programa de Pós-Graduação *Stricto sensu* em Ciências de Florestas Tropicais, intitulada "**Crescimento e respostas ecofisiológicas de *Bertholletia excelsa* Bonpl. Cultivada em diferentes sistemas de plantio sobre área alterada**", sob a orientação do Dr. José Francisco de Carvalho Gonçalves (INPA), em conformidade com o Art. 52 do Regimento Geral da Pós-Graduação do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (MCTI/INPA) e Art. 67 do Regimento Interno do Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais, como parte das atividades para conclusão e obtenção do Título de Mestre em Ciências de Florestas Tropicais. A **Banca Examinadora** foi constituída pelos seguintes membros: Roberval Monteiro Bezerra de Lima (EMBRAPA), Roberto Kirmayr Jaquetti (INPA), Jair Max Furtunato Maia (UEA), e tendo como suplentes os seguintes membros: Adamir Rocha Nina Junior. (IFAM) Vinicius F. de Souza (EMU), Flávia Camila Schimpl (IFAM). O Presidente da Banca Examinadora deu início à sessão e informou os procedimentos do exame. O aluno fez uma exposição do seu estudo e ao término foi arguida oralmente pelos membros da Comissão. Após as arguições os membros da banca se reuniram para avaliação e chegaram ao seguinte parecer:

Nome	Parecer	Assinaturas
Roberval Monteiro Bezerra de Lima	(X) Aprovou () Reprovou	
Roberto Kirmayr Jaquetti	(X) Aprovou () Reprovou	
Jair Max Furtunato Maia	(X) Aprovou () Reprovou	 Documento assinado digitalmente JAIR MAX FURTUNATO MAIA Data: 31/01/2023 20:34:02-0300 Verifique em https://verificador.iti.br

Menção: () "Com Distinção" () "Com Louvor" () "Com Distinção e Louvor"

Nada mais havendo a tratar, foi lavrada a presente Ata que, após lida e aprovada, foi assinada pela Coordenação:

Documento assinado digitalmente
JOSE FRANCISCO DE CARVALHO GONCALVI
Data: 01/02/2023 15:14:53-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

José Francisco de Carvalho Gonçalves
Presidente da Banca / Orientador

Documento assinado digitalmente
ADRIANO JOSE NOGUEIRA LIMA
Data: 04/02/2023 10:16:40-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Adriano José Nogueira Lima
Coordenador do PPG-CFT
PO. N° 163/2021

AGRADECIMENTOS

A Deus por te me concedido força, saúde e coragem para enfrentar esse desafio e concluí-lo.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA e ao Programa de Pós-graduação em Ciências de Florestas Tropicais (CFT) pela oportunidade de cursar o mestrado.

À Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará – UNIFESSPA por ter concedido acesso à área do experimento, possibilitando a realização deste estudo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq pela concessão da bolsa de estudos.

Ao Dr. José Francisco de Carvalho Gonçalves, meu orientador, por todo apoio, compreensão, confiança, incentivo e orientação no desenvolvimento da dissertação, por quem tenho um profundo respeito e consideração pelo tratamento humanitário que recebi num momento extremamente difícil, ocasião em que suas palavras de apoio mudaram a minha vida.

À Dra. Karen Cristina Pires da Costa, minha coorientadora, por toda parceria de trabalho, orientação, ensinamentos, paciência e dedicação durante essa trajetória de mestrado.

À Dra. Josiane Celerino de Carvalho, minha coorientadora, por todas as orientações e apoio na elaboração da dissertação e defesa.

Ao corpo docente e colegas de turma do CFT pelos ensinamentos, experiências e apoios proporcionados durante o mestrado.

À equipe do Laboratório de Fisiologia e Bioquímica Vegetal (LFBV-INPA), em especial, a Josiane, Sabrina, Ana Cláudia, Jéssica e Hellen, por todas as vezes em que recebi ajuda e pela amizade construída.

Ao meu filho, Lucas Gonçalves, a alegria e o amor da minha vida, motivo pelo qual segui firme na conclusão deste trabalho, e é por quem luto todos os dias por um amanhã melhor.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REFERENCIAL TEÓRICO	12
2.1 CONCEITOS E APLICAÇÕES	12
2.1.1 Áreas Alteradas e Áreas Degradadas	12
2.1.2 Recuperação, Restauração e Reabilitação	13
2.2 ÁREAS ALTERADAS E A DEGRADAÇÃO NA AMAZÔNIA.....	14
2.3 SAZONALIDADE DA PRECIPITAÇÃO E OS PLANTIOS FLORESTAIS	16
2.4 DESEMPENHO DE <i>B. excelsa</i> EM ÁREAS ALTERADAS/DEGRADADAS	17
2.4 <i>Bertholletia excelsa</i> EM SISTEMAS DE PLANTIO	18
2.4.1 Sistemas Agroflorestais	20
2.4.2 Plantios Mistos.....	20
2.4.3 Plantios Puros.....	21
3. OBJETIVOS	22
3.1 OBJETIVO GERAL	22
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	24
4.1 ÁREA DE ESTUDO.....	24
4.2 TRATAMENTOS.....	26
4.3 COLETA DE DADOS	27
4.4 DISPONIBILIDADE DE RECURSOS	27
4.5 SOBREVIVÊNCIA E CRESCIMENTO	28
4.6 ANÁLISES ECOFISIOLÓGICAS	29
4.6.1 Trocas gasosas	29
4.6.2 Coleta de folhas	29
4.6.3 Morfologia foliar	30
4.6.4 Pigmentos cloroplastídicos.....	30
4.6.5 Conteúdo relativo de água.....	31
4.6.6 Status nutricional	31
4.7 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	32
5. RESULTADOS	34
6. DISCUSSÃO	42
7. CONCLUSÃO.....	48
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

RESUMO

Devido aos elevados índices de áreas alteradas ou degradadas na região amazônica, são necessárias ações planejadas e efetivas para sua recuperação e para estender os benefícios da iniciativa à população e à cadeia produtiva florestal. Os plantios florestais podem ser uma alternativa viável para atender tal demanda, e os sistemas de plantios que envolvem o consórcio de plantas de diferentes espécies ou grupos sucessionais podem ser ainda mais exitosos para esta finalidade. Assim, o objetivo deste trabalho foi investigar os aspectos dos sítios e as respostas ecofisiológicas e de crescimento de *Bertholletia excelsa* cultivada em diferentes sistemas de plantio sobre área alterada. O estudo foi realizado em plantios experimentais localizados na Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará, município de Marabá-PA. Nestes plantios foram aplicados os seguintes tratamentos: 1 - plantio puro de *B. excelsa*; 2 - plantio misto com o consórcio entre *B. excelsa* e Ingá (*Inga edulis*); 3 - sistema agroflorestal com a associação entre *B. excelsa*, ingá, cacau (*Theobroma cacao*), banana (*Musa* sp.), milho (*Zea mays*) e feijão (*Vigna* sp.). A partir destes tratamentos foram determinadas as taxas de sobrevivência e o crescimento no período entre outubro de 2020, junho de 2021 e setembro de 2021. Os tratamentos foram comparados quanto às mudanças na disponibilidade de recursos (água, luz e nutrientes) e a eficiência no uso destes recursos, sobrevivência e crescimento, morfologia das folhas, e respostas fisiológicas como trocas gasosas, teores de pigmentos cloroplásticos, *status* nutricional e *status* hídrico foliar. O delineamento experimental adotado foi em blocos casualizados (DBC), com três tratamentos e cinco repetições. Ao longo de 20 meses de experimentação, não houve diferenças entre os tratamentos quanto a disponibilidade de água, luz e nutrientes com exceção para a disponibilidade de magnésio (Mg) no solo, que foi maior nos sistemas agroflorestais. As plantas dos sistemas agroflorestais apresentaram maiores teores de Mg nas folhas e não foram encontradas diferenças na concentração de pigmentos cloroplásticos, contudo verificou-se que as mudas plantadas nos sistemas agroflorestais apresentam maiores valores de fotossíntese, condutância estomática e transpiração e também maior eficiência no uso de N e K, enquanto as mudas plantadas no plantio puro apresentaram maior eficiência no uso da água. As maiores taxas de sobrevivência foram observadas no sistema agroflorestal e no plantio misto. Os tratamentos não se diferenciaram em relação às taxas de crescimento. As melhores respostas ecofisiológicas para *B. excelsa* foram verificadas respectivamente nos sistemas agroflorestais e plantio misto, principalmente, em relação a trocas gasosas, ganho foliar e eficiência no uso de nutrientes, refletindo na maior sobrevivência da espécie nesses sistemas de plantio.

Palavras-chave: Castanheira da Amazônia, ecofisiologia florestal, fotossíntese, sazonalidade de precipitação; silvicultura.

ABSTRACT

Due to the high rates of altered or degraded areas in the Amazon region, planned and effective actions are needed for their recovery and to extend the benefits of the initiative to the population and the forest production chain. Forest plantations can be a viable alternative to meet such demand, and plantation systems that involve the intercropping of plants of different species or successional groups can be even more successful for this purpose. Thus, the objective of this work was to investigate the aspects of the sites and the ecophysiological and growth responses of *Bertholletia excelsa* cultivated in different planting systems on an altered area. The study was carried out in experimental plantations located at the Federal University of the South and Southeast of Pará, in the municipality of Marabá-PA. The following treatments were applied to these plantings: 1 - pure planting of *B. excelsa*; 2 - mixed planting with the consortium between *B. excelsa* and Ingá (*Inga edulis*); 3 - agroforestry system with the association between *B. excelsa*, ingá, cocoa (*Theobroma cacao*), banana (*Musa* sp.), corn (*Zea mays*) and beans (*Vigna* sp.). From these treatments, survival rates and growth were determined in the period between October 2020, June 2021 and September 2021. The treatments were compared regarding changes in resource availability (water, light and nutrients) and efficiency in the use of these resources, survival and growth, leaf morphology, and physiological responses such as gas exchange, chloroplast pigment content, nutritional status and leaf water status. The adopted experimental design was in randomized blocks (DBC), with three treatments and five replications. Over the 20 months of experimentation, there were no differences between treatments regarding the availability of water, light and nutrients, except for the availability of magnesium (Mg) in the soil, which was higher in agroforestry systems. Plants from agroforestry systems had higher levels of Mg in the leaves and no differences were found in the concentration of chloroplastic pigments, however it was found that seedlings planted in agroforestry systems have higher values of photosynthesis, stomatal conductance and transpiration and also greater efficiency in use of N and K, while seedlings planted in pure planting showed greater efficiency in water use. The highest survival rates were observed in the agroforestry system and mixed planting. The treatments did not differ in terms of growth rates. The best ecophysiological responses for *B. excelsa* were observed respectively in agroforestry and mixed planting systems, mainly in relation to gas exchange, leaf gain and nutrient use efficiency, reflecting the greater survival of the species in these planting systems.

Keywords: Chestnut tree from the Amazon, forest ecophysiology, photosynthesis, precipitation seasonality; forestry.

1. INTRODUÇÃO

A Amazônia brasileira perdeu aproximadamente 20% da sua área florestal originalmente estabelecida (INPE, 2022). Estima-se que o equivalente a 12% de florestas foi removido somente nos últimos 37 anos, o que corresponde à 44 milhões de hectares de floresta perdidos (MAPBIOMAS, 2021). Diante deste quadro de destruição, políticas públicas que incluam a recuperação de áreas alteradas ou degradadas, além de ser uma demanda global, deve ser considerada uma iniciativa crucial do Estado Brasileiro para a gestão territorial da maior floresta tropical do planeta, e para além disto estas ações devem contribuir para a redução da pressão de desflorestamento sobre as florestas nativas e também gerar novas oportunidades de emprego e renda (Nogueira *et al.* 2018; Jourgholami *et al.* 2019; FAO 2022). Na Amazônia Legal, a degradação atinge o total de 1.104.533 hectares, das quais 41% (452.910 hectares) estão situadas no Estado do Pará, principalmente nas regiões nordeste, leste e sudeste (INPE 2020). Nesta última, está inserido o território conhecido como “polígono dos castanhais” devido à abundância de castanheira da Amazônia (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) que existia nessa região, e também ao contexto histórico de extrativismo realizado com a espécie (Hentz e Maneschy 2011; Homma 2014).

Nestas áreas do Estado do Pará, o desflorestamento intensivo juntamente com as mudanças na dinâmica ocupacional e no uso do solo para exploração de outras atividades econômicas promoveram a fragmentação das populações de *B. excelsa*, levando ao isolamento dos indivíduos e, conseqüentemente, à elevada mortalidade dos remanescentes (Homma *et al.* 2000; Hentz e Maneschy 2011; Homma 2014). Os impactos dessas mudanças transformaram os castanhais em áreas alteradas e degradadas, classificadas por Bentes *et al.* (1988) como “cemitério das castanheiras”. Tal realidade expõe a necessidade de recuperação dessas áreas e, ainda, destaca o desafio em adotar medidas que integrem os aspectos ecológicos, sociais e econômicos neste processo.

Diante deste cenário, os plantios florestais têm sido apontados como iniciativas com potencial para recuperar áreas alteradas ou degradadas na Amazônia (Salomão *et al.* 2014; Jaquetti *et al.* 2014; Jaquetti *et al.* 2021). Além do potencial para a reposição dos estoques de carbono e recuperação dos processos ecológicos, esta atividade também pode reintroduzir terras até então abandonadas ao processo produtivo (Costa *et al.* 2014; Jaquetti e Gonçalves 2017; Nogueira *et al.* 2018). Sendo assim, a escolha de espécies florestais que tornem a recuperação possível tem um papel determinante no sucesso dessas iniciativas (Cunha *et al.* 2016; Guimarães *et al.* 2018; Morais Junior *et al.* 2019; Costa *et al.* 2022).

O ideal é selecionar espécies que tenham a capacidade de melhorar as condições físicas, químicas e biológicas das áreas alteradas, e que ao mesmo tempo, seus produtos e/ou derivados possuam valor comercial (Jaquetti *et al.* 2016; Morais Junior *et al.* 2019; Jaquetti *et al.* 2021). Além disso, para que o plantio seja viável, é imprescindível que as espécies possuam plasticidade aos fatores limitantes impostos pelo ambiente fortemente perturbado: elevada irradiância e temperatura, baixa disponibilidade hídrica e baixa fertilidade natural do solo (Salomão *et al.* 2013; Jaquetti e Gonçalves 2017; Jourgholami *et al.* 2019; Costa *et al.* 2019; Costa *et al.* 2022).

Tecnicamente, no que se refere a estruturação dos sistemas de plantios, na medida em que não seja possível encontrar uma única espécie que reúna várias características desejáveis, torna-se necessária a associação entre grupos de espécies que atendam as condições do sítio florestal (Caetano *et al.* 2014; Santos e Ferreira 2020). O consórcio de plantas em Sistemas Agroflorestais (SAF's) e nos plantios mistos formados por leguminosas fixadoras de nitrogênio e espécies economicamente importantes, pode ser uma alternativa viável para atender tal demanda, visando repor a fertilidade do solo, reduzir a perda de água e nutrientes, aumentar o aporte de matéria orgânica no solo, além de outros serviços ambientais, como a dispersão de frutos e sementes, assim como gerar produtos comerciais e renda (Ferreira e Tonini 2009; Oliveira *et al.* 2017). De todo modo, é necessário ponderar que o sucesso dos plantios consorciados depende das características dos sítios e da composição das espécies utilizadas na implantação do plantio.

Outra questão muito relevante está relacionada aos fatores edafoclimáticos do sítio, por exemplo, o regime de precipitação. Embora a água não seja um recurso limitante em grande parte da Amazônia, deve-se considerar as mudanças sazonais que ocorrem em algumas de suas regiões (Souza *et al.* 2016; Gomes 2018), como na região sudeste do Pará onde a disponibilidade de água pode variar de 377 mm/mês no período mais chuvoso (dezembro a abril) até 11 mm/mês no período mais seco (junho a setembro) (INMET 2019). Os plantios voltados para recuperação de áreas degradadas implantados nesta região podem ser fortemente afetados pela baixa disponibilidade deste recurso primário, tendo como consequência o baixo estabelecimento inicial das plantas no campo, uma vez que em áreas alteradas/degradadas os efeitos dos fatores estressantes tornam-se ainda mais severos. (Martins 2013; Ribeiro 2015). Por essas razões, é importante pensar em espécies e sistemas de plantios que não sejam dependentes de uma condição hídrica permanentemente favorável, o que aumenta a probabilidade de obter sucesso na implantação dos cultivos (Guimarães *et al.* 2018; Morais Junior *et al.* 2019; Shimpl *et al.* 2019).

Dentre as espécies florestais da Amazônia, a *B. excelsa* exibe características biológicas e econômicas que repercutem o grande potencial dessa espécie para integrar sistemas de plantio com a finalidade de recuperar áreas alteradas ou degradadas, tanto do ponto de vista do serviço ambiental quanto do elevado interesse da indústria florestal por seus produtos, como madeira e frutos (Salomão *et al.* 2020). Com relação aos serviços ecossistêmicos como sequestro de carbono e atração da fauna polinizadora/dispersora (Fauset *et al.* 2015; Santos-Silva *et al.* 2017). Ademais, *B. excelsa* tem sido recomendada para o cultivo em áreas alteradas ou degradadas por se mostrar tolerante à redução da disponibilidade de água e à baixa disponibilidade de nutrientes no solo, além de possuir plasticidade adaptativa a mudanças na disponibilidade de luz, promovendo crescimento e assimilação de carbono mesmo em condições estressantes que caracterizam as áreas alteradas ou degradadas (Souza *et al.* 2017; Lopes *et al.* 2019; Melo *et al.* 2018; Shimpl *et al.* 2019; Costa *et al.* 2022).

Na região amazônica, *B. excelsa* tem sido cultivada em diferentes sistemas de plantio, sendo encontradas as maiores taxas de crescimento em SAF's que, geralmente, são implantados em pequenas propriedades rurais (Soares *et al.* 2004; Costa *et al.*, 2009; Ferreira e Tonini, 2009). Em plantios mistos, há poucas experiências publicadas, porém encontra-se o registro do consórcio de *B. excelsa* com espécies do gênero *Hevea* (Caetano *et al.* 2014). No que se refere aos plantios puros têm sido realizados por empresas para a produção de madeira e frutos, onde apenas no estado do Amazonas foram plantadas 1.257.000 castanheiras (Passos *et al.* 2018).

Apesar das informações oriundas dessas iniciativas, não está claro como a espécie se comporta em diferentes sistemas de plantio em uma mesma condição de sítio. Ou seja, quais as respostas de crescimento e ecofisiológicas de *B. excelsa* em plantio puro, plantio misto e sistemas agroflorestais sobre área alterada? Quais fatores determinam o desempenho da espécie em cada um desses sistemas de plantio?

Para responder a essas perguntas norteadoras desta pesquisa, esse estudo se propõe a investigar os aspectos do sítio, bem como as respostas ecofisiológicas de *B. excelsa* cultivada em diferentes sistemas de plantio sobre área alterada. Os resultados gerados a partir deste esforço científico pode produzir importantes subsídios para a silvicultura, assim como contribuir para selecionar espécies arbóreas e indicar os melhores sistemas de plantio, os quais apresentem maior efetividade para recuperar áreas alteradas na Amazônia. Tudo considerado, cumpre-se o objetivo de inseri-las na cadeia de produção florestal, contribuindo para a redução da pressão sobre as florestais nativas e favorecer o desenvolvimento sustentável na região Amazônica.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 CONCEITOS E APLICAÇÕES

Os termos “área alterada” e “área degradada” são recorrentemente confundidos devido à semelhança do significado que as palavras sugerem, sendo que por vezes esses termos são tratados como sinônimos em algumas discussões acadêmicas. Algo semelhante ocorre com a utilização dos termos “recuperação”, “restauração” e “reabilitação”. Nesta dissertação, devido aos termos, contexto e abordagens assumirem grande relevância, uma breve discussão é apresentada sobre os conceitos e aplicações desses termos, tais como estão sendo considerados nesse trabalho.

