

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS DE FLORESTAS
TROPICAIS

RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS DE PLANTAS JOVENS DE *Bertholletia
excelsa* Bonpl. SUBMETIDAS À FERTILIZAÇÃO EM PLANTIO
HOMOGÊNEO

IANE BARRONCAS GOMES

Manaus, Amazonas

Março de 2012

IANE BARRONCAS GOMES

RESPOSTAS ECOFISIOLÓGICAS DE PLANTAS JOVENS DE *Bertholletia excelsa* Bonpl.
SUBMETIDAS À FERTILIZAÇÃO EM PLANTIO HOMOGÊNEO

Orientador: Dr. José Francisco de Carvalho Gonçalves

Dissertação apresentada ao Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências de Florestas Tropicais.

Manaus, Amazonas

Março de 2012

Ficha catalográfica

G633 Gomes, Iane Barroncas

Respostas ecofisiológicas de plantas jovens de *Bertholletia excelsa*
H. B. submetidas à fertilização em plantio homogêneo / Iane Barroncas
Gomes. --- Manaus : [s.n.], 2012.
xi, 59 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências de Florestas Tropicais)--INPA,
Manaus, 2012.

Orientador: Dr. José Francisco de Carvalho Gonçalves

Área de concentração: Manejo Florestal e Silvicultura

1. Castanha-da-Amazônia 2. Ecofisiologia vegetal 3. Adubação
3. *Bertholletia excelsa* H. B. I. Título

CDD 19ª ed. 634.575

Sinopse:

Foram estudados os parâmetros de crescimento, os aspectos nutricionais, as trocas gasosas, as condições hídricas, os teores de pigmentos cloroplastídicos e a fluorescência da clorofila *a* num plantio homogêneo de *Bertholletia excelsa* Bonpl. submetido à diferentes tipos de fertilização.

Palavras-chave: plantios florestais, castanha-da-amazônia, adubação, ecofisiologia.

AGRADECIMENTOS

A **Deus**, por absolutamente tudo.

À **minha família**, pelas orações, paciência, compreensão e apoio logístico.

Ao **namorado**, pelo apoio psicológico e também logístico.

Ao Dr. José Francisco de Carvalho Gonçalves, pela orientação, contribuição ao meu crescimento profissional e pessoal e oportunidade de execução da pesquisa junto ao Laboratório de Fisiologia e Bioquímica Vegetal (LFBV). Ao Marciel pela colaboração, apoio, paciência, disponibilidade e generosidade em dividir sua experiência técnica e acadêmica. Aos colegas do LFBV, pela ajuda de campo e de laboratório, sugestões de melhorias no trabalho e amizade, especialmente Saul, Viviane, Sabrina, Vanderlei, Cristiane, Aurora, Gilberto e Carlos. Também agradeço ao Pedro e Mebly por me acompanharem em coletas de campo.

À Empresa Agropecuária Aruanã, na pessoa do Sr. Sérgio Vergueiro, pelo total apoio à realização da pesquisa, fornecendo insumos, mão-de-obra, alojamento e alimentação. Agradecimentos especiais ao Sr. Gabriel, Nonato, D. Ana, Jônatas, Dr. Roberval e todos os funcionários que me ajudaram no estabelecimento e condução do experimento, sem os quais eu não teria conseguido abrir sequer uma cova para o plantio, e ainda, à Bete, por preparar nossos almoços e jantares sempre com muito capricho e assuntos para conversar.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais (CFT), pela experiência única em termos de formação profissional, a todos os professores e funcionários. Ao CNPq, pela concessão da bolsa. Aos colegas da turma 2010, Diego, Raiane, Hudson, Felipe, Roberto, Fernando, Clarissa, Lívia, Carol, Leandro, Mateus, Gabriel e Adriano, por fazerem parte desta fase tão peculiar da minha vida. À equipe do Laboratório Temático de Solos e Plantas, Edivaldo, Orlando, Lita e Jonas pelo suporte na fase das análises de laboratório. Ao Dr. João Ferraz, Jair e Marcelo pelo empréstimo de equipamentos e disponibilidade. Ao Dr. Zilton Santos, pelo auxílio na interpretação dos resultados da análise de solo. Por fim um agradecimento especial aos companheiros de "casa", Wanner, Stéphanie e Raiane não só pela divisão das despesas, mas pela convivência pacífica, companheirismo, identificação, amizade e incentivo.