2.1.1 Áreas Alteradas e Áreas Degradadas

A semelhança entre os termos “área alterada” e “área degradada” é evidente, todavia existem diferenças conceituais para os seus reais significados, para tentar esclarecer este assunto, é possível afirmar que o termo degradação pode ser empregado para se referir a duas situações: 1) degradação da capacidade produtiva, com a perda da produtividade econômica agrícola, pecuária ou florestal; 2) degradação ambiental/ecológica, com a existência de danos ambientais, como a perda de espécies animais e vegetais, e deterioração da biodiversidade e das funções ecológicas do ambiente (Brienza Júnior *et al.* 1995).

Concernente à legislação brasileira, o decreto nº 97.632/1989 que regulamenta o art. 2º e inciso VIII (princípio da recuperação de áreas degradadas) da lei nº 6.938/1981, define degradação como “os processos resultantes dos danos ao meio ambiente, pelos quais se perdem ou reduzem algumas de suas propriedades, tais como, a qualidade e a capacidade produtiva dos recursos ambientais” (Brasil 1981; Brasil 1989). Logo, compreende-se que um ambiente que sofreu degradação é aquele que teve danos em sua capacidade de produzir bens econômicos e/ou perdas nos seus aspectos ecológicos/ambientais.

A intensidade dessa degradação e a severidade dos danos sofridos é que vão determinar se o ambiente em questão deve ser enquadrado conceitualmente como “área degradada” ou “área alterada”. De acordo com Carpanezzi *et al.* (1988), área degradada é aquela cujos meios de regeneração bióticos (banco de sementes e plântulas, chuva de sementes, rebrota, matéria orgânica do solo e biomassa) foram eliminados juntamente com a vegetação, após a ocorrência dos distúrbios. De maneira semelhante, a Instrução Normativa ICMBIO nº 11/2014, que dispõe sobre os procedimentos para a execução de Projetos de Recuperação de Área Degradada,

conceitua área degradada como aquela área impossibilitada de retornar por uma trajetória natural a um ecossistema que se assemelhe ao estado inicial (ICMBIO 2014).

Por essas condições, denota-se que a área degradada perde a sua resiliência e, assim, necessita de intervenções para viabilizar o seu retorno ao estado anterior, ou pelo menos próximo a ele, de modo que o ambiente recupere a sua capacidade de produzir bens econômicos e sustentabilidade ambiental (Martins 2013; Almeida 2016). Isso é o que diferencia os conceitos de área degradada e área alterada, a magnitude dos distúrbios ocorridos neste último não impossibilita os seus meios de regeneração natural, sendo capaz de manter a sua resiliência e assim autorrecuperar-se (Carpanezzi *et al.* 1988; Kageyama 1992; Martins 2013).

2.1.2 Recuperação, Restauração e Reabilitação

O termo recuperação tem sido usualmente mais associado à revegetação de áreas degradadas, sem considerar o ecossistema original como parâmetro para referência. Em um contexto mais recente, além da revegetação, esse termo abrange a sustentabilidade do ecossistema alcançada pela diversidade de espécies nativas (Martins 2013). Para a legislação brasileira, recuperação é a “restituição de um ecossistema ou de uma população silvestre degradada a uma condição não degradada, que pode ser diferente de sua condição original”, de modo que o objetivo seja “a obtenção de uma estabilidade do meio ambiente” (Brasil 1989; 2000).

Em se tratando do termo restauração, recentemente, o emprego desta conceituação tem sido no sentido de restauração ecológica, com ênfase no estabelecimento dos processos ecológicos responsáveis pela construção gradual dos ecossistemas, tendo o ecossistema original como orientação referencial (Martins 2013). No meio acadêmico, esse termo tem sido utilizado tanto no sentido restrito (retorno do sítio a uma condição ecológica original), como também estabelece a legislação brasileira (Brasil 2000), quanto no sentido amplo (restaurar a integridade ecológica do ecossistema a longo prazo) (Martins 2013; Ribeiro 2015). Segundo Almeida (2016), o uso no sentido restrito é apenas um marco teórico, visto que dificilmente se consegue proporcionar as características originais ao ambiente. Por essa razão, Martins (2013) esclarece que muitos pesquisadores preferem usar o termo recuperação, e adotar projetos simplificados de revegetação com poucas espécies, por meio de técnicas agrônômicas e silviculturais.

O termo reabilitação é menos utilizado que os demais, e se refere à atribuição a áreas degradadas de uma ou mais funções adequadas ao uso humano, de modo a restabelecer as suas principais características e conduzi-las a uma situação alternativa e estável (Martins 2013). Nesse caso, não se tem necessariamente o objetivo de reconstituir a vegetação original, as ações

podem ser basicamente para tornar possível os usos alternativos, sejam eles apenas atividades econômicas, recreativas e/ou de valorização estético-ecológica (Ribeiro 2015; Almeida 2016).

2.2 ÁREAS ALTERADAS E A DEGRADAÇÃO NA AMAZÔNIA

O processo histórico de degradação na Amazônia foi motivado, principalmente, pela ação antrópica por meio da exploração dos recursos naturais abundantes nesta região, além do interesse em colonizá-la e converter o uso do solo em infraestrutura e/ou atividades de cunho econômico (Scoles *et al.* 2016; Gonçalves *et al.* 2019; Silva *et al.* 2020). Assim, as áreas na Amazônia foram destinadas, principalmente, ao emprego da agricultura, pecuária, extração madeireira, mineração e instalação de complexos hidrelétricos (Salomão *et al.* 2013; Salomão *et al.* 2014; Brown *et al.* 2016; Santos *et al.* 2018; Fearnside 2019; Salomão *et al.* 2020; Siqueira-Gay *et al.* 2020). Mais recentemente, os plantios de soja, dendê e eucalipto também foram inseridos a essa gama de atividades (Silva *et al.* 2020).

No contexto amazônico, as áreas alteradas são na sua maioria representadas por terras abandonadas após o uso na agricultura migratória, pecuária e extração seletiva de madeira (Brown *et al.* 2016; Almeida *et al.* 2016; Nogueira *et al.* 2018; Siqueira-Gay *et al.* 2020). Tais atividades, guardadas as devidas proporções e características particulares, têm como aspectos em comum o usufruto dos recursos naturais e a influência direta ou indireta no aumento do desflorestamento na Amazônia (INPE 2016; Waldhoff e Vidal 2019; INPE 2019).

Em termos de desflorestamento nessa região, o estado do Pará tem tido destaque, apenas em 2019 esse território teve 3.862 km² de perda florestal, valor superior em 41% quando comparado ao ano anterior (INPE 2019). Esse aumento decorre, principalmente, do enfraquecimento das políticas de proteção ambiental no país, o que tem contribuído para o crescimento da degradação (Fearnside 2019). A seguir a Tabela 1 é possível verificar o quantitativo de áreas que foram desflorestadas e/ou que sofreram degradação na Amazônia Legal. De maneira mais pragmática, as informações resultados abaixo ratificam os impactos continuados pela mudança do uso da terra que são historicamente registrados no chamado arco do desmatamento, que também é ilustrado na Figura 1.

Tabela 1: Quantitativo de desflorestamento e da degradação na Amazônia Legal.

ESTADO	DESFLORESTAMENTO*		DEGRADAÇÃO**	
	Área (ha)	Área (%)	Área (ha)	Área (%)
Pará	6.308.800	39,26	452.910,22	41,00
Mato Grosso	4.308.200	26,81	411.704,88	37,27

Rondônia	2.229.100	13,87	73.296,93	6,64
Amazonas	1.243.800	7,74	59.801,18	5,41
Maranhão	834.000	5,19	18.538,50	1,68
Acre	571.600	3,56	23.056,61	2,09
Roraima	386.400	2,40	56.940,98	5,16
Tocantins	124.300	0,77	4.182,00	0,38
Amapá	64.000	0,40	4.102,61	0,37
TOTAL	16.070.200	100,00	1.104.533,91	100,00

Fonte: INPE (2019)*; INPE (2020)**.

Além do destaque em relação ao desflorestamento, verifica-se que o Pará também é o estado que mais sofreu degradação na Amazônia Legal (Tabela 1). Para demonstrar uma visão espacial sobre essas questões, a Figura 1 destaca como o desflorestamento e a degradação estão distribuídos no território amazônico.

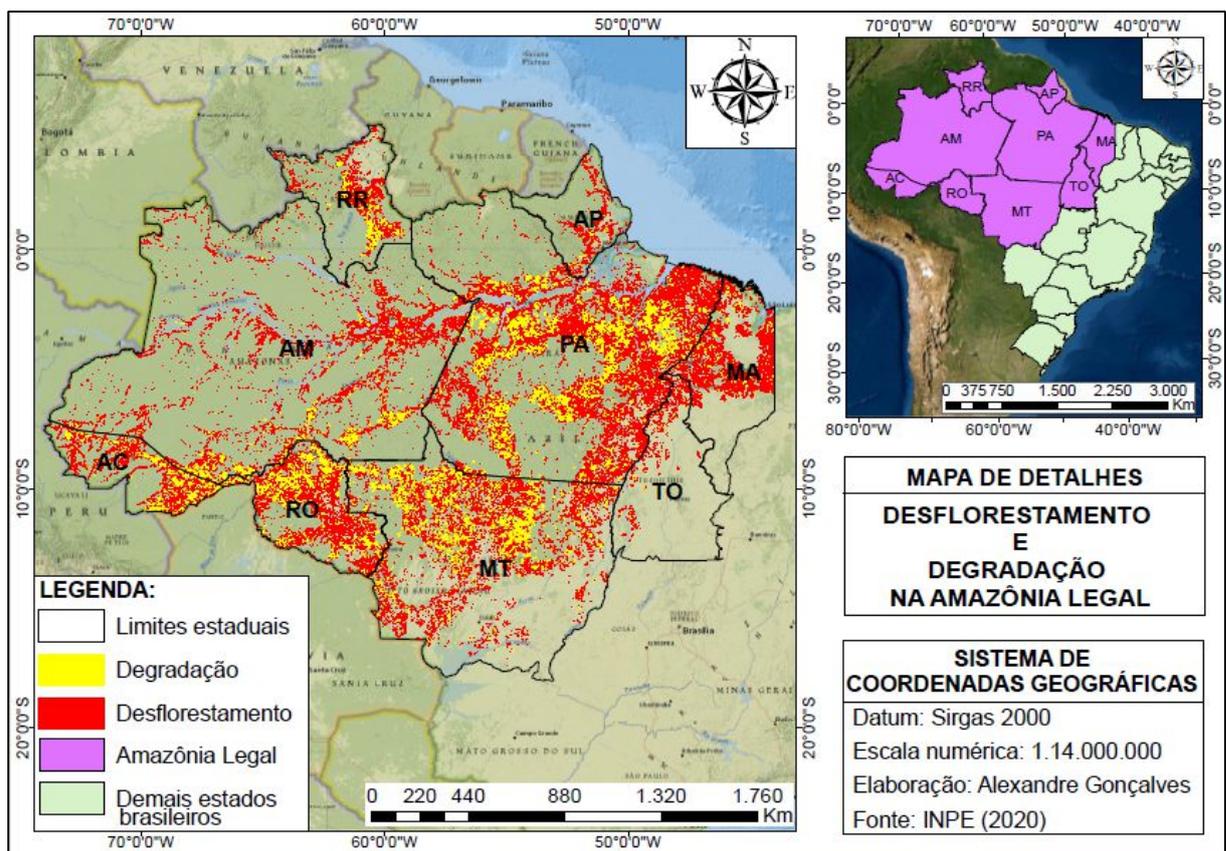


Figura 1: Distribuição do desflorestamento e da degradação na Amazônia Legal.

Ao observar a distribuição da degradação na Amazônia Legal torna-se mais evidente que áreas impactadas do “arco do desmatamento” se reproduzem de maneira generalizadas e são ampliados em todas as direções, incluindo áreas desde o oeste do Maranhão, passando pelo sul e sudeste do Pará, e seguindo por parte estados do Amazonas, Mato Grosso, Rondônia e

Acre. Apesar de que nem todo desflorestamento é considerado como degradação pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE 2020), sugere-se que ambos têm uma relação direta. Isso se explica pelo processo histórico de substituição das áreas de floresta por atividades econômicas na Amazônia, que causaram intensa degradação (Santos *et al.* 2018; Fearnside 2019; Gonçalves *et al.* 2019; Salomão *et al.* 2020; Siqueira-Gay *et al.* 2020).

Do ponto de vista ecológico, a consequência dessa degradação se reflete na destruição de habitats e ecossistemas, perda da biodiversidade e redução da disponibilidade de recursos naturais (Andersen 2015; Brown *et al.* 2016). Isso impacta diretamente a qualidade de vida das pessoas, sobretudo pela indisponibilidade de recursos essenciais para a sobrevivência humana, como por exemplo a disponibilidade de água potável (Fearnside 2019). Os malefícios se estendem também ao âmbito econômico, visto que essas áreas perdem a sua capacidade produzir bens econômicos (Rodrigues *et al.* 2018). Sendo assim, essa realidade reforça a necessidade de intervenções visando a recuperação dessas áreas, como forma de estratégia de gestão territorial e promoção do desenvolvimento sustentável na região (Sathler *et al.* 2018). Diante dos cenários dinâmicos com o desflorestamento, entende-se que o nível de mudança do uso da terra na Amazônia propicia alterações consideráveis no ambiente das plantas e induzem na vegetação a necessidade de tolerar ambientes com baixa de disponibilidade de recursos.

2.3 SAZONALIDADE DA PRECIPITAÇÃO E OS PLANTIOS FLORESTAIS

Em regiões tropicais, as alterações ocorridas nos regimes de precipitação e de luz são os principais representantes dos eventos de sazonalidade (Souza *et al.* 2016; Jiménez-Muñoz *et al.* 2016; Gomes 2018). Tendo em vista que esses regimes são fornecedores de recursos primários, as suas mudanças podem ocasionar diversas modificações processos fisiológicos das plantas (Nascimento *et al.* 2019). A baixa disponibilidade de água no solo durante períodos de menor precipitação, impulsiona a ocorrência de alterações no desempenho fotossintético das plantas, devido à limitação na condutância estomática foliar (Taiz *et al.* 2017).

Dessa maneira, a disponibilidade de água no solo representa um fator crucial para o sucesso dos plantios florestais, podendo a sua redução culminar em baixo estabelecimento inicial das plantas em campo (Taiz *et al.* 2017; Nascimento *et al.* 2019). Além disso, devido às condições de sítio, plantios florestais sobre áreas alteradas ou degradadas podem sofrer ainda mais com os efeitos da seca (Martins 2013; Ribeiro 2015). Portanto, considerando-se os benefícios dos diferentes arranjos que as plantas alvo dos plantios estejam dispostas, a associação de plantas de diferentes grupos sucessionais e hábitos de crescimento em sistemas agroflorestais e plantios mistos formados por leguminosas fixadoras de nitrogênio e outras

espécies pode representar alternativa viável para minimizar estes efeitos estressantes do meio e produzir resultados valorosos do ponto de vista comercial (Ferreira e Tonini 2009; Viera *et al.* 2013).

No caso das associações de plantas em diferentes sistemas de plantios, a redução dos efeitos indesejados do meio ocorre em função do microclima criado pela formação de extratos vegetais com as espécies constituintes, a cobertura vegetal ameniza a perda de água do ambiente para a atmosfera. (May e Trovatto 2008) Outro fator de influência é representado pela deposição de matéria orgânica e a incorporação de nitrogênio no solo, que contribuem para a melhoria do *status* nutricional das plantas, sendo que a matéria orgânica ainda proporciona a retenção da umidade no solo, tanto em maior quantidade quanto por mais tempo (Viera *et al.* 2013; Paula *et al.* 2016).

Em espécies florestais que possuem elevada plasticidade fisiológica, como é o caso de *B. excelsa*, a tendência é que os efeitos do status hídrico possa assumir outra característica voltar para potencializar o aumento do ingresso de CO₂ sem depender sobremaneira da transpiração, devido às estratégias morfofisiológicas desenvolvidas pela espécie (Ferreira *et al.* 2012; Shimpl *et al.* 2019). Os estudos têm demonstrado que essas estratégias objetivam a regulação osmótica da planta, que por um lado pode reduzir a perda de água pelo processo transpiratório, aumentar a eficiência no uso da água, mas por outro lado também pode aumentar o influxo de nutrientes e, por conseguinte, melhorar a performance da fotossíntese (Ferreira *et al.* 2012; Silva *et al.* 2016; Shimpl *et al.* 2019) e de outros de outros processos fisiológicos devido ao melhor uso dos recursos primários (Ferreira *et al.* 2016; Lopes *et al.* 2019). Tais fatores somados aos diferentes serviços ecossistêmicos (Fauset *et al.* 2015; Santos-Silva *et al.* 2017) e a geração de produtos economicamente importantes (Krag *et al.* 2017) tornam a espécie com grande potencial para compor plantios florestais com a finalidade de recuperar áreas alteradas ou degradadas e apoiar a sustentabilidade florestal na Amazônia (Costa *et al.* 2009; Salomão *et al.* 2020).

2.4 DESEMPENHO DE *Bertholletia excelsa* EM ÁREAS ALTERADAS/DEGRADADAS

Vários estudos têm apontado *B. excelsa* como uma das espécies mais promissoras para o uso em reflorestamento, destacando a sua aptidão para compor plantios produtivos com a finalidade de recuperar áreas alteradas ou degradadas na Amazônia (Ferreira *et al.* 2009; 2012; Scoles e Gribel 2012; Salomão *et al.* 2013; 2014; Scoles *et al.* 2014; Ferreira *et al.* 2016; Souza *et al.* 2017; Melo *et al.* 2018; Nogueira *et al.* 2018; Shimpl *et al.* 2019; Silva *et al.* 2020). A rigor, os plantios de *B. excelsa* representam alternativa sustentável de cultivo de uma espécie

nativa e ecologicamente importante (Fauset *et al.* 2015; Santos-Silva *et al.* 2017), ao passo que se recupera áreas alteradas e degradadas (Scoles *et al.* 2014; Salomão *et al.* 2013; 2014; Melo *et al.* 2018). O cultivo da *B. excelsa* tem elevada capacidade de produzir bens econômicos e serviços ambientais (Ferreira e Tonini 2009; Krag *et al.* 2017; Oliveira *et al.* 2017; da Costa *et al.* 2022).

A espécie tem apresentado altas taxas de sobrevivência, além de crescimento em diâmetro e altura satisfatório em plantios sobre áreas alteradas (Scoles *et al.* 2011;2014; Nogueira *et al.* 2018; Silva *et al.* 2020) e áreas degradadas (Ferreira *et al.* 2012; Salomão *et al.* 2014; Melo *et al.* 2018). A sobrevivência registrada tem sido superior a 95% em plantios jovens com 10 meses de idade (Silva *et al.* 2020), e de até 90% naqueles com idade de seis anos (Scoles *et al.* 2014). O percentual de sobrevivência de *B. excelsa* é maior, inclusive, que o de espécies nativas como Mogno (*Swietenia macrophylla*), Breu sucuruba (*Trattinickia burseraefolia*) (Souza *et al.* 2008) e Taxi-branco (*Sclerolobium paniculatum*) (Souza *et al.* 2010), e semelhante a espécies exóticas de alto desempenho como *Eucalyptus urograndis*, quando plantados nas mesmas condições de sítio (Matos *et al.* 2012).

Em se tratando de crescimento, há registros de incremento médio anual (IMA) em diâmetro e altura de 0,96 cm ano⁻¹ e 0,78 m ano⁻¹ após vinte anos de plantio, respectivamente (Salomão *et al.* 2014). Esse fator é bastante interessante quando o objetivo do plantio é obter maior incremento de volume de madeira, por exemplo. Nesse quesito, *B. excelsa* supera outras espécies nativas de alto valor econômico e/ou fornecedoras de múltiplos produtos como Mogno (*Swietenia macrophylla*), Copaíba (*Copaifera multijuga*), Cumaru (*Dipteryx odorata*), Cedro (*Cedrela odorata*) e Breu sucuruba (*Trattinickia burseraefolia*) (Souza *et al.* 2008).

B. excelsa tem demonstrado capacidade para sobreviver e se estabelecer de maneira eficiente, além de promover crescimento e assimilação de carbono em ambientes que sofreram degradação (Scoles *et al.* 2011; 2014; Souza *et al.* 2017; Melo *et al.* 2018). Isso decorre da tolerância da castanheira ao estresse causado pela alta irradiância, elevada temperatura, baixa disponibilidade hídrica e baixa fertilidade natural do solo (Silva *et al.* 2016; Lopes *et al.* 2019; Shimpl *et al.* 2019). Essa tolerância é proveniente das estratégias morfológicas e fisiológicas desenvolvidas pela espécie, que lhe permite superar situações de estresse, ao passo que lhe confere plasticidade fisiológica (Costa *et al.* 2022).

A plasticidade fisiológica da espécie se reflete em sua capacidade de se estabelecer e crescer em diversos ambientes, que inclui áreas alteradas, áreas degradadas, sub-bosque florestal, plantios puros, plantios mistos, sistemas agroflorestais, além de áreas alagadas como foi constatado recentemente (Tourne *et al.* 2019). Dessa maneira, em condições desfavoráveis

de luz, por exemplo, a espécie ajusta as seguintes características funcionais em ordem de importância: 1) massa foliar específica, 2) respiração no escuro, 3) condutância estomática e 4) carboidratos; de modo a favorecer sua sobrevivência e crescimento (Lopes *et al.* 2019). Assim, plantas jovens de *B. excelsa* ao serem submetidas a níveis de irradiância que vão de moderados a elevados, desenvolvem as seguintes estratégias adaptativas: reduzem a área foliar específica, aumentam a assimilação de CO₂, particionam maior quantidade de biomassa para as raízes e, dessa maneira, tornam possível o crescimento e o acúmulo de biomassa (Souza *et al.* 2017).

Em geral, os estudos com *B. excelsa* evidenciam a sua eficiência no uso dos recursos primários (água, luz e nutrientes), sendo este um dos fatores responsáveis por grande parte do sucesso no estabelecimento inicial de suas plantas em áreas degradadas, haja vista que contribui para a superação das situações de estresse nessas condições de sítio (Ferreira *et al.* 2012; 2016; Silva *et al.* 2016; Shimpl *et al.*, 2019). Assim, tal fator somado à capacidade de suportar estresse e à plasticidade fisiológica de *B. excelsa*, reforçam o potencial da espécie para compor plantios sobre áreas alteradas ou degradadas (Costa *et al.* 2022).

2.4 *Bertholletia excelsa* EM SISTEMAS DE PLANTIO

A castanheira tem sido cultivada em diferentes sistemas de plantio, tendo a maior concentração de experiências publicadas oriundas de estudos na Amazônia Legal (Fernandes e Alencar, 1993; Yared *et al.* 1993; Vieira *et al.* 1998; Soares *et al.* 2004; Tonini e Arcoverde 2005; Tonini *et al.* 2005; Costa *et al.* 2009; Ferreira e Tonini, 2009; Scoles *et al.* 2014; Locatelli *et al.* 2015; Passos *et al.* 2018). No entanto, existem também publicações sobre experiências situadas na Amazônia internacional e na região sudeste do Brasil (Frank e Cruz 1996; Peña-Claros *et al.* 2002; Caetano *et al.* 2014) (Figura 2).



Figura 2: Distribuição das experiências publicadas com *Bertholletia excelsa* em diferentes sistemas de plantio.

Os plantios puros representam o maior número de experiências publicadas com *B. excelsa* cultivada em sistema de plantio, seguidos pelos sistemas agroflorestais e plantios mistos, e os plantios de enriquecimento, respectivamente. (Figura 2). As experiências desta natureza podem ser consideradas como importantes estratégias para verificar o desempenho de espécies cultivada em diferentes sistemas de plantio para ações que visem a recuperação de áreas alteradas ou degradadas. Embora, existam experiências com *B. excelsa* nesses diferentes sistemas de plantio ao longo da região Amazônica e em outras regiões da Amazônia internacional ou mesmo no Brasil, ainda não se sabe qual sistema de plantio a espécie apresenta melhor desempenho sobre áreas alteradas, ou mesmo quais fatores determinam o desempenho da espécie nesses diferentes sistemas de plantio.

2.4.1 Sistemas Agroflorestais

Os Sistemas Agroflorestais (SAF's) consistem em formas de uso da terra que integram espécies perenes lenhosas com culturas agrícolas e/ou criação de animais em arranjos espaciais e temporais, abrangendo diversas modalidades de cultivo (May e Trovatto 2008; Paula *et al.* 2016). A associação de espécies de diferentes grupos nesses sistemas de plantio tem o objetivo

de diversificar a produção, garantir o uso sustentável da terra e ainda impulsionar a produtividade (Oliveira *et al.* 2017). Do ponto de vista das regulamentações ambientais, a implantação dos SAF's também pode servir como recomposição de áreas de reserva legal e de preservação permanente no âmbito da agricultura familiar para atender a legislação vigente (Brasil 2012)

O cultivo de *B. excelsa* em SAF's na Amazônia tem sido relatado na literatura (Vieira *et al.* 1998; Soares *et al.* 2004; Costa *et al.* 2009; Ferreira e Tonini 2009). Ao ser inserida nesses sistemas, a castanheira representa uma das espécies mais importantes do cultivo, tendo em vista a geração de produtos economicamente valiosos (madeira e frutos) e o fornecimento de serviços ecossistêmicos que contribuem para as interações e o estabelecimento da biodiversidade no local (Fauset *et al.* 2015; Scoles *et al.* 2016; Oliveira *et al.* 2017; Santos-Silva *et al.* 2017). Essas interações culminam em melhorias nas condições físicas, químicas e biológicas do solo, o que demonstra o grande potencial da espécie para integrar esses sistemas de plantio, assim como para recuperar áreas alteradas e reinseri-las ao processo produtivo (Costa *et al.* 2009).

Aliado a esses fatores, *B. excelsa* tem alcançado as maiores taxas de crescimento e sobrevivência em sistemas agroflorestais (Vieira *et al.* 1998; Soares *et al.* 2004; Costa *et al.* 2009; Ferreira e Tonini, 2009). A exemplo disso, Vieira *et al.* (1998) registraram crescimento (em diâmetro e altura) superior da espécie em SAF's com 10 anos de idade quando comparados ao monocultivo, onde a castanheira alcançou IMA de diâmetro e altura iguais a 3,20 cm e 2,23 m, respectivamente, com árvores de até 23 m de altura e 32 cm de diâmetro. Além disso, há registro de *B. excelsa* com até 98,6% de sobrevivência em SAF's, após 10 anos do plantio (Ferreira e Tonini 2009).

2.4.2 Plantios Mistos

Os plantios mistos ou consórcios são entendidos na maioria dos trabalhos científicos como a associação entre duas espécies florestais plantadas na mesma linha ou linhas intercaladas em uma mesma área, com a finalidade aumentar a produtividade em relação aos seus respectivos monocultivos e proporcionar serviços ambientais (Viera *et al.* 2013). No Brasil, os plantios mistos são majoritariamente formados por espécies florestais, e dentre estas, recorrentemente está incluída uma leguminosa fixadora de nitrogênio (Viera *et al.* 2013), tal como ocorre nesse trabalho. Além dessa definição, alguns trabalhos também enquadram nesse sistema de plantio os consórcios entre uma espécie florestal e outra agrícola, partindo do pressuposto da pouca diversidade de espécies na área e da junção entre dois monocultivos (Locatelli *et al.* 2015; Oliveira *et al.* 2016).

Considerando essas conceituações, verifica-se que informações sobre o cultivo de *B. excelsa* nesses sistemas de plantio ainda são escassas. Todavia, nesses consórcios, a castanheira é mais comumente associada a espécies do gênero *Hevea* ou a culturas agrícolas como a mandioca (*Manihot esculenta* Crantz) e o cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* (Willd. Ex Spreng.) Schum) (Caetano *et al.* 2014; Scoles *et al.* 2014; Locatelli *et al.* 2015). Assim como ocorre nos demais sistemas de plantio, tem sido observado excelente desempenho de crescimento em altura e diâmetro, bem como altas taxas de sobrevivência da espécie cultivada em consórcios.

O registro do crescimento em diâmetro, altura e volume, corresponde ao incremento médio anual de 2,05 cm, 1,0 m e 9,59 m³/ha, respectivamente (Locatelli *et al.* 2015). Esse crescimento é acelerado em relação a outras espécies nativas (Souza *et al.* 2008; 2010). A sobrevivência da espécie nesse sistema de plantio é elevada, sendo de até 100% no 1º ano do plantio, decrescendo para 90% no 6º ano, e ficando estável em 80% a partir do 28º ano (Scoles *et al.* 2014; Locatelli *et al.* 2015). Tais informações reforçam as inferências constantes na literatura sobre a aptidão de *B. excelsa* para compor diferentes sistemas de plantio, com a finalidade de reflorestar e recuperar áreas alteradas ou degradadas na região amazônica.

2.4.3 Plantios Puros

Os plantios puros ou homogêneos se caracterizam pelo cultivo planejado de uma única espécie. Nesse sistema de plantio estão concentradas as maiores experiências com o cultivo de *B. excelsa*, existindo extensos plantios distribuídos pela região amazônica (Fernandes e Alencar, 1993; Yared *et al.* 1993; Tonini e Arcoverde 2005; Tonini *et al.* 2005; Locatelli *et al.* 2015; Passos *et al.* 2018). A exemplo disso, no município de Itacoatiara - AM, a Fazenda Aruanã (Empresa Agropecuária Aruanã S. A.) possui 1.257.000 árvores de *B. excelsa* plantadas, sendo que deste total 318 mil foram cultivadas para a produção de frutos e 939 mil com o objetivo de produzir madeira em plantios adensados (Passos *et al.* 2018).

Diversos autores constataram o elevado crescimento da castanheira em relação a outras espécies, além das altas taxas de sobrevivência em plantios puros (Fernandes e Alencar 1993; Yared *et al.* 1993; Vieira *et al.* 1998; Tonini e Arcoverde 2005; Tonini *et al.* 2005). Em termos de crescimento nesse sistema de plantio, *B. excelsa* se destaca com os maiores valores de incremento médio anual em diâmetro e volume comercial, superando outras espécies nativas como a Andiroba (*Carapa guianensis*), o Ipê-roxo (*Tabebuia avellanadae*) e o Jatobá (*Hymenaea courbaril*) (Tonini *et al.* 2005). Além disso, há registro da espécie mantendo 95,4%

de sobrevivência em plantio puro com 10 anos de idade, resultado bastante satisfatório quando se considera investimentos em plantios produtivos (Vieira *et al.* 1998).

O bom desenvolvimento da castanheira em plantios puros pode estar ligado, dentre outros fatores, a características ecológicas intrínsecas que influem na sua distribuição espacial e na estrutura populacional da espécie no ambiente (Fernandes e Alencar 1993). De acordo com Mori e Prance (1990), *B. excelsa* é uma espécie com tendência à formação de aglomerações com alta densidade de indivíduos, sendo geralmente encontradas em grupos que formam os chamados “castanhais”. Assim, verifica-se que a presença de várias castanheiras juntas, já é algo que faz parte de seu comportamento natural em povoamentos florestais e pode ser mimetizado nas condições de plantio.

3. OBJETIVOS

3.1 OBJETIVO GERAL

Investigar os aspectos dos sítios e as respostas de crescimento e ecofisiológicas de *Bertholletia excelsa* cultivada em diferentes sistemas de plantio sobre área alterada.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- I. Avaliar a disponibilidade de luz, água, nutrientes e matéria orgânica em plantios puros, plantios mistos e sistemas agroflorestais.
- II. Determinar a sobrevivência e o crescimento de *Bertholletia excelsa* em plantios puros, plantios mistos e sistemas agroflorestais.
- III. Avaliar as características ecofisiológicas de *Bertholletia excelsa* em plantios puros, plantios mistos e sistemas agroflorestais.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada no campus experimental da Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará (UNIFESSPA), entre as coordenadas latitude de 5°21'49.5" S e longitude 49°01'11" W, município de Marabá, região sudeste do estado do Pará (Figura 3).

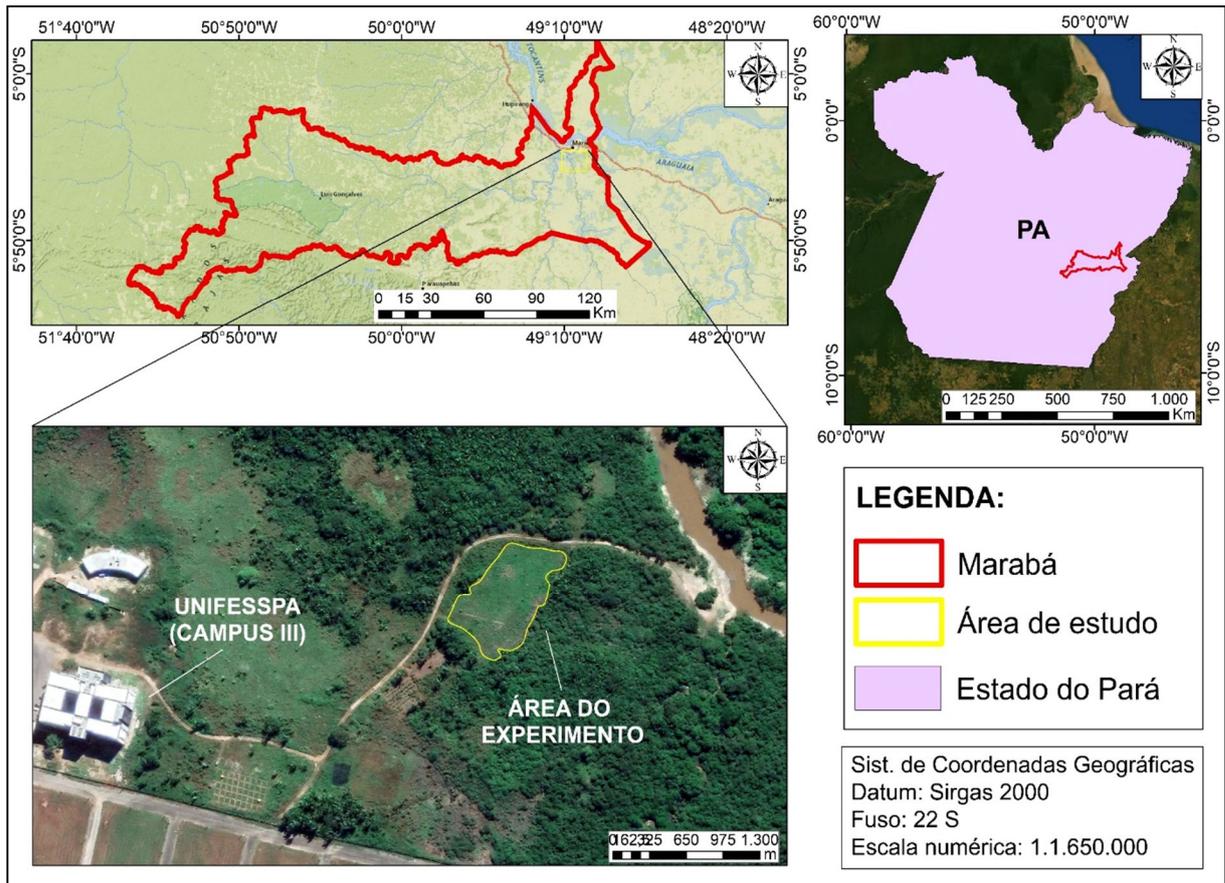


Figura 3: Localização geográfica da área de estudo.

O clima é tropical semi-úmido (Am), segundo a classificação de Köppen (1948), com temperatura média anual de 28 °C e precipitação anual na ordem de 1.400 mm. O período de maior precipitação é de janeiro a abril e o de menor precipitação de junho a setembro, quando se registra temperatura média de 26 °C e 32°C e precipitação média mensal de 298 mm e 26 mm, respectivamente (INMET 2019). O solo predominante é do tipo Argissolo Vermelho-Amarelo com condição distrófica (Santos *et al.* 2011). O município está situado em área de planície fluvial (depressão interplanáltica do Araguaia-Tocantins), estando o terreno do experimento em relevo predominantemente plano.

A área originalmente foi um castanhal nativo, estando incluída na região do Polígono dos castanhais. Por volta da década de 70, os castanhais foram removidos e substituídos por pastagem para a criação de gado e atividades agrícolas e, em seguida, a área foi abandonada. No ano de 2010, a área foi vendida para um grupo imobiliário que em 2011 a transformou em loteamento urbano, entretanto, uma área de aproximadamente 5,0 hectares foi doada para a UNIFESSPA, constituindo-se a área experimental desta universidade. Neste período, a paisagem do terreno era formada por pasto sujo com algumas áreas de capoeira, até que foi modificada por um grande incêndio ocorrido em 2017. Desde então, a área permaneceu abandonada até 2020, quando foi iniciado o processo de recuperação a partir da implantação de sistemas de plantio com mudas de *B. excelsa* e outras espécies florestais e agrícolas.

Os plantios foram realizados no período de 04 a 15 de janeiro de 2020. No primeiro ano de plantio ocorreu dois períodos de alagamento da área (Figura 4), o primeiro ocorreu 63 dias após plantio, e o segundo ocorreu 24 dias após o fim do primeiro alagamento. A duração do primeiro alagamento foi de 8 dias e do segundo alagamento cerca 11 dias. No segundo ano de plantio não houve alagamento, contudo, o encharcamento do solo foi constatado.

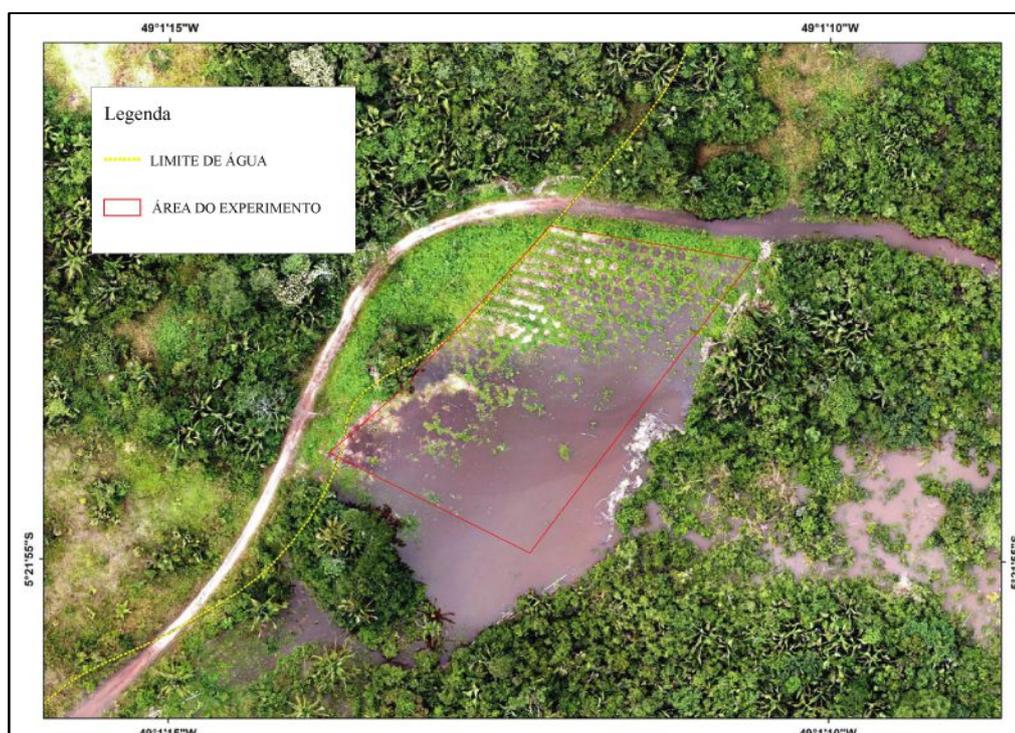


Figura 4: Croqui dos diferentes sistemas de plantio com *Bertholletia excelsa*.