A todos, muito sucesso e gratidão sem fim.

RESUMO

O êxito de plantios florestais depende, dentre outros fatores, do conhecimento acerca dos aspectos silviculturais das espécies. A castanheira (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) tem demonstrado potencial para formação de plantios homogêneos e sistemas agroflorestais devido às suas excelentes características silviculturais, porém ainda existem muitas lacunas no conhecimento sobre a fisiologia desta espécie. Este trabalho foi desenvolvido com o objetivo de investigar as respostas de crescimento, fotossintéticas, hídricas e nutricionais de plantas jovens de *B. excelsa* sob diferentes tratamentos de fertilização, com destaque para o nitrogênio, crescendo em plantio homogêneo. Os tratamentos foram: T0 (controle), T1 (Ca + Mg), T2 (Ca + Mg + micronutrientes + K) e T3 (Ca + Mg + micronutrientes + K + N). Além da análise de fertilidade do solo, foram medidos: o crescimento em altura, o diâmetro à altura do solo, o ganho foliar e o índice de ganho foliar, a área foliar, área foliar específica e massa da matéria seca das plantas, bem como os teores de nutrientes foliares, a eficiência no uso dos nutrientes, as trocas gasosas, o potencial hídrico foliar, os teores de pigmentos cloroplastídicos e a fluorescência da clorofila *a*. Com relação ao crescimento em altura e diâmetro à altura do solo, T0, T2 e T3 exibiram resultados semelhantes, com taxas médias de crescimento mensal de 3,0, 3,1 e 3,4 cm mês⁻¹, respectivamente. Os tratamentos T2 e T3 destacaram-se no acúmulo de biomassa e exibiram ganho foliar duas vezes maior em comparação aos tratamentos T0 e T1. A adição de N aos indivíduos do T3 permitiu maior investimento em tecido foliar, com média para os valores de área foliar de 114,2 cm², valor 53, 43 e 35% superior aos tratamentos T2, T1 e T0, respectivamente. Não houve diferença entre os tratamentos para área foliar específica. Quanto aos teores foliares de nutrientes, as maiores concentrações de N foram encontrados no tratamento T3, enquanto os maiores teores de Ca e Mg foram observados no T1, os teores de Ca foram cinco vezes maiores aos encontrados no tratamento T3. Não houve diferença nos teores de P entre os tratamentos. T3 foi mais eficiente no uso de N, P, Ca, Mg e Zn, enquanto T2 foi mais eficiente no uso de K e Fe. As taxas de fotossíntese máxima estimada variaram entre 9,0 e 10,6 μmol m⁻² s⁻¹. Não houve diferença entre os tratamentos para as taxas e respiração, condutância estomática e transpiração. Os maiores valores de eficiência no uso da água e eficiência intrínseca no uso da água foram observados no T0. O potencial hídrico medido na antemanhã variou entre -0,29 (T3) e -0,26 (T1) MPa e ao meio dia variou entre -2,7 (T1) e -1,7 (T3) MPa. Os teores de clorofila *a* e carotenoides foram maiores no tratamento T0 com 0,91 e 0,54 μmol g⁻¹, não houve diferença para o conteúdo de clorofila *b* entre os tratamentos. O índice de conteúdo de clorofila indicou os mesmos resultados. As análises de fluorescência da clorofila *a* revelaram que não houve diferença entre os tratamentos para fluorescência inicial, máxima e variável, com valores da razão Fv/Fm inferiores para o tratamento T3. Diante destes resultados, pode-se inferir que plantas jovens de *B. excelsa* crescendo em plantios homogêneos em solo corrigido com adição de micronutrientes e de nitrogênio mineral responderam quanto aos aspectos biométricos, com exceção dos efeitos relacionados à correção da acidez que não foram eficientes com relação às variáveis biométricas. Adicionalmente, conclui-se que a fertilização nitrogenada exibiu reflexos diretos, com incrementos sobre o *status* nutricional de plantas jovens de *B. excelsa*. Porém, não houve diferenças entre os tratamentos nas taxas de fotossíntese, transpiração, condutância estomática, respiração no escuro e teores de clorofilas, além de não ter influenciado o uso e a dissipação de energia.