4.2 TRATAMENTOS

Neste estudo, foram avaliados três tratamentos que consistem em diferentes sistemas de plantios. Cada tratamento corresponde a um arranjo experimental medindo 15 x 15 m (225 m²), sendo os tratamentos: plantio puro de *B. excelsa*; plantio misto com o consórcio entre *B. excelsa* e Ingá (*Inga edulis* Mart.); e sistema agroflorestal com a associação entre *B. excelsa*, ingá, cacau (*Theobroma cacao* L.), banana (*Musa* sp.), milho (*Zea mays* L.) e feijão (*Vigna* sp.) (Figura 5).

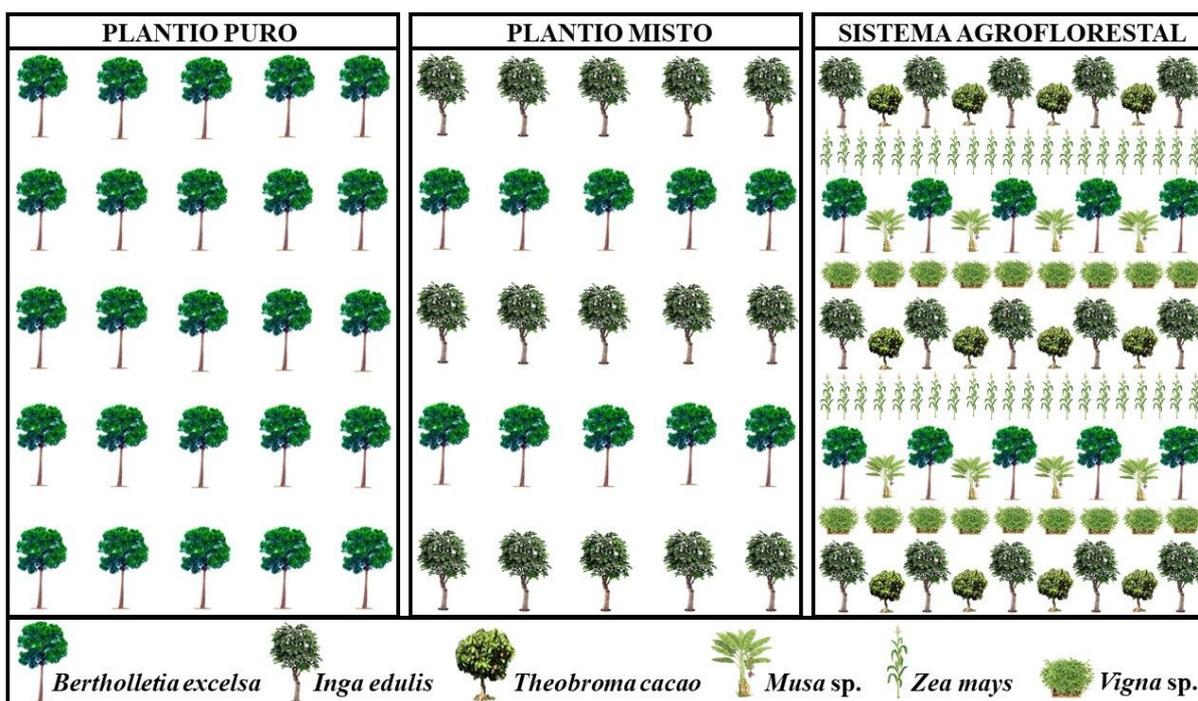


Figura 5: Croqui dos diferentes sistemas de plantio com *Bertholletia excelsa*.

Para o plantio puro e o plantio misto o espaçamento utilizado entre as plantas foi de 3 x 3 m. No sistema agroflorestal foram adotados os seguintes espaçamentos: 1º) entre castanheira e ingá de 3 x 3 m, 2º) entre castanheira e bananeira de 3 x 1,5 m, e 3º) entre ingá e cacau de 3 x 1,5 m. O tamanho das covas foi de 40 x 40 x 40 cm, e no momento do plantio foi aplicado 200 g de calcário dolomítico (PRNT de 90%), 100 g de NPK e 4 kg de esterco bovino que foram incorporados ao solo.

Em seguida, no período de 06 a 12 de fevereiro de 2020, foi inserido milho (espaçamento 0,70 x 0,70 m) e o feijão (espaçamento 0,50 x 0,30 m) no sistema agroflorestal, sendo plantados nas entrelinhas das árvores (Figura 4). O milho e o feijão foram colhidos durante a primeira limpeza da área (27 a 29 de abril de 2020), tendo os seus restos vegetais mantidos sobre o solo como adubação orgânica.

4.3 COLETA DE DADOS

Excetuando-se as análises de sobrevivência e o crescimento das plantas de *B. excelsa* nos tratamentos, a coleta de dados para todas as demais avaliações foi realizada nos períodos conforme a normal climatológica da região ilustrada pela Figura 5.

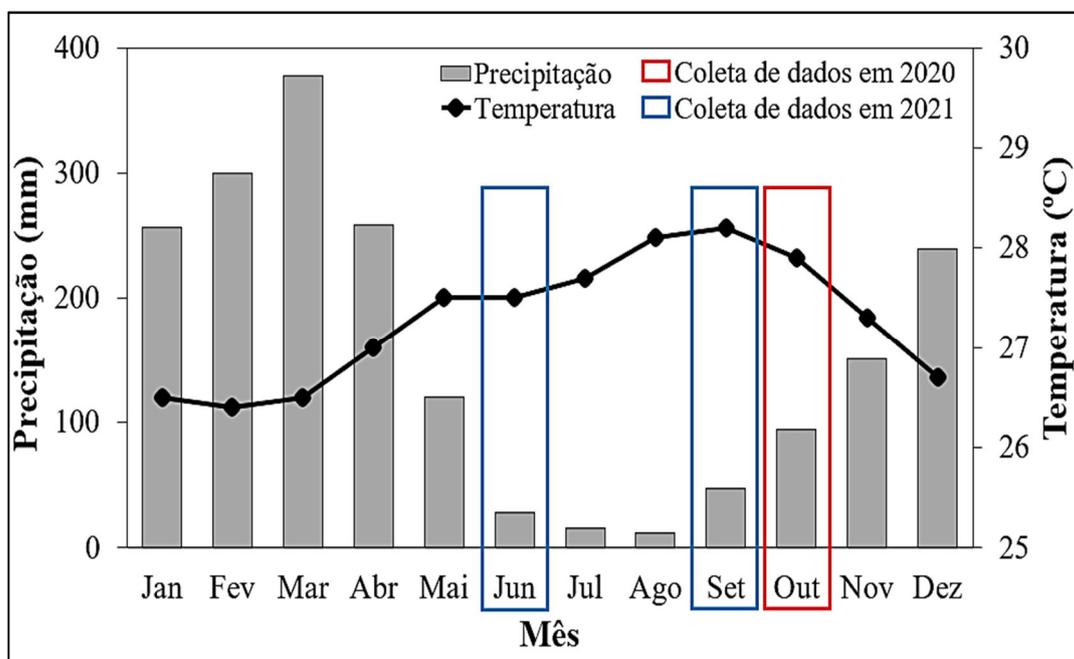


Figura 6: Normal climatológica da região de estudo.

Fonte: INMET (2019).

4.4 DISPONIBILIDADE DE RECURSOS

A disponibilidade de luz foi avaliada por meio de medidas da radiação fotossinteticamente ativa (PAR), determinadas através do sensor PAR do analisador de gás a infravermelho (IRGA) portátil. Estas medições foram realizadas à altura das folhas de cada planta analisada, ocorrendo esta avaliação simultaneamente com as medidas de trocas gasosas.

A disponibilidade de nutrientes foi determinada a partir de amostras de solo coletadas em profundidade de 0-10 cm, em pontos aleatórios posicionados nas entrelinhas dos sistemas de plantio. Em cada parcela foram coletadas 3 amostras em zigue-zague, visando formar uma amostra composta. Estas amostras foram processadas e analisadas no Laboratório Temático de Solos e Plantas do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), quantificando os teores de macro (N, P, K, Ca e Mg) e micronutrientes (Fe, Zn e Mn), matéria orgânica, umidade e o $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$.

A determinação de N total foi realizada de acordo com o método de Kjeldahl (Embrapa 1999). As extrações de Ca, Mg e Al foram feitas a partir de uma solução extratora de KCl 1 M,

sendo Al, Ca e Mg determinados por espectrofotometria de absorção atômica com chama (Perkin-Elmer 1100B) (Embrapa 1999). A extração dos macronutrientes P e K e dos micronutrientes Fe, Zn e Mn foi feita com solução de Mehlich 1 (HCl 0,05 M + H₂SO₄ 0,0125 M), sendo P determinado por espectrofotometria ($\lambda=720$ nm) conforme Murphy e Riley (1962), e os demais nutrientes por espectrofotometria de absorção atômica com chama (Embrapa 1999).

O teor de matéria orgânica foi determinado conforme o método Walkley e Black modificado (Leite *et al.* 2004; Embrapa 1997). Para analisar o pH_{H₂O} foi utilizada uma solução de solo e água (1:2,5), na qual ocorreu a imersão de eletrodo combinado para a leitura das amostras em pHmetro, após 1 minuto de agitação das amostras e 1 hora de repouso da solução (Embrapa 1999). Já o teor de umidade do solo foi determinado pelo método higroscópico em três amostras coletadas por parcela (triplicata) em pontos aleatórios e na profundidade de 0-10 cm (Embrapa 1997).

4.5 SOBREVIVÊNCIA E CRESCIMENTO

A sobrevivência e as medidas biométricas foram determinadas com base no censo realizado a cada 120 dias, durante os 24 meses de período experimental, totalizando 6 medições. Ao longo do monitoramento foram contabilizados os indivíduos vivos e o número de lançamentos foliares, bem como medida a altura total utilizando fita métrica (precisão = 0,3 mm) e o diâmetro à altura do solo (DAS) através de paquímetro digital (precisão = 0,02 mm).

A partir da contagem dos indivíduos vivos, foi obtida a porcentagem de sobrevivência. As demais medições foram utilizadas para calcular o crescimento das plantas através das taxas de crescimento absoluto (TCA) e relativo (TCR) e do índice de ganho foliar (IGF), calculados conforme as equações 1, 2 e 3, respectivamente (Benincasa 1988).

Equação 1:

$$\mathbf{TCA} = \frac{V_f - V_0}{t_f - t_0}$$

Onde:

TCA = taxa de crescimento absoluto, em altura [cm] ou em DAS [mm];

V_f = variável final, altura [cm] ou DAS [mm];

V₀ = variável inicial, altura [cm] ou DAS [mm];

t_f = tempo final do monitoramento;

t₀ = tempo inicial do monitoramento.

Equação 2:

$$\mathbf{TCR} = \frac{\ln(V_f) - \ln(V_0)}{t_f - t_0}$$

Onde:

TCR = taxa de crescimento relativo, em altura [cm] ou em DAS [mm];

V_f = variável final, altura [cm] ou DAS [mm];

V₀ = variável inicial, altura [cm] ou DAS [mm];

t_f = tempo final do monitoramento;

t₀ = tempo inicial do monitoramento.

Equação 3:

$$\mathbf{IGF} = GF - NF0 \times \frac{100}{t_f - t_0}$$

Onde:

IGF = índice de ganho foliar [%];

GF = ganho foliar;

NF0 = número de folhas inicial;

t_f = tempo final do monitoramento;

t₀ = tempo inicial do monitoramento.

4.6 ANÁLISES ECOFISIOLÓGICAS

4.6.1 Trocas gasosas

A mensuração das trocas gasosas foi realizada no horário entre 08:30 e 12:00 h (Costa *et al.* 2020), ocorrendo em três plantas por parcela que foram selecionadas aleatoriamente. Em cada planta foi utilizada uma folha madura, em bom estado fitossanitário e localizada no terço médio da copa das plantas. Assim, realizou-se a medição das taxas de fotossíntese (A), condutância estomática (gs), transpiração (E) e respiração no escuro (R_d) usando o analisador de gás a infravermelho (IRGA) portátil de sistema aberto (LI-6400, LI-COR, Inc., Logan, NE, EUA), equipado com fonte de luz artificial 6400-02B Red/Blue.

O IRGA foi ajustado para o fluxo de 400 μmol s⁻¹, concentração de CO₂ e H₂O dentro da câmara de medição em torno de 410 ± 4 μmol mol⁻¹ e 21 ± 1 mmol mol⁻¹, respectivamente (Lopes *et al.* 2019). A temperatura do bloco foi mantida em torno de 31 °C ± 1° C durante as medições (Ferreira *et al.* 2016; Souza *et al.* 2017; Shimpl *et al.* 2019). A eficiência no uso da água (EUA) foi calculada pela relação entre as taxas de fotossíntese (A) e a transpiração (E), e a eficiência intrínseca no uso da água (EIUA) foi determinada através da razão entre a taxa de fotossíntese (A) e a condutância estomática (gs) (Ferreira *et al.* 2012).

4.6.2 Coleta de folhas

Após a mensuração das trocas gasosas, as folhas utilizadas para estas avaliações foram coletadas juntamente com mais duas folhas das mesmas plantas, a fim de realizar as análises expostas nos tópicos a seguir. Após a coleta, as folhas foram envolvidas em papel alumínio para evitar a degradação das clorofilas, acondicionadas em isopor com gelo para evitar sua desidratação, e em seguida conduzidas para análise no Laboratório de Sistemas Agroflorestais e Ecofisiologia Vegetal da UNIFESSPA.

4.6.3 Morfologia foliar

A morfologia das folhas foi avaliada utilizando-se três folhas por planta (triplicata), através das quais foram medidas a área foliar (AF) e a área foliar específica (AFE). A AF foi mensurada através da digitalização das amostras foliares em scanner de mesa, com resolução de 200 dpi, sendo as imagens transformadas em monocromáticas do tipo bitmap e analisadas no software DDA (Ferreira *et al.* 2008). A AFE foi calculada pela razão entre AF e massa foliar seca, sendo esta última determinada com o uso de 10 discos foliares por folha (área = 0,283 cm²), que foram secos em estufa a 70 °C ± 1 °C até obter a massa constante (Coble *et al.* 2014).

4.6.4 Pigmentos cloroplastídicos

Para determinar o teor de pigmentos cloroplastídicos foram retirados discos foliares (amostras) em quantidade suficiente para ter a massa total de 0,1 g. Tais amostras foram maceradas juntamente com 20 mL de acetona (80% v/v) contendo CaCO₃ (0,5% p/v). O extrato passou por filtragem em papel filtro qualitativo nº 2. Em seguida, o material filtrado foi utilizado para determinar a absorvância com auxílio do espectrofotômetro, ($\lambda = 663, 645$ e 480 nm), para quantificar os teores de clorofila a (chl *a*), clorofila b (chl *b*) e carotenóides (c_{x+c}), respectivamente (Lichtenthaler e Wellburn 1983).

O cálculo das concentrações de chl *a*, chl *b* e c_{x+c} foi realizado na base da massa foliar ($\mu\text{mol g}^{-1}$), utilizando as equações 4, 5 e 6, respectivamente (Hendry e Price, 1993). A partir desses cálculos, foram obtidas as concentrações de clorofila total (chl *a* + chl *b*), e as razões chl *a*/chl *b* e clorofila total/ carotenóides (chl total/ c_{x+c}).

Equação 4:

$$\text{chl } a \text{ (mg L}^{-1}\text{)} = (12,7 \times A_{663} - 2,69 \times A_{645}) \times 1,119 \times \frac{V}{1000, \text{g}}$$

Equação 5:

$$\text{chl } b \text{ (mg L}^{-1}\text{)} = (22,9 \times A_{645} - 4,68 \times A_{663}) \times 1,102 \times \frac{V}{1000 \cdot g}$$

Equação 6:

$$c_{x+c} \text{ (mg L}^{-1}\text{)} = (A_{480} + 0,114 \times A_{663} - 0,638 \times A_{645}) \times V \times \frac{1000}{112,5 \cdot g}$$

Onde:

A = absorvância no comprimento de onda indicado;

V= volume final do extrato clorofila-acetona (ml);

g = massa da amostra.

4.6.5 Conteúdo relativo de água

O conteúdo relativo de água (CRA) foi determinado por meio de 30 discos foliares (área = 0,283 cm²) retirados das folhas coletadas. Os discos foram pesados para obter a massa do material fresco, e após isso submerso em água destilada por 24 horas, permanecendo a 4 °C no escuro. Em seguida, os discos foram pesados novamente mensurando-se a massa do material túrgido, sendo estes levados para a estufa por 48 horas em temperatura de 80 °C. Por fim, as amostras foram retiradas da estufa e pesadas para verificar a massa do material seco. De posse dessas informações, o CRA foi determinado através da seguinte equação (Slavick 1979):

Equação 7:

$$\text{CRA}(\%) = \frac{(M_f - M_s)}{(M_t - M_s)} \times 100$$

Onde:

CRA = conteúdo relativo de água (%);

M_f = Massa do material fresco (g);

M_s = Massa do material seco (g);

M_t = Massa do material túrgido (g).

4.6.6 Status nutricional

Uma outra parte das folhas coletadas foi destinada à quantificação dos nutrientes foliares. As amostras foliares foram acondicionadas em sacos de papel e secas em estufa a 65°C com ventilação forçada até atingir massa constante, para então serem moídas em moinho analítico (DCG20, Cousirnat). Em seguida, foram analisadas quanto ao teor de macro e micronutrientes presentes em sua composição.

O N total foi determinado pelo método de Kjeldahl (Bremner, 1996). O teor de P foi determinado por espectrofotometria (Shimadzu UV-VIS-120-01 com $\lambda = 725$ nm) (Murphy e Riley 1962). A extração dos macronutrientes K, Ca e Mg e dos micronutrientes Fe, Zn e Mn foi realizada a partir de digestão nitro-perclórica (Miyazawa *et al.* 1999), sendo estes determinados por espectrofotometria de absorção atômica com chama (Perkin-Elmer 1100B). O teor de nutrientes na base da área foi obtido pela multiplicação entre o teor do nutriente na base da massa e a massa foliar por área (MFA). A eficiência fotossintética no uso de nutrientes [EU(nutriente)] foi calculada por meio da razão entre a fotossíntese (A) e o teor de nutriente.

4.7 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANÁLISE ESTATÍSTICA

O número de repetições (blocos) foi determinado com base na variação de tamanho das mudas de *B. excelsa*, a partir dos dados de diâmetro do coleto que foram medidos antes da realização do plantio. Para determinar o número de unidades amostrais necessárias para alcançar o nível de probabilidade de 95% e precisão de $\pm 10\%$, foi utilizada a equação de tamanho da amostra (Equação 8). A partir dessa equação, averiguou-se que cinco blocos foram suficientes para alcançar o nível de probabilidade e a precisão requeridos, sendo os tratamentos distribuídos em cada um destes blocos.

Equação 8:

$$n = \frac{t^2 \cdot S^2}{E^2 + \frac{t^2 \cdot S^2}{N}}$$

Onde:

n = número de unidades amostrais;

E = Precisão requerida;

S² = Variância;

t = Valor tabelado da estatística “t” de Student;

N = Número total de unidades amostrais na população.

Dessa maneira, o delineamento experimental foi em blocos casualizados (DBC) em esquema fatorial, considerando três sistemas de plantio (tratamentos), cinco repetições (blocos) e três tempos de coleta de dados (9 meses, 16 meses e 20 meses). A alocação das repetições no experimento foi realizada conforme o ilustrado na Figura 7.

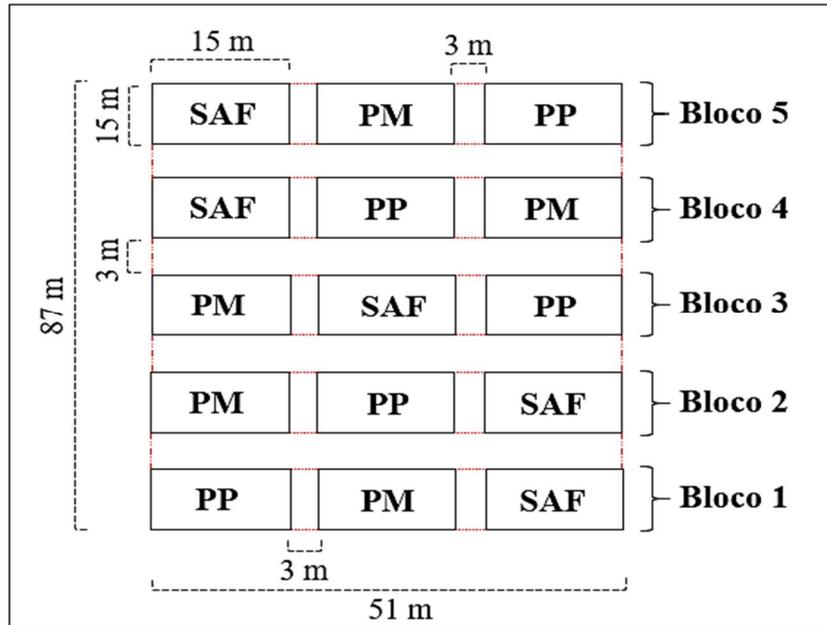


Figura 7: Alocação dos blocos e distribuição dos tratamentos. SAF = Sistema agroflorestal; PM = Plantio misto; PP = Plantio Puro.

As análises estatísticas foram realizadas no software R Studio (versão 4.0.3), através do pacote factoshiny (R Core Team 2018). Os dados coletados passaram pelos testes de homogeneidade (Levene) e normalidade (Shapiro-Wilk), quando não atendidas as premissas os dados foram transformados por Box-cox. Posteriormente, foi realizada Análise de variância (ANOVA) e quando a análise se mostrou significativa, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

5. RESULTADOS

5.1 DISPONIBILIDADE DE RECURSOS

Os tratamentos não se diferenciaram quanto à disponibilidade de luz ao longo de 20 meses de avaliação, contudo, verificou-se uma tendência de diminuição dos valores de irradiância à medida em que aumentou a idade do plantio (Figura 8A). Essa redução foi de 26,99% nos sistemas agroflorestais e 10,90% no plantio misto, enquanto o oposto ocorreu no plantio puro, onde a disponibilidade de luz aumentou em 14,38%. Já a disponibilidade de água para *B. excelsa* foi diferente entre os períodos de coleta, com maiores valores observados no mês de junho (Figura 8B), mas não se observou diferenças entre os sistemas de plantio.

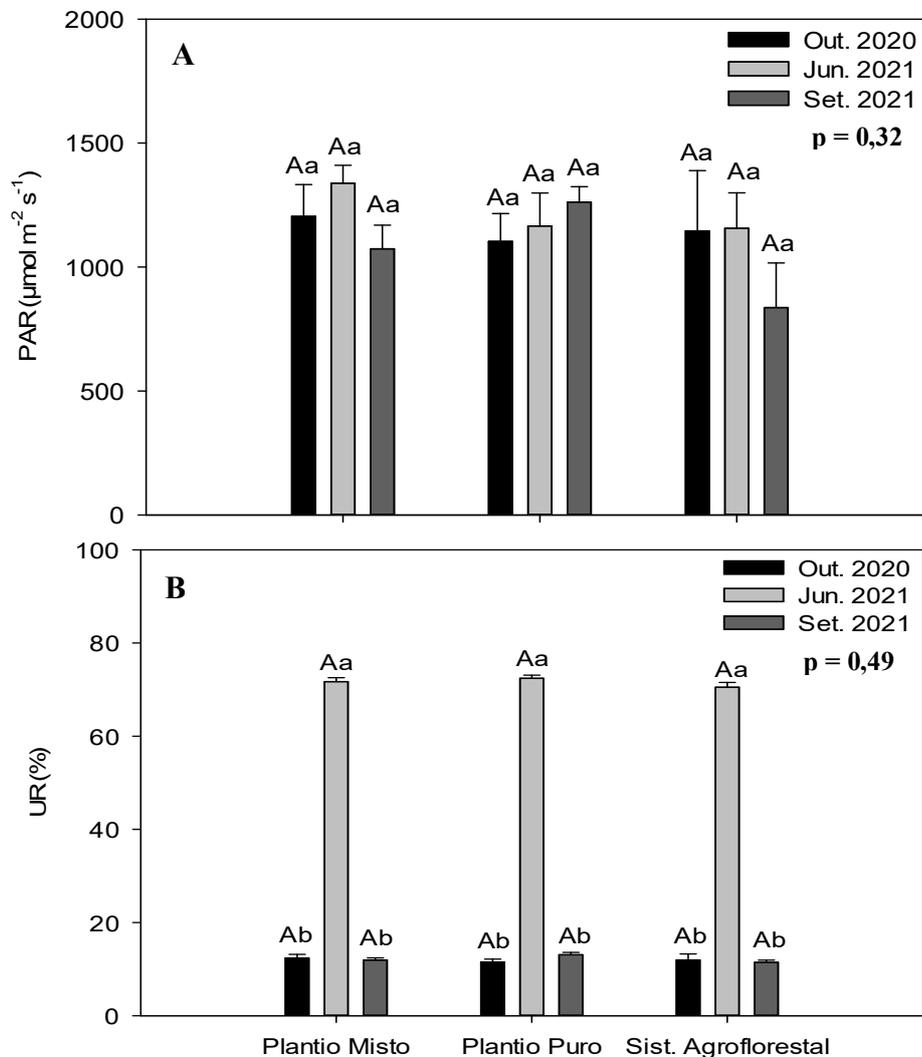


Figura 8: Disponibilidade de luz (A) e água (B) nos diferentes sistemas de plantio com *Bertholletia excelsa*. Os valores são médias e as barras indicam o erro padrão. Letras maiúsculas distintas indicam valores significativamente diferentes entre tratamentos no mesmo período; letras minúsculas distintas indicam valores significativamente diferentes entre períodos no mesmo tratamento (Teste de Tukey $p < 0,05$).

Quanto à disponibilidade de nutrientes no solo, ao final de 20 meses verificou-se diferença nas concentrações de magnésio (Mg) para o sistema agroflorestal em relação aos demais tratamentos. Além disso, constatou-se altas concentrações de ferro (Fe) para todos os tratamentos. Embora, não tenha sido verificada diferenças estatísticas, os valores de fósforo (P) nos sistemas agroflorestais foram maiores aos encontrados nos plantios puros e plantios mistos (Tabela 2).

Tabela 2: Características químicas dos solos nos diferentes sistemas de plantio com *Bertholletia excelsa*.

Variável	Tratamento		
	Plantio Puro	Plantio Misto	Sistema Agroflorestal
pH (H ₂ O)	5,09±0,09 a	5,06±0,08 a	5,07±0,04 a
M.O (g kg ⁻¹)	20,03±2,80 a	20,14±2,25 a	19,96±2,54 a
C (g kg ⁻¹)	11,64±1,63 a	11,71±1,31 a	11,60±1,48 a
N (g kg ⁻¹)	0,88±0,10 a	1,00±0,06 a	0,89±0,06 a
P (mg kg ⁻¹)	64,32±5,43 a	38,60±1,33 a	79,51±5,59 a
K (cmol _c kg ⁻¹)	0,10±0,01 a	0,11±0,02 a	0,11±0,01 a
Ca (cmol _c kg ⁻¹)	0,77±0,20 a	0,96±0,33 a	1,03±0,19 a
Mg (cmol _c kg ⁻¹)	0,42±0,07 b	0,39±0,08 b	0,52±0,10 a
Al (cmol _c kg ⁻¹)	0,87±0,09 a	0,82±0,18 a	0,80±0,06 a
Fe (mg kg ⁻¹)	794,40±61,38 a	789,20±56,23 a	764,64±31,96 a
Zn (mg kg ⁻¹)	1,15±0,28 a	0,77±0,17 a	1,04±0,28 a
Mn (mg kg ⁻¹)	15,08±4,19 a	18,00±3,77 a	18,11±4,22 a
C:N (g kg ⁻¹)	13,07±0,61 a	11,96±1,46 a	12,94±0,96 a
C:P (g kg ⁻¹)	1333,87±312,97 a	1642,81±241,63 a	1105,67±312,50 a
N:P (g kg ⁻¹)	105,18±25,74 a	150,40±33,68 a	84,23±21,37 a

Os valores são médias ± erro padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $p < 0,05$).

5.2 TEOR DE NUTRIENTES FOLIARES

Quanto à concentração de nutrientes no tecido foliar, observou-se diferenças entre os sistemas de plantio apenas para as concentrações de magnésio (Mg), sendo os maiores valores encontrados nas plantas do sistema agroflorestal (Tabela 3).

Tabela 2: Teor de nutrientes foliares em *Bertholletia excelsa* cultivada em diferentes sistemas de plantio.

Nutriente	Tratamento		
	Sistema Agroflorestal	Plantio Misto	Plantio Puro
N (g kg ⁻¹)	14,31±0,60 a	13,92±0,99 a	15,36±1,21 a
P (g kg ⁻¹)	2,23±0,18 a	2,67±0,85 a	1,49±0,17 a
K (g kg ⁻¹)	4,92±0,56 a	6,46±0,68 a	6,46±0,49 a
Ca (g kg ⁻¹)	10,28±0,49 a	7,86±2,00 a	9,18±0,69 a
Mg (g kg ⁻¹)	2,98±0,10 a	2,08±0,08 b	2,01±0,07 b

Fe (mg kg ⁻¹)	222,22±61,42 a	193,40±51,72 a	127,42±10,86 a
Zn (mg kg ⁻¹)	35,36±2,58 a	32,42±5,50 a	28,92±3,68 a
Mn (mg kg ⁻¹)	110,52±0,25 a	97,66±0,16 a	74,52±0,16 a
N:P (g kg ⁻¹)	6,63±0,70 a	7,32±1,80 a	10,72±1,11 a
Fe:Mn (mg kg ⁻¹)	1,94±0,15 a	3,18±0,99 a	1,80±0,23 a

Os valores são médias ± erro padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $p < 0,05$).

5.3 PIGMENTOS CLOROPLASTÍDICOS

Não foram observadas diferenças nas concentrações de pigmentos cloroplastídicos entre os sistemas de plantio (Tabela 4). Contudo, verificou-se que o período de coleta influenciou os valores de Chl *a*, Chl *b* e C_{x+c}, de modo que nos meses de junho e setembro foram observados os menores valores de Chl *a* para o plantio misto e plantio puro. Neste mesmo período, foram verificados menores valores de Chl *b* e C_{x+c} para todos os sistemas de plantio. Em geral, houve uma redução média de 19,03% na quantidade de clorofilas total (Chl total) nas folhas de *B. excelsa*.

Tabela 3: Teor de pigmentos cloroplastídicos para *Bertholletia excelsa* cultivada em diferentes sistemas de plantio.

Variáveis	Tratamentos	Período		
		Out. 2020	Jun. 2021	Set. 2021
Chl <i>a</i> (μmol/g)	Plantio Misto	0,97±0,06Aa	0,56±0,07Ab	0,48±0,05Ab
	Plantio Puro	0,89±0,10Aa	0,48±0,12Ab	0,59±0,08Aab
	Sistema Agroflorestal	0,84±0,11Aa	0,83±0,15Aa	0,80±0,16Aa
Chl <i>b</i> (μmol/g)	Plantio Misto	0,31±0,02Aa	0,29±0,10Aa	0,23±0,02Aa
	Plantio Puro	0,26±0,02Aa	0,16±0,04Aa	0,32±0,06Aa
	Sistema Agroflorestal	0,26±0,03Aa	0,37±0,10Aa	0,42±0,08Aa
C _{x+c} (μmol/g)	Plantio Misto	0,44±0,04Aa	0,34±0,03Ab	0,24±0,02Ab
	Plantio Puro	0,43±0,02Aa	0,28±0,04Ab	0,26±0,02Ab
	Sistema Agroflorestal	0,44±0,04Aa	0,44±0,08Aa	0,27±0,02Ab
Chl total (μmol/g)	Plantio Misto	1,27±0,08Aa	1,25±0,38Aa	0,72±0,07Aa
	Plantio Puro	1,15±0,12Aa	0,64±0,16Aa	0,91±0,13Aa
	Sistema Agroflorestal	1,10±0,14Aa	1,20±0,24Aa	1,22±0,24Aa
Chl <i>a</i> /Chl <i>b</i>	Plantio Misto	3,21±0,03Aa	2,70±0,62Aab	2,06±0,03Ab
	Plantio Puro	3,40±0,15Aa	2,92±0,12Aa	1,94±0,14Ab
	Sistema Agroflorestal	3,24±0,13Aa	2,61±0,41Aab	1,92±0,05Ab
Chl total/C _{x+c}	Plantio Misto	2,98±0,16Aa	2,46±0,33Aa	2,99±0,26Aa
	Plantio Puro	2,67±0,19Aab	2,20±0,29Ab	3,47±0,37Aa
	Sistema Agroflorestal	2,55±0,15Ab	2,78±0,23Ab	4,52±0,67Aa

Os valores são médias ± erro padrão. Letras maiúsculas distintas indicam valores significativamente diferentes entre tratamentos no mesmo período; letras minúsculas distintas indicam valores significativamente diferentes entre períodos no mesmo tratamento (Teste de Tukey $p < 0,05$).

5.4 CONTEÚDO RELATIVO DE ÁGUA

Em se tratando de conteúdo relativo de água (CRA), observou-se diferenças entre os valores registrados entre outubro de 2020 e junho de 2021, bem como entre outubro de 2020 e setembro de 2021, demonstrando que ao longo do tempo as plantas de *B. excelsa* melhoram significativamente sua condição hídrica através da capacidade de retenção de água nas folhas (Figura 9). Os maiores valores de CRA foram verificados durante a avaliação realizada em junho de 2021, quando o ambiente dispunha de maior disponibilidade de água para as plantas.

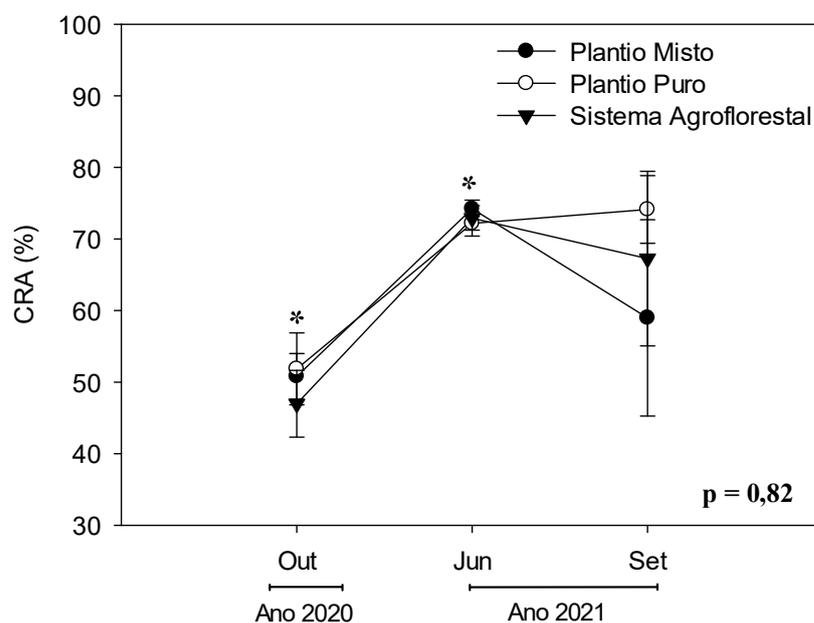


Figura 9: Conteúdo relativo de água (CRA) para *Bertholletia excelsa* cultivada em diferentes sistemas de plantio. Os valores são médias e as barras indicam o erro padrão. Asteriscos indicam valores significativamente diferentes entre os períodos de avaliação (Teste de Tukey $p < 0,05$).

5.5 TROCAS GASOSAS

Ao final de 20 meses de plantio, as maiores taxas de fotossíntese (A), condutância estomática (g_s) e transpiração (E) foram observadas no sistema agroflorestal, seguido por plantio misto e plantio puro (Figura 10).

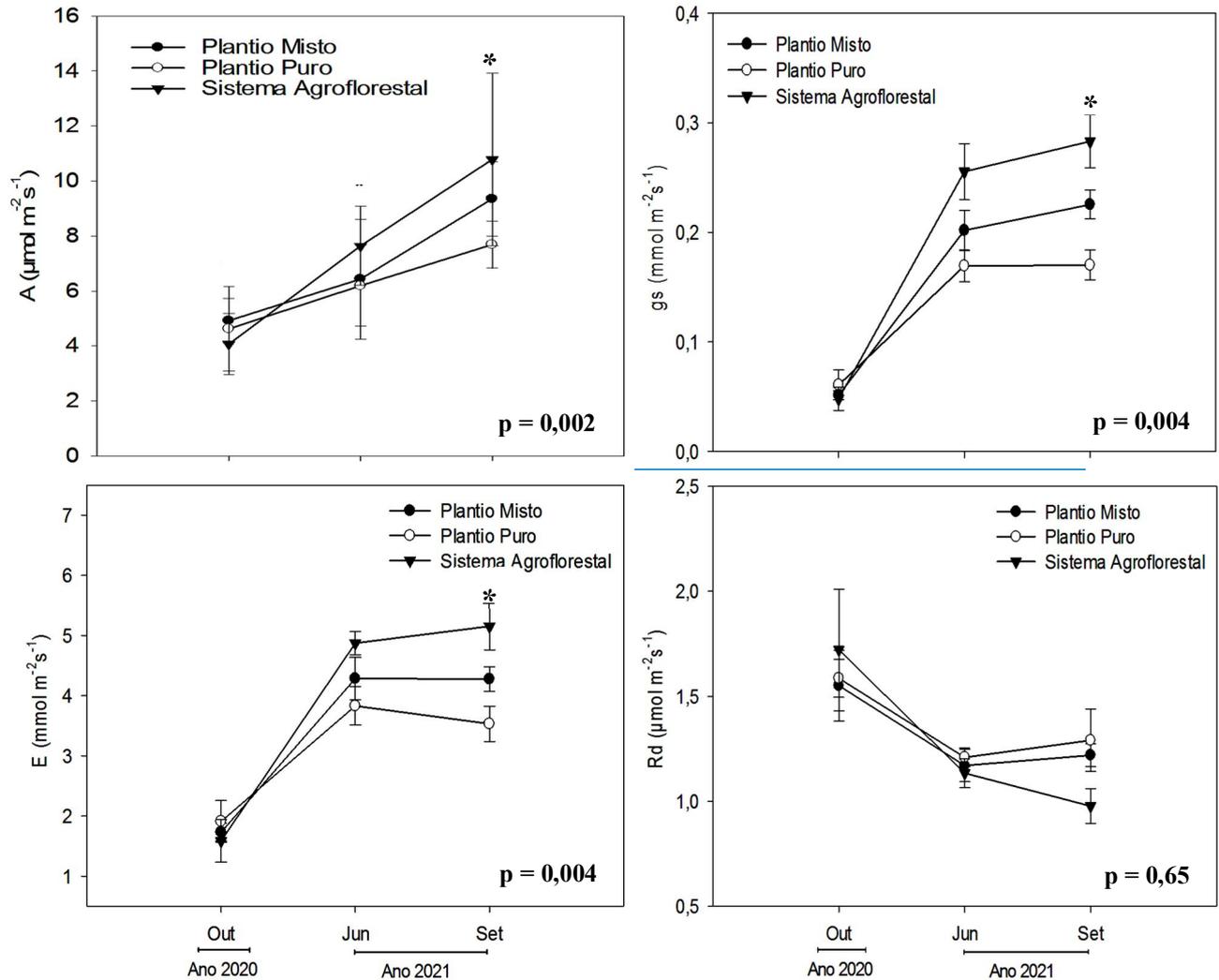


Figura 10: Trocas gasosas de *Bertholletia excelsa* cultivada em diferentes sistemas de plantio. Os valores são médias e as barras indicam o erro padrão. Asteriscos indicam valores significativamente diferentes entre os tratamentos (Teste de Tukey $p < 0,05$).