ABSTRACT

The success of forest plantations depends, among other factors, on knowledge about the silvicultural aspects of species. Brazil nut (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) has demonstrated potential to form homogeneous stands and agroforestry systems due to its excellent features, but there are many gaps in knowledge about the physiology of this species. This work was carried out to investigate the responses of growth, photosynthesis, water and nutritional status of young plants of *B. excelsa* under different fertilization treatments, especially nitrogen, growing in homogeneous stands. The treatments were: T0 (control), T1 (Ca + Mg), T2 (Ca + Mg + K + micronutrients) and T3 (Ca + Mg + micronutrients + K + N). Besides the analysis of soil fertility, were measured: height, diameter at ground level, leaf gain and leaf gain index, leaf area, specific leaf area and dry mass, as well as leaf nutrient content, nutrient use efficiency, gas exchange, leaf water potential, pigment contents and chlorophyll *a* fluorescence. Regarding the growth in height and diameter at ground level, T0, T2 and T3 showed similar results, with average monthly growth of 3.0, 3.1 and 3.4 cm month⁻¹, respectively. T2 and T3 stood out for biomass, T3 leaf gain exhibited was two times higher compared to T0 and T1. The addition of N to T3 individuals allowed greater investment in leaf tissue, with average values of leaf area of 114.2 cm², value 53, 43 and 35% higher than T2, T1 and T0, respectively. There was no difference between treatments for specific leaf area. As for nutrient content, the highest concentrations of N were found in T3, while the higher Ca and Mg were observed in the T1, Ca levels were five times higher than those found in T3. There was no difference in P concentrations among treatments. T3 was more efficient in the use of N, P, Ca, Mg and Zn, while T2 was more efficient in use of Fe and K. Photosynthesis rates estimated ranged between 9.0 and 10.6 mmol m⁻² s⁻¹. There was no difference between treatments for dark respiration, stomatal conductance and transpiration. The highest values of water use efficiency and intrinsic water use efficiency were observed in T0. The measured predawn leaf water potential ranged from -0.29 (T3) and -0.26 (T1) MPa and at midday ranged from -2.7 (T1) and 1.7 (T3) MPa. The content of chlorophyll *a* (0.91 mmol g⁻¹) and carotenoids (0.54 mmol g⁻¹) were higher in treatment T0 and there was no difference in content of chlorophyll *b* between treatments. The chlorophyll content index showed the same results. Analyzes of chlorophyll *a* fluorescence revealed no differences between treatments for initial, maximum and variable fluorescence, with values of Fv / Fm ratio lower for T3. From this results, it can be inferred that young plants of *B. excelsa* growing in homogeneous plantations in limed soil with the addition of micronutrients and mineral nitrogen answered regarding the biometric aspects, except for liming that were not efficient with respect to biometric variables. Additionally, it is concluded that nitrogen fertilization showed direct reflexes, with increases in nutritional status and photosynthetic rates of young plants of *B. excelsa*. However, no differences between treatments in transpiration, stomatal conductance, dark respiration and chlorophyll contents, were found. Besides that, fertilization had no influence on energy use and dissipation.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	iii
RESUMO.....	iv
ABSTRACT.....	v
LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	x
INTRODUÇÃO.....	1
1 OBJETIVOS.....	4
1.1 Geral.....	4
1.2 Específicos.....	4
2 HIPÓTESE.....	5
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	5
3.1 Área de estudo.....	5
3.2 Descrição do experimento.....	5
3.3 Coleta de dados.....	8
3.3.1 Medidas biométricas.....	8
3.3.2 Análises químicas e de fertilidade do solo.....	9
3.3.3 Teores de nutrientes foliares e eficiência no uso de nutrientes.....	9
3.3.4 Medidas de trocas gasosas.....	10
3.3.5 <i>Status</i> hídrico foliar.....	11
3.3.6 Teores de pigmentos cloroplastídicos.....	12
3.3.7 Fluorescência da clorofila <i>a</i>	12
3.4 Desenho experimental e análise estatística.....	12
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
4.1 Biometria.....	13
4.2 <i>Status</i> nutricional do plantio.....	17
4.2.1 Fertilidade do solo.....	17
4.2.2 Nutrientes foliares e eficiência no uso dos nutrientes.....	20
4.3 Trocas gasosas.....	24
4.4 <i>Status</i> hídrico do plantio.....	27
4.5 Teores foliares de pigmentos cloroplastídicos.....	28

4.6 Fluorescência da clorofila <i>a</i>	30
CONCLUSÕES.....	35
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
ANEXOS.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise química e de fertilidade do solo (profundidade 0-20 cm) da área de implantação do experimento com tratamentos de fertilização em plantas jovens de *B. excelsa*.

Tabela 2. Tipos de fertilizantes, dosagem e metodologia de aplicação dos tratamentos em plantas jovens de *B. excelsa* na fase de implantação do experimento.

Tabela 3. Área foliar e área foliar específica de plantas jovens de *B. excelsa* sob diferentes tratamentos de fertilização. Os valores são médias \pm desvio-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

Tabela 4. Matéria seca da parte aérea (PA), das raízes, total e razão raiz/parte aérea (R/PA) de plantas jovens de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de adubação. Os valores são médias \pm desvio-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

Tabela 5. Análise de fertilidade do solo após 10 meses de experimentação (profundidade 0-20 cm). H+Al - acidez potencial; t - CTC efetiva; T - CTC a pH 7,0; V - porcentagem de saturação por bases da CTC a pH 7,0 e m - porcentagem de saturação por Al da CTC efetiva. Tratamentos: T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Os valores são médias \pm desvio-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

Tabela 6. Teores foliares de nutrientes em plantas jovens de *B. excelsa* após aplicação de diferentes tratamentos de fertilização 9 meses após o plantio. Tratamentos: T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Os valores são médias \pm desvio-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

Tabela 7. Taxas de respiração (R_d), condutância estomática (g_s), transpiração (E), eficiência do uso da água (EUA) e eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) de plantas de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de fertilização (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Os valores são médias \pm desvio-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

Tabela 8. Concentrações de pigmentos cloroplastídicos foliares em plantas jovens de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de fertilização (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Os valores são médias \pm desvio-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

Tabela 9. Variáveis de fluorescência da clorofila *a* em mudas de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de adubação (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Fluorescência inicial (F_0), fluorescência máxima (F_m), fluorescência variável ($F_v = F_m - F_0$), eficiência fotoquímica do fotossistema II (F_v/F_m) e índice de desempenho (P.I.). Os valores são médias \pm desvio-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Valores médios e desvio-padrão das taxas de crescimento absoluto (TCA) em altura e em diâmetro à altura do solo (DAS) de plantas jovens de *Bertholletia excelsa* sob diferentes tratamentos de fertilização (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

Figura 2. Ganho foliar e índice de ganho foliar de plantas jovens de *Bertholletia excelsa* sob diferentes tratamentos de fertilização (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

Figura 3. Aspectos morfológicos da raiz de plantas jovens de *B. excelsa* com aproximadamente 22 meses de idade, evidenciando presença de endosperma.

Figura 4. Eficiência no uso de nutrientes ($EU_{\text{nutriente}}$) em plantas de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de fertilização (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Os valores são médias e as linhas verticais os desvios-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

Figura 5. Curvas de resposta de fotossíntese (A) em função do aumento nos níveis de irradiância em plantas de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de fertilização (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Círculos representam os valores médios dos dados observados com seus respectivos desvios-padrão e as linhas representam curvas ajustadas.

Figura 6. Potenciais hídricos foliares na antemanhã (05:00 h) e ao meio-dia (12:00 h) de mudas de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de adubação (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Os valores são médias e as linhas verticais são os desvios-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

Figura 7. Índice de Conteúdo de Clorofila (ICC) em *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de fertilização (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Linhas verticais indicam os desvios-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

Figura 8. Eficiência máxima do fotossistema II (TR_0/ABS), eficiência máxima de excitação não fotoquímica (DI_0/ABS), probabilidade de um elétron capturado ser transportado após a quinona A (ET_0/TR_0) e probabilidade de um fóton absorvido mover um elétron após a quinona A (ET_0/ABS) em mudas de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de adubação (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Os círculos pretos são médias e as linhas verticais são os desvios-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

INTRODUÇÃO

Estimativas bastante conservadoras apontam aproximadamente 600 mil km² de áreas desflorestadas na Amazônia Legal. Estes ambientes já alterados representam cerca de 17% dos limites geográficos da região (INPE, 2009). O aproveitamento destas áreas objetivando o retorno econômico pode ser alcançado mediante o estabelecimento de plantios florestais, bem como da implantação de sistemas que combinem espécies de valor econômico e ecológico, sendo estas opções tecnicamente viáveis e que representam opção sólida tanto para a produção florestal quanto para a redução da pressão de exploração sobre os povoados nativos, além de trazer benefícios ecológicos e melhorias das condições ambientais.