Neste período, a taxa média de fotossíntese para o sistema agroflorestal foi superior em 31,82% àquela observada no plantio puro e 22,73% sobre o plantio misto. Em relação ao período de coleta, verificou-se o aumento dos valores de fotossíntese, condutância estomática e transpiração entre outubro de 2020 e setembro de 2021.

5.6 EFICIÊNCIA NO USO DE RECURSOS

No que se refere à eficiência no uso da água, os tratamentos se diferenciaram quando se considera os períodos de avaliação, especialmente, ao comparar as avaliações realizadas quando o ambiente teve menor (outubro de 2020) e maior (junho de 2021) disponibilidade de água no solo. Os maiores valores de EUA e EIUA foram observados em outubro de 2020 e os menores em junho de 2021 (Figura 11).

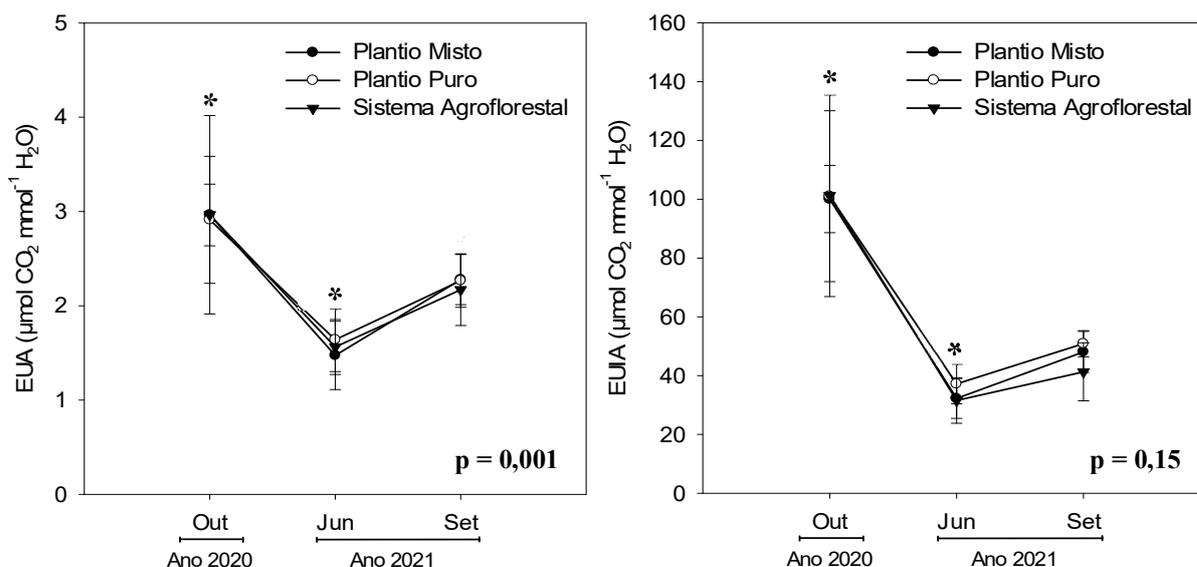


Figura 11: Eficiência no uso da água por *Bertholletia excelsa* cultivada em diferentes sistemas de plantio.

Os valores são médias e as barras indicam o erro padrão. Asteriscos indicam valores significativamente diferentes entre os períodos de avaliação (Teste de Tukey $p < 0,05$).

Em relação à eficiência fotossintética no uso de nutrientes (EUN), observou-se que as plantas de *B. excelsa* cultivadas no sistema agroflorestal e no plantio misto foram mais eficientes no uso de N e K, quando comparadas com as mudas do plantio puro. As plantas no tratamento plantio misto tiveram quase o dobro da eficiência no uso de Mn em relação aos demais tratamentos, sendo superior ao plantio puro e ao sistema agroflorestal em 48,86% e 43,72%, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 4: Eficiência fotossintética no uso de nutrientes por *Bertholletia excelsa* cultivada em diferentes sistemas de plantio.

EUNutriente	Tratamento		
	Sistema Agroflorestal	Plantio Misto	Plantio Puro
EFUN (mmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	147,65±31,65 a	130,36±12,43 a	96,16±17,53 b
EFUP (mmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	2199,55±345,30 a	2106,83±625,00 a	2314,33±352,34 a
EFUK (mmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	1298,05±237,22 a	791,53±79,64 a	691,43±82,82 b
EFUCa (mmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	605,98±88,19 a	1003,29±422,10 a	464,30±45,59 a
EFUMg (mmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	1302,21±225,72 a	1533,84±188,11 a	1328,81±227,88 a
EFUFe (mmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	49,19±19,18 a	44,64±8,41 a	46,05±2,87 a
EFUZn (mmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	281,73±31,36 a	289,32±54,67 a	250,54±32,98 a
EFUMn (mmol mol ⁻¹ s ⁻¹)	89,43±17,07 a	158,91±66,99 b	81,26±11,33 a

Os valores são médias ± erro padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $p < 0,05$).

5.7 MORFOLOGIA FOLIAR

Ao final de 20 meses de experimentação, os valores de área foliar (AF) variaram entre 102,30 e 142,49 cm² (Figura 12), dentre os quais não se observou diferenças entre os tratamentos ou períodos de coleta. Por outro lado, verificou-se diferença entre os valores de área foliar específica (AFE) entre as avaliações de junho de 2021 e setembro de 2021, tendo estes respectivamente variado entre 136,91 e 193,07 cm² g⁻¹. Para AFE, os maiores valores foram observados em outubro de 2020 e os menores em setembro de 2021.

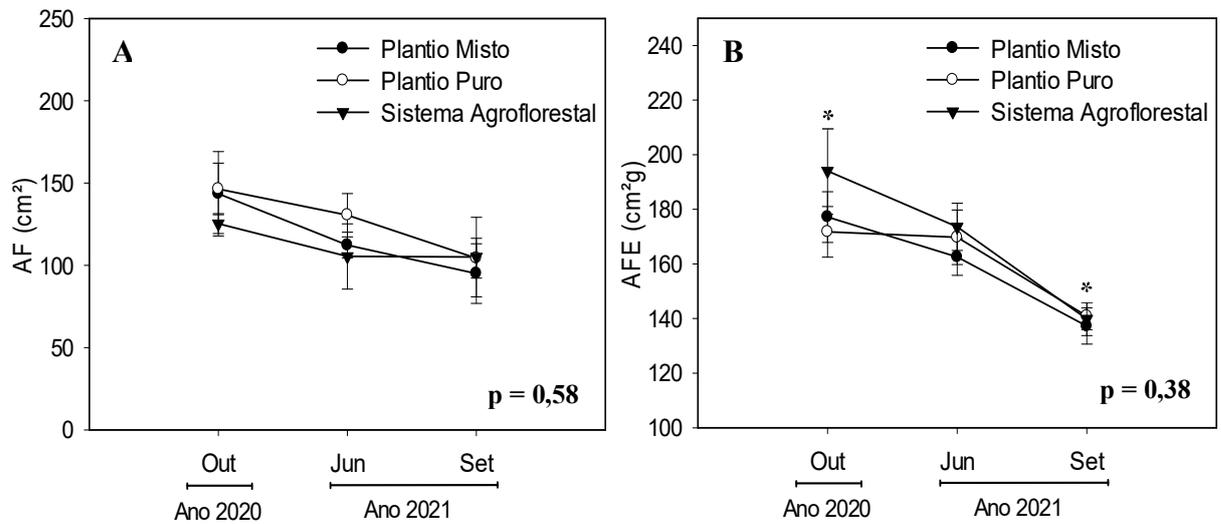


Figura 12: Área foliar (A) e Área foliar específica (B) de *Bertholletia excelsa* nos diferentes sistemas de plantio. Os valores são médias e as barras indicam o erro padrão. Asteriscos indicam valores significativamente diferentes entre os tratamentos (Teste de Tukey $p < 0,05$).

5.8 BIOMETRIA

As taxas de sobrevivência de *B. excelsa* entre os diferentes tratamentos variaram de 35 a 50% (Figura 13). As maiores taxas de sobrevivência foram observadas nos sistemas agroflorestais e no plantio misto, enquanto as menores foram verificadas no plantio puro.

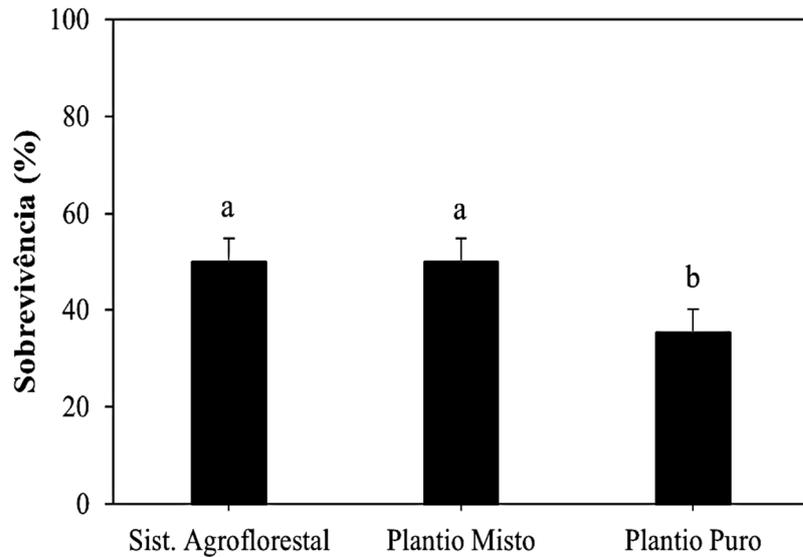


Figura 13: Sobrevivência de *Bertholletia excelsa* em diferentes sistemas de plantio. Os valores são médias e as barras indicam o erro padrão. Letras distintas indicam valores significativamente diferentes entre os tratamentos (Teste de Tukey $p < 0,05$).

A taxa de crescimento absoluto (TCA) em altura e diâmetro não diferiram entre os sistemas de plantio (Figura 14). Os valores de TCA em altura variaram de 1,56 cm mês⁻¹ no plantio puro a 1,85 cm mês⁻¹ nos sistemas agroflorestais, enquanto em diâmetro a variação foi de 3,60 mm mês⁻¹ no plantio misto a 4,02 mm mês⁻¹ no plantio puro.

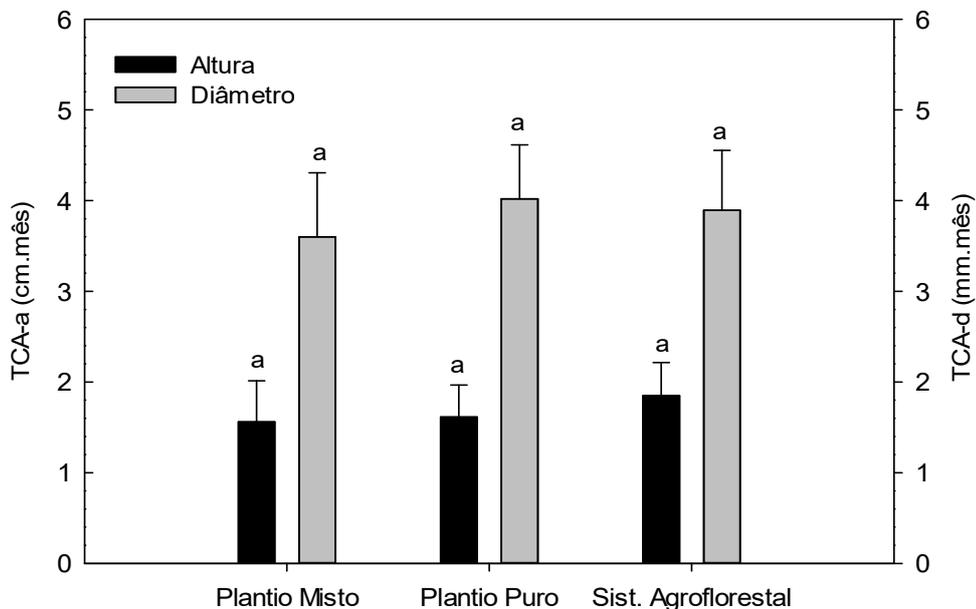


Figura 14: Crescimento *Bertholletia excelsa* em altura e diâmetro nos diferentes sistemas de plantio. TCA-a = Taxa de crescimento absoluto em altura; TCA-d = Taxa de crescimento Absoluto em diâmetro. Os valores são médias e as barras indicam o erro padrão. Letras distintas indicam valores significativamente diferentes entre os tratamentos (Teste de Tukey $p < 0,05$).

Os sistemas agroflorestais apresentaram o maior índice de ganho foliar. Neste tratamento, *B. excelsa* teve ganho foliar de 79,50% (Figura 15), sendo este valor superior em 16% ao observado no plantio puro e plantio misto.

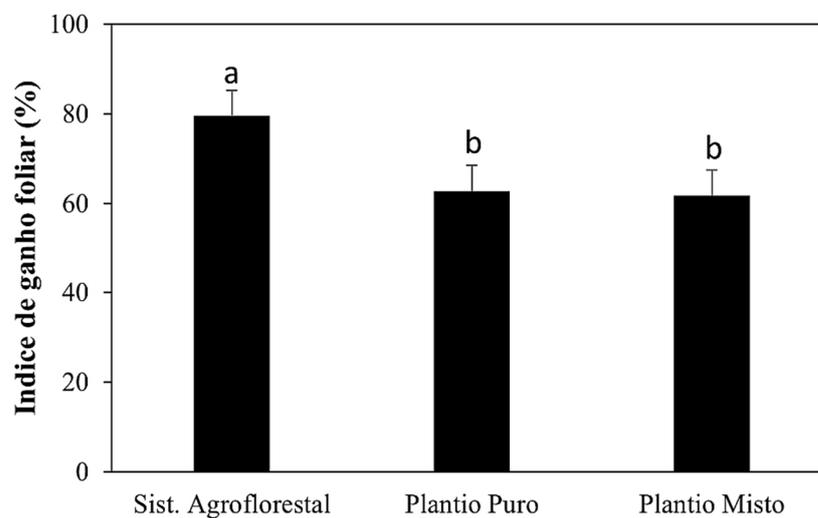


Figura 15: Índice de ganho foliar para *Bertholletia excelsa* nos diferentes sistemas de plantio. Os valores são médias e as barras indicam o erro padrão. Letras distintas indicam valores significativamente diferentes entre os tratamentos (Teste de Tukey $p < 0,05$).

6. DISCUSSÃO

A hipótese deste trabalho foi parcialmente aceita, pois verificou-se que a castanheira plantada sobre áreas alteradas em sistemas agroflorestais apresentou maiores taxas de sobrevivência, fotossíntese e eficiência no uso de recursos primários. Contudo, não foram observadas diferenças entre os tratamentos em relação às medidas de crescimento, assim como não foi possível relacionar os fatores abióticos ao desempenho ecofisiológico da espécie, visto que não se constatou diferenças entre os sistemas de plantio quanto à disponibilidade de água, luz ou nutrientes.

A não diferenciação entre os tratamentos quanto à disponibilidade de água e luz está ligada a idade dos sistemas de plantio, de modo que nessas condições o tempo de 20 meses não foi suficiente para que os sistemas de plantio com *B. excelsa* tivessem um contraste considerável no ambiente de água e luz, mostrando que nessa fase inicial o meio físico não é alterado pelos sistemas de plantio. Em relação às maiores concentrações de magnésio encontrada nos solos dos sistemas agroflorestais, quando comparadas com os plantios mistos e puro, pode ser o resultado dos cultivos posteriores que foram realizados, com o plantio de milho e feijão, nos quais foi realizada calagem utilizando calcário dolomítico. Esses teores de magnésio no solo, explicam as maiores concentrações de magnésio nas folhas, sendo este o componente principal das clorofilas e que está relacionado à atividade de enzimas envolvidas no processo fotossintético e de crescimento das plantas. Apesar disso, não foram verificadas alterações nas concentrações de clorofilas entre os tratamentos.

O fato de não ser observada mudança nas clorofilas em plantas com maiores concentrações de magnésio, corrobora com alguns estudos sobre a castanheira que mostram que o ambiente natural de luz parece ser mais determinante para as concentrações de clorofilas (Silva *et al.* 2016; Ferreira *et al.* 2016; Souza *et al.* 2017). No caso deste estudo, não se constatou diferenças no ambiente de luz, o que pode também explicar as repostas de trocas gasosas, que na maior parte das avaliações feitas ao longo do tempo neste trabalho foram iguais entre os tratamentos, alterando-se apenas a fotossíntese no final do período experimental, quando o plantio já estava com maior idade e houve redução na disponibilidade de luz. Esta redução foi acentuada no sistema agroflorestal, passando de 1.400 para quase 800 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Em áreas degradadas o ambiente extremo com baixa disponibilidade de nutrientes e água contribui para a redução da eficiência fotoquímica das plantas, o que favorece o processo de fotoinibição, logo a redução da disponibilidade de luz e o aumento das taxas fotossintéticas no sistema agroflorestal pode estar associada a essa resposta (Salomão *et al.* 2013; Jaquetti e

Gonçalves 2017; Jourgholami *et al.* 2019). Contudo, essas diferenças não foram suficientes para alterar o ritmo de crescimento das plantas durante o período de experimentação.

De maneira geral, as taxas de sobrevivência registradas nesta pesquisa são inferiores às aquelas encontradas em pesquisas com a castanheira cultivada em sistemas agroflorestais, plantio misto, plantio puro ou plantio de enriquecimento, onde a sobrevivência da espécie em condições de campo varia entre 70% e 90% nos primeiros anos de plantio (Peña-Claros *et al.* 2002; Scoles *et al.* 2011;2014; Locateli *et al.* 2015; Schroth *et al.* 2015; Scoles *et al.* 2016). A baixa sobrevivência pode estar associada aos extremos ambientais em que as plantas foram submetidas, sofrendo com alagamento por 60 dias pós plantio (Figura 16A), seguido por um intenso período de seca (Figura 16B) em que a precipitação média foi de 11 mm ao longo de 3 meses. Essas condições causam estresses extremos na planta e demonstram que a castanheira possui capacidade de se aclimatar mesmo em condições de estresse hídrico quer seja pelo alagamento ou pela seca (Silva *et al.* 2016; Herraiz *et al.* 2017; Shimpl *et al.* 2019).