O êxito dos projetos de florestamento e reflorestamento depende, entre outros fatores, da correta escolha das espécies e das características das mudas levadas ao campo. Isso exige informações sobre a silvicultura das espécies nos diversos campos do conhecimento. Neste caso, é preciso conhecer as exigências lumínicas, hídricas e nutricionais das espécies a serem cultivadas, de modo que, a plasticidade fisiológica destas plantas quanto aos fatores primários, determinará o sucesso do plantio. No entanto, estes procedimentos constituem um problema pois os dados disponíveis são poucos e bastante fragmentados (Paiva e Gomes, 2000; Silva *et al.*, 2007; Santos *et al.*, 2008; Souza *et al.*, 2010).

Em ambientes degradados as plantas estão sujeitas a diferentes tipos de estresse, como a reduzida disponibilidade de nutrientes e de água no solo, altos níveis de irradiância, e por consequência, temperatura elevada (Gonçalves e Santos Júnior, 2005; Blind, 2010). Muitos estudos apontam a limitação na disponibilidade de nutrientes como fator comprometedor para o crescimento e desenvolvimento das espécies, uma vez que a presença de elementos como N, P e K desempenham funções vitais relacionadas aos processos de assimilação de carbono e manutenção das condições hídricas adequadas das plantas (Caldeira *et al.*, 2004; Kerbauy, 2004; Graciano *et al.*, 2006). No entanto, embora muito se conheça sobre o papel dos nutrientes sobre os mecanismos fisiológicos das espécies vegetais, pouco se sabe acerca das respostas ecofisiológicas de espécies nativas da Amazônia, tanto em condições naturais quanto em plantios florestais.

Os resultados já disponíveis sobre as exigências nutricionais e o desempenho ecofisiológico de espécies florestais apontam adaptação a solos pouco férteis, característicos

do ecossistema de terra firme, onde predominam Latossolos Amarelos e argissolos e que estas exigências são muito variáveis entre as espécies, variando entre grupos ecológicos e entre as espécies pertencentes ao mesmo grupo (Furtini Neto *et al.*, 1999; Gonçalves *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2006; Tucci *et al.*, 2011). Estes estudos mostram, por exemplo, que o crescimento de mudas de mogno (*Switenia macrophylla* King.) é pouco influenciado pelo fornecimento de doses crescentes de N, P e K na fase inicial vegetativa. Por outro lado, mudas de acariquara (*Minquartia guianensis* Aubl.) responderam positivamente à aplicação conjunta de calagem, macronutrientes e inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato em termos de altura, diâmetro do colo e número de folhas (Souza, 2006). De maneira semelhante, mudas de angelim-pedra (*Dinizia excelsa* Ducke) responderam positivamente à calagem e correção nos níveis de Ca e Mg no solo (Sena *et al.*, 2010). O pau-rosa (*Aniba rosaeodora* Ducke) parece exigir condições intermediárias de luminosidade, sob pena do desenvolvimento de mecanismos de fotoproteção caso a espécie seja exposta à alta irradiância e já é sabido que esta espécie responde de maneira diferente ao fornecimento de N em comparação a outra espécie do mesmo gênero, a preciosa (*Aniba canelilla* (Kunth) Mez.), em relação à eficiência no uso da água e eficiência intrínseca no uso da água (Blind, 2010).

Dentre as espécies florestais arbóreas mais comumente utilizadas em programas de reflorestamento na região Amazônica, a castanheira (*Bertholletia excelsa* H. B.) tem demonstrado ser uma das espécies com maior potencial, em função de seu bom desempenho em crescimento sob diversas condições edafo-climáticas, da baixa utilização de insumos no estabelecimento dos plantios e das excelentes características silviculturais como: alta taxa de sobrevivência, baixo percentual de árvores bifurcadas com fustes longos e retos e inexistência de competição com outras espécies em sistemas de plantio heterogêneos (Camargos *et al.*, 2002; Tonini *et al.*, 2006; Costa *et al.*, 2009; Scoles *et al.*, 2011).

A produção da castanha é obtida quase exclusivamente do extrativismo florestal, sendo as plantações ainda pouco significativas em termos quantitativos. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), a castanha é o segundo produto florestal não madeireiro em termos de importância comercial na Região Norte do Brasil, perdendo somente para o açaí (*Euterpe* sp.). Por estes motivos, a espécie tem sido muito utilizada para a composição de plantios florestais seja para fins de produção comercial ou proteção ambiental, exibindo bom desempenho em crescimento mesmo quando plantada em solos de baixa fertilidade natural como os da região Amazônica, onde indivíduos adultos de *B. excelsa* com idade entre 10 e 12 anos e alturas entre 6 e 21 m em sistemas agroflorestais alcançaram taxas de incremento corrente anual (ICA) em diâmetro à altura do peito (DAP) entre 2,94 e 4,49 cm

e para altura entre 1,52 e 1,96 m (Ferreira e Tonini, 2009). Em plantio de enriquecimento em roçado a pleno sol monitorado por dois anos, os incrementos médios foram de 2,4 m e 4,0 cm, para altura e diâmetro à altura do colo, respectivamente (Scoles *et al.*, 2011).

Quando estudada em plantio jovem (aproximadamente quatro anos) para restauração de área degradada, *B. excelsa* mostrou boa capacidade de resposta a tratamentos de adubação, particularmente, a adubação verde, uma vez que exibiu alto potencial para assimilação de carbono e incorporação de biomassa quando comparada ao tratamento controle (Ferreira *et al.*, 2009). Mudas de *B. excelsa* demonstraram significativa tolerância ao estresse hídrico, sendo necessário um período de 58 dias de supressão da irrigação para reduzir ao mínimo as taxas de trocas gasosas, indicando a alta plasticidade fisiológica da espécie (Gonçalves, J. F. C, dados não publicados). Na fase adulta, *B. excelsa* também tem apresentado boa aptidão para composição de plantios florestais face ao adequado desempenho dos mecanismos fotossintéticos e estratégias de alta capacidade para fotoproteção sob condições de elevada irradiância (Morais, 2003; Morais *et al.*, 2007). Estes resultados corroboram o comportamento heliófito de *B. excelsa* durante as primeiras etapas de vida, sendo considerada uma espécie clímax exigente de luz (Mori e Prance, 1990; Salomão, 1991; Myers *et al.*, 2000).

Diante do exposto, e percebendo-se claramente o desafio de encontrar formas de reflorestar áreas degradadas utilizando espécies nativas comercialmente atrativas e ainda adaptadas a plantios a pleno sol, buscou-se investigar as respostas de crescimento, o estado nutricional e hídrico de *B. excelsa* sob diferentes tratamentos de adubação em plantio homogêneo para produção comercial por meio da associação de variáveis biométricas aos processos fisiológicos relacionados aos mecanismos de utilização do nitrogênio e de outros nutrientes.

1 OBJETIVOS

1.1 Geral

Investigar as respostas de crescimento e as características fotossintéticas, hídricas e nutricionais de plantas jovens de *Bertholletia excelsa* sob diferentes tratamentos de fertilização em plantio florestal homogêneo.

1.2 Específicos

- Determinar as taxas de sobrevivência, as variáveis biométricas e morfológicas (altura total, diâmetro à altura do solo, área foliar, área foliar específica e peso da matéria seca) das plantas jovens de *B. excelsa* quando submetidas à aplicação de diferentes tratamentos de fertilização;
- Determinar o *status* nutricional do plantio (fertilidade do solo, teores de macro e micronutrientes foliares e a eficiência no uso de nutrientes);
- Analisar as características das trocas gasosas (fotossíntese líquida, respiração no escuro, transpiração e condutância estomática);
- Determinar o *status* hídrico do plantio (eficiência do uso da água, eficiência intrínseca do uso da água e potenciais hídricos foliares);
- Analisar as variáveis de captação e uso da energia no processo fotossintético (teores de pigmentos cloroplastídicos e fluorescência da clorofila *a*).

2 HIPÓTESE

A aplicação de fertilização nitrogenada favorece o melhor desempenho das características ecofisiológicas e nutricionais, podendo contribuir de maneira efetiva para o acúmulo de biomassa em *Bertholletia excelsa* sob plantio homogêneo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

A pesquisa foi conduzida na Fazenda Agropecuária Aruanã S.A., situada no km 215 da Rodovia AM 010, município de Itacoatiara, entre as coordenadas geográficas 03°0'30.63"S e 58°50'1.50"W. O clima da região é do tipo Equatorial Am, com precipitação anual acima de 2.000 mm e temperatura média de 27°C (Köppen, 1948). O solo predominante é do tipo Latossolo Amarelo com textura muito argilosa (Kato, 1995).