Figura 16: Condições ambientais (alagamento e seca) em que as plantas de *Bertholletia excelsa* estiveram submetidas durante o período de experimentação.

Os estudos com castanheira sugerem que o seu pleno crescimento é intimamente ligado à disponibilidade de irradiância (Scoles *et al.* 2014; Ferreira *et al.* 2016; Souza *et al.* 2017). Além disso, ao estarem em ambiente limitado de luz, as espécies arbóreas clímax tendem a investir no crescimento em altura, buscando situar seus tecidos numa posição onde possam maximizar a absorção de luz (dossel da floresta ou do plantio) para o processo de fotossíntese (Lorenzi *et al.* 2012). Esse comportamento explica o maior crescimento em altura de *B. excelsa* nos sistemas agroflorestais, onde a disponibilidade de luz foi de até 34% menor que no plantio misto, por exemplo (Figura 8A).

Para o crescimento em diâmetro, apesar da não diferenciação entre os tratamentos e de que estes receberam apenas adubação de fundação, os resultados demonstram que as plantas cresceram até duas vezes mais que outras submetidas a constantes dosagens de fertilização química ou orgânica (Gomes 2012; Ferreira *et al.* 2012; Corrêa 2013). Isso demonstra que, como observado em estudos anteriores, de fato *B. excelsa* é uma espécie plástica morfo e fisiologicamente, isso se reflete na sua eficiência no uso dos recursos visando a sobrevivência e o crescimento de seus indivíduos (Souza *et al.* 2017; Melo *et al.* 2018; Lopes *et al.* 2019; Shimpl *et al.* 2019).

A diferença de ganho foliar entre as castanheiras cultivadas em sistemas agroflorestais e as nos demais tratamentos (Figura 15), pode estar relacionada à disponibilidade de luz nos diferentes tratamentos. O sistema agroflorestal, por exemplo, foi o tratamento onde as plantas de *B. excelsa* dispuseram de menor quantidade de luz, ao passo em que tiveram o maior ganho foliar, sendo esta uma estratégia das plantas para aprimorar a captura de luz e aumentar a sua capacidade fotossintética. Este resultado também pode ter relacionado com a maior disponibilidade de nutrientes no solo (a maioria deles, vide tabela 2) para as plantas neste tratamento, especialmente a de fósforo (P). Isto porque o P estimula as plantas a investirem em biomassa foliar, através das alterações na arquitetura de crescimento da parte aérea, onde ocorre a produção de ramificações laterais, o que influencia no número de lançamentos foliares. Resultados semelhantes ao este estudo foram verificados em experimento onde *B. excelsa* foi submetida a dosagens de P, sendo que a adição deste nutriente proporcionou ganho foliar de até 641% (Corrêa 2013).

Até os 20 meses de plantio os tratamentos não influenciaram significativamente a área foliar (AF) de *B. excelsa*, porém, verifica-se que há uma tendência de que quanto menor é a disponibilidade de luz (Figura 8A) maior é a área foliar (Figura 12). Tal tendência foi observada principalmente nos sistemas agroflorestais. Essa mudança morfológica faz parte de uma estratégia das plantas para maximizar a interceptação da luz solar e a fixação de CO₂, sendo isto importante quando estão sob condições de baixa disponibilidade de luz, água e/ou nutrientes (Ferreira *et al.* 2012; Souza *et al.* 2017). Para área foliar específica (AFE) a diferença nas médias dos tratamentos entre períodos de menor e maior precipitação, foi ocasionada pela influência da disponibilidade de água no solo durante estes períodos, não havendo necessariamente influência dos tratamentos.

Apesar de que os tratamentos não se diferenciaram quanto ao teor de nutrientes foliares (com exceção à concentração de Mg nos sistemas agroflorestais), nota-se que para a maioria dos nutrientes os maiores valores foram observados nos sistemas agroflorestais e no plantio

misto, principalmente em relação aos macronutrientes secundários (Ca e Mg) e micronutrientes (Fe, Zn e Mn). Essa condição indica para uma maior ciclagem de nutrientes nestes sistemas de plantio, onde os nutrientes tornam-se disponíveis em maior quantidade no solo para via decomposição do material vegetal, sendo absorvidos pelas plantas e transportados para tecido foliar através de seus processos fisiológicos.

A diferença entre os tratamentos durante os períodos em que as plantas dispunham de menor e maior quantidade de água no solo, está ligada, principalmente, às estratégias das plantas de água para otimizar o uso do recurso limitante durante o período de escassez. Diversos estudos têm constatado que *B. excelsa* é uma espécie que possui plasticidade morfofisiológica e que é tolerante a baixa disponibilidade hídrica (Souza *et al.* 2017; Lopes *et al.* 2019; Melo *et al.* 2018; Shimpl *et al.* 2019). Nestas condições a castanheira reduz a área foliar, a atividade estomática, a transpiração e o teor de pigmentos cloroplastídicos, ao passo que aumenta a massa foliar específica, visando equilibrar a assimilação de CO₂ e utilização de fotoassimilados (Silva *et al.* 2016; Shimpl *et al.* 2019).

Quanto à eficiência fotossintética no uso dos nutrientes, a maior eficiência no uso de N e K pelas castanheiras nos sistemas agroflorestais e no plantio misto (Tabela 5), corrobora com as taxas de fotossíntese observadas para estes tratamentos (Figura 10). O nitrogênio é um nutriente especialmente importante para as plantas, visto que compõe a proteína que forma as clorofilas, sendo estas as responsáveis pela captação de luz para a conversão da energia luminosa em energia química, que culmina no crescimento das plantas (Marenco; Lopes 2009; Taiz; Zeiger, 2013). Os valores de eficiência fotossintética observados nesta pesquisa são superiores aos verificados num estudo com clones de *B. excelsa* em área degradada na Amazonia Central, principalmente quanto ao uso de N, K, Mg e Mn (Ferreira *et al.* 2016). Estes fatores confirmam a aptidão da espécie para o cultivo em áreas que sofreram degradação, pois além de ser tolerante à baixa disponibilidade de nutrientes, durante esta escassez ainda ajusta o seu aparato fotossintético para que os nutrientes sejam utilizados de maneira mais eficiente (Corrêa, 2013; Ferreira *et al.* 2016; Shimpl *et al.* 2019).

As maiores taxas de fotossíntese, condutância estomática de *B. excelsa* nos sistemas agroflorestais e plantio misto, indicam para uma maior assimilação de CO₂ pelas plantas nestes tratamentos, o que tendo a culminar em maior crescimento ao longo do tempo. Os valores de fotossíntese registrados após os 16 meses de idade para os sistemas agroflorestais (Figura 10), são considerados altos para a condição de cultivo em áreas que sofreram degradação. Tais valores são, inclusive, superiores àqueles reportados em estudos com a espécie cultivada em

áreas degradadas, e recebendo tratamentos de adubação e testada sob diferentes níveis de irradiância (Ferreira *et al.* 2009; 2012; Krause *et al.* 2012; Souza *et al.* 2017).

Além disso, as taxas de transpiração foram elevadas para os tratamentos sistemas agroflorestais e plantio misto. O que tem sido constatado em estudos com diversas espécies tropicais, é que maiores valores de fotossíntese são, normalmente, acompanhados de altas taxas de condutância estomática e transpiração (Santiago; Wright 2007; Ferreira *et al.* 2012). Tendo em vista que as plantas no plantio puro foram as com maior disponibilidade de luz/exposição à irradiância (Figura 8A), os maiores valores de respiração no escuro para *B. excelsa* neste tratamento corroboram com o que foi constatado em estudo com espécies nativas da Amazônia (Rodrigues; Gonçalves 2014). As elevadas taxas de respiração no escuro estão associadas ao alto custo na manutenção do aparato fotossintético, e ao aumento de investimento em mecanismos de fotoproteção, havendo aumento desta variável com o incremento da irradiância, temperatura e melhoria do status nutricional das árvores (Taiz; Zeiger, 2013; Krause *et al.* 2012; Rodrigues; Gonçalves 2014).

Os maiores valores de Chl *a* e Chl *b* e, conseqüentemente, de Chl total para os sistemas agroflorestais e o plantio misto, corroboram com as taxas de fotossíntese observadas para os respectivos tratamentos. Considerando o mesmo tratamento em períodos diferentes, as diferenças observadas quanto ao teor de pigmentos cloroplastídicos, estão ligadas às condições hídricas do ambiente nestes períodos. No presente estudo, isso fica mais evidente quando se observa a redução desses valores do período de maior precipitação (junho de 2021) ao de menor precipitação (setembro de 2021), conforme exposto na tabela 5. A mesma condição foi verificada em um estudo com *B. excelsa* em plantio experimental, onde o déficit hídrico ocasionou a redução de até 23,3% no teor de clorofilas (Silva *et al.* 2016).

Na condição de déficit hídrico, provavelmente, a Chl *a* e Chl *b* foram reduzidas pelo efeito do acúmulo de espécies reativas de oxigênio (ROS), que ocasionam danos graduais às moléculas de clorofila. Já a redução de C_{x+c} , pode ser explicada por limitações na via de biossíntese dos carotenóides, mediada pelo licopeno (Ruiz-Sola; Rodríguez-Concepción, 2012).

Outro fator que influenciou nessas diferenças, é a maior exposição à irradiância durante o período de menor precipitação. Os estudos indicam que, em condições de alta irradiância há um desequilíbrio entre a síntese e a degradação dos pigmentos fotossintéticos, predominando a degradação das clorofilas por foto-oxidação (Krause *et al.* 2012; Souza *et al.* 2017).

Quanto ao conteúdo relativo de água, os valores observados neste estudo são próximos aos constatados num estudo com *B. excelsa* em plantio experimental, onde os valores de CRA

variaram entre 74 e 77% em condição de maior disponibilidade de água, e entre 42 e 58% quando a disponibilidade hídrica foi menor (Silva *et al.* 2016). As diferenças entre o mesmo tratamento em períodos diferentes estão ligadas à disponibilidade de água no ambiente, de modo que no período de maior precipitação as folhas estão mais hidratadas, refletindo então em maiores valores de CRA. Isso porque esta variável demonstra as condições hídricas das plantas, indicando o conteúdo de água presente nas folhas. Ao se intensificar o déficit hídrico, a planta passa por desidratação do protoplasma que, juntamente com o aumento do extravasamento de eletrólitos, culmina em maior fluidez das membranas através da fuga desses eletrólitos localizados nos compartimentos celulares, culminando em prejuízos para os processos vitais de crescimento e funcionamento celular (Taiz; Zeiger, 2013; Langaro, 2014).

7. CONCLUSÃO

As melhores respostas ecofisiológicas para *B. excelsa* foram verificadas respectivamente nos sistemas agroflorestais e plantio misto, principalmente, em relação a trocas gasosas, teor de pigmentos cloroplastídicos e ganho foliar, refletindo na maior sobrevivência e crescimento em altura da espécie nesses sistemas de plantio. Os resultados obtidos neste estudo mostram a aptidão da castanheira quando cultivada nesses sistemas de plantio para recuperar áreas alteradas, confirmando as hipóteses iniciais dessa pesquisa.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, C.A.; Coutinho, A.C.; Esquerdo, J.C.D.M.; Adami, M.; Venturieri, A.; Diniz, C.G.; Durieux, N.D.L.; Gomes, A.R. 2016. High spatial resolution land use and land cover mapping of the Brazilian Legal Amazon in 2008 using Landsat-5/TM and MODIS data. *Acta Amazônica*, 46: 291-302.
- Almeida, D.S de. 2016. Conceitos básicos. In: Almeida, D.S de. (Ed.). *Recuperação ambiental da Mata Atlântica*. 3 ed. Editus, Ilhéus, Bahia, p.24-30.
- Andersen, L.E. 2015. *A cost-benefit analysis of deforestation in the Brazilian Amazon*. 2 ed. Ipea, Brasília, 50p.
- Benincasa, M.M.P. 1988. *Análise de crescimento de plantas*. 1 ed. FUNEP, Jaboticabal, 42p.
- Bentes, R.S.; Marín, R.A.; Emmi, M.F. 1988. Os cemitérios das castanheiras do Tocantins. *Pará Desenvolvimento*, 23: 18-23.
- Brasil. Decreto nº 97.632, de 10 de abril de 1989. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 12/04/1989.
- Brasil. Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 02/09/1981.
- Brasil. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 27/05/2012.
- Brasil. Lei nº 9.985, de 18 de julho de 2000. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 20/07/2000.
- Bremner, J.M. 1996. Nitrogen-total. In: Sparks, D.L.; Page, A.L.; Helmke, P.A.; H. Loeppert, R.H. (Eds.). *Methods of soil analysis Part 3: Chemical methods*. 1 ed. Soil Science Society of America and American Society of Agronomy, Madison, Wisconsin, p.1085-1121.
- Brienza Júnior, S.; Vieira, I.C.G.; Yared, J.G. 1995. *Considerações sobre a Recuperação de Áreas Alteradas por Atividades Agropecuária e Florestal na Amazônia Brasileira*. 1 ed. Embrapa - Documento 83, Belém, 27p.
- Brown, D.S.; Brown, J.C.; Brown, C. 2016. Land occupations and deforestation in the Brazilian Amazon. *Land use policy*, 54: 331-338.
- Caetano, A.C.; Macedo, R.L.G.; Souto, B.A.D.; Ribeiro, S.C. 2014. Height-diameter equations for brazil nut intercropped with rubber tree in the south of Minas Gerais. *Floresta*, 44: 497-504.
- Carpanezzi, A.A.; Laurent, J.M.E.; Carvalho, P.E.R.; Pegoraro, A.; Baggio, A.J.; Zanon, A.; et al. 1988. *Manual técnico da bracatinga (Mimosa scabrella Benth)*. 1 ed. Embrapa, Curitiba, 70p.
- Coble, A.P.; Autio, A.; Cavaleri, M.A.; Binkley, D.; Ryan, M.G. 2014. Converging patterns of vertical variability in leaf morphology and nitrogen across seven *Eucalyptus* plantations in Brazil and Hawaii, USA. *Trees*, 28: 1-15.

Costa, J.R.; Castro, A.B.C.; Wandelli, E.V.; Coral, S.C.T.; Souza, S.A.G. de. 2009. Aspectos silviculturais da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) em sistemas agroflorestais na Amazônia Central. *Acta Amazônica*, 39: 843-850.

Costa, K.C.P. da. 2019. *Ecophysiology and growth of Bertholletia excelsa Bonpl. in response to thinning, liming and phosphorus addition*. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/ Laboratório de Fisiologia e Bioquímica Vegetal, Manaus, Amazonas. 120p.

Costa, K.C.P. da; Ferraz, J.B.S.; Bastos, R.P.; Ferreira, M.J.; Reis, T. da S.; Trindade; A. de S. Guimarães, G.P. 2014. Estoques de biomassa e nutrientes em três espécies de *Parkia* em plantios jovens sobre área degradada na Amazônia central. *Floresta*, 44: 637-646.

Costa, K.C.P. da; Jaquetti, R.K.; Gonçalves, J.F. de C. 2020. Chlorophyll *a* fluorescence of *Bertholletia excelsa* Bonpl. plantations under thinning, liming, and phosphorus fertilization. *Photosynthetica*, 58: 138-145.

Cunha, H.F.V.; Gonçalves, J.F. de C.; Santos Junior, U.M. dos; Ferreira, M.J.; Peixoto, P.H.P. 2016. Biomassa, trocas gasosas e aspectos nutricionais de plantas jovens de pau de balsa (*Ochroma pyramidale* (Cav. Ex Lamb.) Urb.) submetidas à fertilização fosfatada em ambientes contrastantes de irradiância. *Scientia Forestalis*, 44: 215-230.

Costa, K., de Carvalho Gonçalves, J., Gonçalves, A. et al. 2022. Advances in Brazil Nut Tree Ecophysiology: Linking Abiotic Factors to Tree Growth and Fruit Production. *Current Forestry Reports*, 8: 90–110.

Embrapa. 1999. *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. 1 ed. Embrapa, Brasília, 370p.

Embrapa. 1997. *Manual de métodos de análise de solo*. 2 ed. Embrapa, Rio de Janeiro, 212p.

FAO. 2022. The State of the World's Forests 2020. (<http://www.fao.org/state-of-forests/en/>). Acesso em 22/08/2022.

Fauset, S.; Johnson, M.O.; Gloor, M.; Baker, T.R.; Monteagudo, A.M.; Brienen, R.J.W.; et al. 2015. Hyperdominance in Amazonian forest carbon cycling. *Nature Communications*, 6: 6857.

Fearnside, P.M. 2019. Impactos das hidrelétricas na Amazônia e a tomada de decisão. *Novos Cadernos NAEA*, 22: 69-96.

Souza, J. P.; Gonçalves, J. F. de C.; Jaquetti, R. K. ; Costa, K. C. P.; Lima, R. M. B.; Fearnside, P. M.; Rocha N. J. A. 2022. Silvicultural interventions and agroforestry systems increase the economic and ecological value of *Bertholletia excelsa* plantations in the Amazon. *Agroforestry Systems JCR*, 4: 01-10.

Fernandes, N.P.; Alencar, J. da C. 1993. Desenvolvimento de árvores nativas em ensaios de espécies. 4. Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.), dez anos após o plantio. *Acta Amazônica*, 23: 191-198.

Ferreira, L.M.; Tonini, H. 2009. Comportamento da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) e da cupiúba (*Goupia glabra*) em sistema agrossilvicultural na região de Confiança, Cantá, Roraima. *Acta Amazônica*, 39: 835-842.

Ferreira, M.J.; Gonçalves, J.F.; Ferraz, J.B.S. 2012. Crescimento e eficiência do uso da água de plantas jovens de castanha-da-Amazônia em área degradada e submetida à adubação. *Ciência Florestal*, 22: p.393-401.

Ferreira, M.J.; Gonçalves, J.F.C.; Ferraz, J.B.S. 2009. Photosynthetic parameters of young Brazil nut (*Bertholletia excelsa* H. B.) plants subjected to fertilization in a degraded area in Central Amazonia. *Photosynthetica*, 47: 616–620.

Ferreira, M.J.; Gonçalves, J.F. de C.; Ferraz, J.B.S.; Santos Junior, U.M. dos. Rennenberg, H. 2016. Clonal variation in photosynthesis, foliar nutrient concentrations, and photosynthetic nutrient use efficiency in a Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) plantation. *Forest Science*, 62: 323–332.

Ferreira, O.G.L.; Rossi, F.D.; Andrighetto, C. 2008. *DDA: Determinador Digital de Áreas – software para determinação de área foliar, índice de área foliar e área de olho do lombo*. Versão 1.2. Santo Augusto: IFFarroupilha.

Gonçalves, A.L.; Cruz, V.M.S. da; serra, A.B. 2019. Fragmentação florestal na Região de Integração do Lago de Tucuruí, Pará, Brasil. *Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences*, 62: 1-10.

Gomes, W. de B. 2018. *Balanço de água na Amazônia: o papel do desflorestamento e das mudanças climáticas*. Dissertação de Mesrado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Programa de Pós-graduação em Clima e Ambiente, Manaus, Amazonas. 92p.

Guimarães, Z.T.M.; Santos V.A.H.F dos; Nogueira, W.L.P.; Martins, N.O de A.; Ferreira, M.J. 2018. Leaf traits explaining the growth of tree species planted in a Central Amazonian disturbed área. *Forest Ecology and Management*, 430: 618–628.

Hendry, G.A.F.; Price, A.H. 1993. Stress indicators: chlorophylls and carotenoids. In: Hendry, G.A.F.; Grime, J.P. (Eds.). *Methods in comparative plant ecology: A laboratory manual*. 1 ed. Chapman e Hall, London, England, p.148-152.