A área total da propriedade compreende cerca de 12.000 ha, destes 3.600 ha são destinados ao plantio de castanheira sob densidades que variam entre 25 e 100 indivíduos por ha. A propriedade tem histórico de degradação por queimada para implantação de pastagens e posterior aproveitamento da área para o plantio de castanheiras com fins de produção de frutos e programas de compensação florestal.

3.2 Descrição do experimento

O experimento foi realizado em uma área de aproximadamente 400 m², com topografia plana, devidamente preparada para a execução do plantio experimental, sem influência de sombreamento por árvores circundantes. Antes da execução do plantio, o solo foi gradeado e realizou-se a aplicação de calcário para correção química da acidez na ocasião de abertura das covas com base em análises químicas e de fertilidade realizadas a partir de amostras previamente coletadas (Tabela 1). O calcário foi incorporado ao volume de solo retirado na abertura de todas as covas do plantio, exceto para as covas dos indivíduos do tratamento controle.

Após o período de 45 dias, tempo estimado para a completa reação do calcário no solo, 196 mudas foram plantadas manualmente em covas de tamanho 40 x 40 x 40 cm em espaçamento de 2,5 x 1,0 m no período de maior precipitação (fevereiro de 2011). O plantio experimental foi feito com exposição total das mudas à irradiância e em solo desprovido de qualquer tipo de cobertura. Das 196 mudas, 106 foram utilizadas como bordadura e as 90 restantes divididas em 6 tratamentos com 15 indivíduos em cada tratamento. As mudas selecionadas para o experimento foram provenientes do viveiro da própria Fazenda Aruanã, com idade de aproximadamente 1 ano, altura média de $45,4 \pm 1,3$ cm, $4,23 \pm 0,08$ mm de diâmetro à altura do solo, apresentando 8 ± 1 folhas por indivíduo.

Tabela 1. Análise química e de fertilidade do solo (profundidade 0-20 cm) da área de implantação do experimento com tratamentos de fertilização em plantas jovens de *B. excelsa*.

pH		P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	MO	N
H ₂ O	KCl	mg kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹					g kg ⁻¹	
4,5	4,4	4,5	0,05	0,09	0,06	1,2	9,3	20,7	0,60

t	T	V	m
cmol _c kg ⁻¹	%		
1,4	9,5	2,1	85,7

No momento do plantio foram aplicados os tratamentos de fertilização em fundação, sendo que 15 mudas não receberam nenhuma aplicação de fertilizante ou calcário (T0 - controle); 15 mudas receberam apenas correção do solo com calcário dolomítico (T1); e, todos os demais tratamentos receberam a correção do solo acrescida dos fertilizantes, sendo que, 15 mudas receberam adubação com micronutrientes + potássio (T2), outras 15 foram tratadas com fertilização nitrogenada (micronutrientes + potássio + ureia) (T3); 15 mudas receberam adubação fosfatada (micronutrientes + potássio + superfosfato simples) (T4); e, 15 mudas foram submetidas à combinação de fertilização nitrogenada e fosfatada (micronutrientes + potássio + ureia + superfosfato simples) (T5). Os tratamentos de fertilização foram aplicados aleatoriamente, conforme sorteio das mudas previamente realizado. Naqueles em que foram adicionados nitrogênio e potássio, as doses foram aplicadas em 4 vezes num raio de 15 cm da planta, sendo a primeira no momento do plantio e as outras

três a cada 20 dias depois do estabelecimento do plantio. Os tratamentos e a metodologia utilizada na aplicação estão explicitados na Tabela 2.

Os cálculos de dosagens, bem como da quantidade de calcário utilizada na calagem foram feitos com base nas necessidades identificadas por meio da interpretação dos resultados da análise química e de fertilidade, seguindo metodologia proposta por Ribeiro *et al.* (1999).

Tabela 2. Tipos de fertilizantes, dosagem e metodologia de aplicação dos tratamentos em plantas jovens de *B. excelsa* na fase de implantação do experimento.