Hentz, A.; Maneschy, R. (Orgs.). 2011. *Práticas Agroecológicas: soluções sustentáveis para a agricultura familiar na região sudeste do Pará*. 1 ed. Paco Editorial, Jundiaí, 330p.

Homma, A.K.O.; Carvalho R.A.; Ferreira, C.A.P.; Nascimento, J.D.N. 2000. *A destruição de recursos naturais: o caso da castanha-do-pará no sudeste paraense*. Embrapa Amazônia Oriental - Documento 32, Belém, 74p.

Homma, A.K.O. (Ed.). 2014. *Extrativismo vegetal na Amazônia: história, ecologia, economia e domesticação*. 1 ed. Embrapa, Brasília, 468p.

ICMBIO. Instrução Normativa nº 11, de 11 de dezembro de 2014. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 13/12/2014.

INMET. 2019. *Dados climáticos anuais*. (<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=clima/page&page=anomalTempMediaAnual>). Acesso em 05/05/2020.

INPE. 2019. *Projeto de Estimativa de Desflorestamento da Amazônia (PRODES): taxas anuais do desmatamento – 2004 até 2019*. (<http://www.obt.inpe.br/OBT/assuntos/programas/amazonia/prodes>). Acesso em 12/04/2020.

INPE. 2020. *Levantamento de alertas de evidências de alteração da cobertura florestal na Amazônia: degradação*. (<http://terrabrasilis.dpi.inpe.br/downloads/>). Acesso em 15/05/2020.

INPE. 2016. *Projeto de Estimativa de Desflorestamento da Amazônia (PRODES: taxas anuais do desmatamento – 1988 até 2016*. (http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2026n.htm). Acesso em 19/05/2020.

Jaquetti, R.K.; Gonçalves, J.F. de C. 2017. Carbon and nutrient stocks of three Fabaceae trees used for forest restoration and subjected to fertilization in Amazônia. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 89: 1-11.

Jaquetti, R.K.; Nascimento, H. E. M.; Zotarelli, L.; Rathinasabapathi, B.; Gonçalves, J.F. de C. 2021. Coordinated adjustments of carbohydrates and growth of tree legumes under different fertilization regimes in degraded areas in Amazonia. *New Forests*, 3: 1-10.

Jaquetti, R.K.; Gonçalves, J.F. de C.; Ferraz, J.B.S.; Ferreira, M.J.; Santos Junior, U.M dos. 2016. Ecofunctional traits and biomass production in leguminous tree species under fertilization treatments during forest restoration in Amazônia. *Forests*, 7: 76-79.

Jaquetti, R.K.; Gonçalves, J.F. de C.; Ferraz, J.B.S.; Ferreira, M.J. Santos Junior, U.M. dos; Lacerda, C.F. de. 2014. Green fertilization enhances the photosynthetic performance and the growth of leguminous trees for restoration plantation in Central Amazon. *American Journal of Plant Sciences*, 5: 2497-2508.

Jiménez-Muñoz, J.C.; Mattar, C.; Barichivich, J.; Santamaría-Artigas, A.; Takahashi, K.; Malhi, Y.; Sobrino, J.A.; Schrier, G.V.D. 2016. Record-breaking warming and extreme drought in the Amazon rainforest during the course of El Niño 2015–2016. *Scientific Reports*, 6: 33130.

Jourgholami, M.; Ghassemi, T.; Labelle, E.R. 2019. Soil physio-chemical and biological indicators to evaluate the restoration of compacted soil following reforestation. *Ecological Indicators*, 101: 102-110.

Jucoski, G.O; Cambraia, J.; Ribeiro, C.;e Juraci Alves de Oliveira, J.A.O. 2016. Excesso de ferro sobre o crescimento e a composição mineral em *Eugenia uniflora* L. *Ciência Agrônômica*, 47: p. 720-728.

Kageyama, P. Y. 1992. Recomposição da vegetação com espécies arbórea nativas em reservatórios de usinas hidrelétricas da CESP. *IPEF - Série Técnica*, 8: 1-43.

Köppen, W. 1948. *Climatologia: un estudio de los climas de la tierra*. 1 ed. Fondo de Cultura Econômica, México, 479p.

Krag, M.N.; Santana, A.C de; Salomão, R. de P.; Martins, C.M.; Gomes, S.C. 2017. A governança do arranjo produtivo local da castanha-do-Brasil na Região da Calha Norte, Pará. *Revista de Economia e Sociologia Rural*, 55: 589-608.

Krause, G. H. 2012. Photosynthesis, photoprotection, and growth of shade-tolerant tropical tree seedlings under full sunlight. *Photosynthesis research, Tempe*, 113: 273-285.

Leite, C.M.B.; Bernardes, R.S.; Oliveira, S.A. de. 2004. Método Walkley-Black na determinação da matéria orgânica em solos contaminados por chorume. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 8: 111-115.

Lichtenthaler, H.K.; Wellburn, A.R. 1983. Determination of total carotenoids and chlorophyll *a* and *b* of leaf extrats in different solvents. *Biochemical Societ Transactions*, 11: 591-603.

Lopes, J. de S.; Costa, K.C.P. da; Fernandes, V.S.; Gonçalves, J.F. de C. Functional traits associated to photosynthetic plasticity of young Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) plants. *Flora*, 258: 1-9.

Madeira, W. do V. 2014. Plano Amazônia sustentável e desenvolvimento desigual. *Ambiente & Sociedade*, 17: 19-34.

Matos, G.S.B. de; George Rodrigues da Silva, G.R. da S.; Gama, M.A.P.; Vale, R.S. do; Jonas Elias Castro da Rocha, E.C. da. 2012. Desenvolvimento inicial e estado nutricional de clones de eucalipto no nordeste do Pará. *Acta Amazônica*, 42: 491-500.

May, P.H.; Trovatto, C.M.M. 2008. *Manual agroflorestal para a Mata Atlântica*. 1 ed. Ministério do Desenvolvimento Agrário, Brasília, 196p.

Nascimento, N.F. do; Nascimento, L.B. de B. do; Gonçalves, J.F. de C. 2019. Respostas funcionais foliares de plantas jovens de *Hevea brasiliensis* submetidas à deficiência hídrica e à reidratação. *Ciências Florestais*, 29: 1019-1032.

Nogueira, W.L.P.; Ferreira, M.J.; Martins, N.O. de A. 2018. Estádio inicial da regeneração natural de espécies arbóreas em área alterada no Estado do Amazonas. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 38: 1-8.

Langaro, A.C.; Nohatto, M.A.; Lais Tessari Perboni, L.T.; Camila Peligrinotti Tarouco, C.P.; Agostinetto, D. 2014. Alterações fisiológicas na cultura do tomateiro devido à deriva simulada de herbicidas. *Revista Brasileira de Herbicidas*, 13: 40-46.

Locatelli, M.; Marcante, P.H.; Cipriani, H.N.; Martins, E.P.; Vieira, A.H. 2015. Avaliação do crescimento da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) em um plantio no município de Machadinho do Oeste - Rondônia. *Enciclopédia Biosfera*, 11: 457-470.

Martins, S.V. 2013. *Recuperação de área degradadas: como recuperar áreas de preservação permanente, voçorocas, taludes rodoviários e áreas de mineração*. 3 ed. Aprenda Fácil, Viçosa, 264p.

Melo, V.F.; Batista, A.H.; Barbosa, J.Z.; Barbeiro, L.; Gomesc, R.; Dultra, M.T.M. 2019. Soil quality and reforestation of the Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) after laterite-type bauxite mining in the Brazilian Amazon forest. *Ecological Engineering*, 125: 111-118.

Miyazawa, M.; Pavan, M.A.; Muraoka, T.; Carmo, C.A.F.S.; Melo, W.J. 1999. Análise química de tecidos vegetais. In: Silva, F.C. (Ed.). *Manual de análise química de solos, plantas e fertilizantes*. 1 ed. EMBRAPA, Brasília, Distrito Federal, p.172-223.

Morais Junior, V.T.M. de; Jacovine, L.A.G.; Torres, C.M.M.E.; Alves, E.B.B.M.; Paiva, H.N.; laCruz, R.A. de; Zanuncio, J.C. 2019. Early assessment of tree species with potential for carbon offset plantations in degraded area from the southeastern Brazil. *Ecological Indicators*, 98: 854-860.

Mori, S.A.; Prance, G.T. 1990. Taxonomy, ecology, and economy botany of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa* Humb. and Bonpl.: Lecythidaceae). *Advances in Economic Botany*, 8: 130-150.

Murphy, J.; Riley, J.P. 1962. A modified single solution reagent for the determination of phosphate in natural waters. *Analytica Chimica Acta*, 27: 31-36.

Oliveira, T.J.F. de; Barroso, D.G.; Andrade, A.G. de; Freitas, S. de J. 2016. Consórcio de espécies nativas da Mata Atlântica com milho e feijão para revegetação de mata ciliar na região Noroeste Fluminense. *Floresta*, 46: 315-324.

Oliveira, T.K. de; Marinho, J.T. de S.; Sá, C.P. de; Costa, C.R. da; Silva, D.V. da; Bayma, M.M.A. 2017. *Desempenho financeiro no período de estabelecimento de um consórcio agroflorestal com açaizeiro, bananeira, castanheira e seringueira*. Embrapa - Comunicado Técnico 198, Rio Branco, 12p.

Passos, R.M. de O.; Azevedo, C. P. de; Lima, R.M.B. de; Souza, C.R. de. 2018. *Características biométricas e produção de frutos de castanha-da-Amazônia em plantios clonais na Amazônia Central*. Embrapa Amazônia Ocidental - Documento 140, Manaus, 37p.

Paula, P.D. de; Campello, E.F.C.; Guerra, J.G.M.; Santos, G. de A.; Resende, A.S. de. 2015. Decomposição das podas de leguminosas arbóreas *Gliricidia sepium* e *Acacia angustissima* em um sistema agroflorestal. *Ciência Florestal*, 25: 791-800.

Peña-Claros, M.; Boot, R.G.; Dorado-Lora, J.; Zonta, A. 2002. Enrichment planting of *Bertholletia excelsa* in secondary forest in the Bolivian Amazon: effect of cutting line width on survival, growth and crown traits. *Forest Ecology and Management*, 161: 159-168.

Pinheiro, J.C.; Bates, D.M.; Debroy S.; Sarkar, D. 2018. nlme: Linear and Nonlinear Mixed Effects Models. *R package version 3*, 3:1-93.

R Core Team. 2018. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Versão 3. Vienna: R Foundation for Statistical Computing.

Ribeiro, C.F.D. de A. 2015. *Recuperação de áreas degradadas*. 1 ed. NT Editora, Brasília, 143p.

Rodrigues, J.C.; Miranda, I.S.; Sousa, A.M.L de. 2018. Microclimate in understories of a mango orchard and a degraded area in the Eastern Amazon. *Ambiente e Água*, 13: 01-10.

Ruiz-Sola, M.A; Rodríguez-Concepción, M. 2012. Carotenoid biosynthesis in Arabidopsis: A colorful pathway. *The Arabidopsis Book*, 10:1-28.

Rodrigues, J. V. F. C.; Gonçalves, J. F. de C. 2014. Leaf Gas Exchange, Photon Capture and Light Harvest in *Aldina heterophylla* along a Vegetation Gradient in the Amazon Rainforest. *American Journal of Plant Sciences*, 5: 1477-1488.

Salomão, R. de 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: 139-151.

Salomão, R. de P, Santana, A.C. de; Brienza Júnior; S.; Rosa, N. de A.; Precinoto, R.S. 2014. Crescimento de *Bertholletia excelsa* Bonpl. (castanheira) na Amazônia trinta anos após a mineração de bauxita. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais*, 9: 307-320.

Salomão, R. de P.; Sousa, V.G de; Brienza Júnior, S.; Barbosa, M.G.; Hage, A.L.F. 2020. Trajetória da restauração florestal de áreas mineradas ao longo de 17 anos em unidade de conservação na Amazônia. *Brazilian Journal of Development*, 6: 3588-3609.

Santos, A.M.S. dos; Ferreira, M.J.; Gonçalves, J.F. de C.; Justino, G.C. 2017. Efeito da fertilização amoniacal na aclimação de ingá sob alta e moderada irradiância. *Floresta e Ambiente*, 24: 1-10.

Santos, H.G. dos; Carvalho Junior, W. de; Dart, R. de O.; Áglio, M.L.D.; Sousa, J. da S.; Pares, J.G.; Fontana, A.; Martins, A.L. da S; Oliveira, A.P. de. 2011. *O novo mapa de solos do Brasil Legenda Atualizada*. 1 ed. Embrapa, Rio de Janeiro, 67p.

Santos, M.J.; Disney, M.; Chave, J. 2018. Detecting human presence and influence on neotropical forests with remote sensing. *Remote Sensing*, 10: 2-18.

Santos-Silva, L.; Silva, L. C. D. P. da; Corassa, J. D. N.; Battirola, L. D. 2017. The Brazil nut tree (*Bertholletia excelsa* Humb. & Bonpl. (Lecythidaceae)): Importance and biological interactions. *Scientific Electronic Archives*, 10: 01-14.

Santos, V.A.H.F.; Ferreira, M.J. 2020. Initial establishment of commercial tree species under enrichment planting in a Central Amazon secondary forest: Effects of silvicultural treatments. *Forest Ecology and Management*, 460: 117822.

Sathler, D.; Adamo, S.B.; Lima, E.E.C. 2018. Deforestation and local sustainable development in Brazilian Legal Amazonia: an exploratory analysis. *Ecology and Society*, 23: 30.

Santiago, L. S.; Wright, S. J. Leaf functional traits of tropical forest plants in relation to growth form. *Functional Ecology*, 21: 19-27.

Scoles, R.; Canto, M.S.; Almeida, R.G.; Vieira, D.P. 2016. Sobrevivência e frutificação de *Bertholletia excelsa* Bonpl. em áreas desmatadas em Oriximiná, Pará. *Floresta e Ambiente*, 23: 555-564.

Scoles, R.; Gribel, R. 2012. The regeneration of Brazil nut trees in relation to nut harvest intensity in the Trombetas River valley of Northern Amazônia, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 265: 71-81.

Scoles, R.; Gribel, R.; Klein, G.N. 2011. Crescimento e sobrevivência de castanheira (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) em diferentes condições ambientais na região do rio Trombetas, Oriximiná, Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais*, 6: 273-293.

Scoles, R.; Klein, G.N.; Gribel, R. 2014. Crescimento e sobrevivência de castanheira (*Bertholletia excelsa* Bonpl., Lecythidaceae) plantada em diferentes condições de luminosidade após seis anos de plantio na região do rio Trombetas, Oriximiná, Pará. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi - Ciências Naturais*, 9: 321-336.

Shimpl, F.C.; Ferreira, M.J.; Jaquetti, R.K.; Martins, S.C.V.; Gonçalves, J.F. de C. 2019. Physiological responses of young Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) plants to drought stress and subsequent rewatering. *Flora*, 252: 10-17.

Silva, B.I.A.; Salomão, R. de P. Santana, A.C de; Sousa, V.G. de; Hage, A.L.F. 2020. Predação de mudas de castanheira (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) em áreas sob restauração florestal na Amazônia. *Brazilian Journal of Development*, 6: 20667-20689.

Silva, P.F.N.; Souza, C.L.F. de C.; Chagas, J.R.M.; Maciel, G.M.; Marques, D.J.; Lobato, A.K.; Silva, M.H.L. da; Ferreira, T.R.; Barbosa, M.A.M.; Braga, R. de O.; Correa, T.B.C.; Alves, G.A.R.; Barros, D. de S.; Sena, J.R. 2016. Photosynthetic pigments and carbohydrates in young Brazil nut (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) plants exposed to moderate and severe water deficiency. *Australian Journal of Crop Science*, 10: 920-925.

Siqueira-Gay, J.; Yanai, A.M.; Lessmann, J.; Pessôa, A.C.M.; Borja, D.; Canova, M.; Borges, R.C. 2020. Pathways to positive scenarios for the Amazon forest in Pará state, Brazil. *Biota Neotropica*, 20: 1186-1197.

Slavick, B. 1979. *Methods of Studying Plant Water Relations*. Springer Verlag, New York, 449p.

Soares, J.E.C.; Van Leeuwen, J.; Gomes, J.B.M. 2004. O desenvolvimento da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) em plantios agroflorestais no município de Manacapuru, Amazonas, Brasil. In: *Anais V Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais*. Embrapa Florestas, Curitiba, p.380-382.

Souza, C.R. de; Azevedo, C.P. de; Lima, R.M.B. de; Rossi, L.M.B. 2010. Comportamento de espécies florestais em plantios a pleno sol e em faixas de enriquecimento de capoeira na Amazônia. *Acta Amazônica*, 40: 127-134.

Souza, C.R. de; Lima, R.M.B. de; Azevedo, C.P. de; Rossi, L.M.B. 2008. Desempenho de espécies florestais para uso múltiplo na Amazônia. *Scientia Forestalis*, 36: 7-14.

Souza, C.S. do C.R. de; Santos, V.A.H.F. dos; Ferreira, M.J.; Gonçalves, J.F. de C. 2017. Biomassa, crescimento e respostas ecofisiológicas de plantas jovens de *Bertholletia excelsa* Bonpl. submetidas a diferentes níveis de irradiância. *Ciência Florestal*, 27: 557-569.

Souza, E.B. de; Carmo, A.M.; Moraes, B.C.; Nacif, A.; Ferreira, D.B. da S.; Rocha, E.J.P.; Souza, P.J. de O.P. 2016. Sazonalidade da precipitação sobre a Amazônia legal brasileira: clima atual e projeções futuras usando o modelo REGCM4. *Revista Brasileira de Climatologia*, 18: 293-306.

Strasser, R.J.; Tsimilli-Michael, M.; Qiang, S.; Goltsev, V. 2010. Simultaneous in vivo recording of prompt and delayed fluorescence and 820-nm reflection changes during drying and after rehydration of the resurrection plant *Haberlea rhodopensis*. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1797: 1313-1326.

Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I.M.; Murphy, A. 2017. *Fisiologia e desenvolvimento Vegetal*. 6 ed. Porto Alegre, Artmed Editora, 888p.

Tonini, H.; Arco-Verde, M.F. 2005. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40: 633-638.

Tonini, H.; Arco-Verde, M.F.; Sá, S.P.P. 2005. 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 Amazônica*, 35: 353-362.

Tourne, D.C.M.; Ballester, M.V.R.; James, P.M.A.; Martorano, L.G.; Guedes, M.C.; Thomas, E. 2019. Strategies to optimize modeling habitat suitability of *Bertholletia excelsa* in the Pan-Amazonia. *Ecology and Evolution*, 9: 23-38.

Vieira, A.H.; Locatelli, M.; Souza, V.F. de. 1998. *Crescimento de castanha-do-brasil em dois sistemas de cultivo*. Embrapa – Boletim de Pesquisa 22, Porto Velho, 12p.

Viera, M.; Schumacher, M.V.; Liberalesso, E.; Caldeira, M.V.W.; Watzlawick, L.F. 2013. Plantio Misto de *Eucalyptus* spp. com Leguminosas Arbóreas Fixadoras de Nitrogênio. *Floresta e Ambiente*, 20: 16-25.

Waldhoff, P.; Vidal, E. 2019. Da ilegalidade à certificação florestal: estudo de caso do manejo florestal comunitário no Baixo Amazonas. *Ciência Florestal*, 29: 1748-1762.

Yared, J.A.G.; Kanashiro, M.; Viana, L.M.; Castro, T.C.A de; Pantoja, J.R. de S. Comportamento silvicultural de castanheira (*Bertholletia excelsa* H. B. K.) em diversos locais da Amazônia. In: *Congresso Florestal Panamericano*. Sociedade Brasileira de Silvicultura/Sociedade Brasileira de Engenheiros Florestais, Curitiba, p.416-419.