Tratamento	Composição	Fonte do nutriente	Dosagem	Aplicação
T0	-	-	-	-
T1	Ca + Mg	calcário dolomítico	155 g/cova	abertura das covas
T2	Ca + Mg	calcário dolomítico	155 g/cova	abertura das covas
	micronutrientes	FTE BR12 [®]	50 g/planta	cobertura
	K	KCl	125 g/planta	cobertura (4 vezes 32g)
T3	Ca + Mg	calcário dolomítico	155 g/cova	abertura das covas
	micronutrientes	FTE BR12 [®]	50 g/planta	cobertura
	K	KCl	125 g/planta	cobertura (4 vezes 32g)
	N	ureia -CO(NH ₂) ₂	90 g/planta	cobertura (4 vezes 23 g)
T4	Ca + Mg	calcário dolomítico	155 g/cova	abertura das covas
	micronutrientes	FTE BR12 [®]	50 g/planta	cobertura
	K	KCl	125 g/planta	cobertura (4 vezes 32g)
	P	P ₂ O ₅	500 g/cova	plantio
T5	Ca + Mg	calcário dolomítico	155 g/cova	abertura das covas
	micronutrientes	FTE BR12 [®]	50 g/planta	cobertura
	K	KCl	125 g/planta	cobertura (4 vezes 32g)
	N	ureia -CO(NH ₂) ₂	90 g/planta	cobertura (4 vezes 23 g)
	P	P ₂ O ₅	500 g/cova	plantio

No segundo mês após o plantio foram identificados formigueiros próximos à área do experimento, sendo aplicado formicida orgânico da marca Macex[®] em pontos estratégicos, o que não foi suficiente para evitar o ataque de formigas cortadeiras algumas semanas depois, ataque este concentrado nos indivíduos dos tratamentos T4 e T5 (aqueles que receberam P₂O₅ no momento do plantio), resultando na perda e consequente exclusão do experimento dos dois tratamentos devido ao desfolhamento total. Para evitar novo ataque, utilizou-se formicida

químico da marca Mirex[®], não havendo mais registro da presença de formigas cortadeiras até o final do experimento.

3.3 Coleta de dados

3.3.1 Medidas biométricas

As variáveis biométricas foram determinadas a partir do 6º mês após o plantio, a cada 30 dias, até o final do experimento, totalizando 9 meses de monitoramento (novembro 2011). Ao final do período de experimentação foi feita a contagem dos indivíduos vivos, e, durante o monitoramento, foi realizada a contagem do número de lançamentos foliares e a medida da altura total utilizando-se fita métrica, bem como do diâmetro à altura do solo (DAS) obtido com paquímetro digital.

De posse dos resultados foram calculadas as taxas de crescimento absoluto (TCA), o ganho foliar (GF) e o índice de ganho foliar (IGF), conforme metodologia de Bugbee (1996) e Davanzo *et al.* (2002).

$$\mathbf{TCA = (V_f - V_0) / (t_f - t_0)}$$

Onde:

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

V_f - variável final, altura [cm] ou DAS [mm]

V_0 - variável inicial, altura [cm] ou DAS [mm]

t_f - tempo final do monitoramento

t_0 - tempo inicial do monitoramento

$$\mathbf{GF = NF_f - NF_0}$$

Onde:

GF - ganho foliar

NF_f - número de folhas final

NF_0 - número de folhas inicial

$$\mathbf{IGF = (GF - NF_0) * [100 / (t_f - t_0)]}$$

Onde:

IGF - índice de ganho foliar [%]

GF - ganho foliar

NF_0 - número de folhas inicial

t_f - tempo final do monitoramento

t_0 - tempo inicial do monitoramento

As variáveis morfológicas estudadas foram: área foliar (AF), mensurada utilizando-se medidor de área foliar modelo LI-COR 3000a e área foliar específica (AFE), determinada pela razão AF/massa foliar. Para obtenção da massa seca, discos foliares de área conhecida foram acondicionados em estufa a 70°C até a obtenção de massa constante, sendo utilizados 10 discos foliares por repetição (Evans e Poorter, 2001).

A determinação da matéria seca foi realizada após a finalização do experimento para cinco indivíduos de cada tratamento. As plantas foram seccionadas em parte aérea e sistema radicular e acondicionadas em sacos de papel para secagem em estufa à temperatura de 70°C até alcançarem massa constante. Após a secagem do material, foram obtidas as massas da matéria seca de cada segmento da planta e, adicionalmente, calculada a razão raiz/parte aérea.

3.3.2 Análises químicas e de fertilidade do solo

As amostras de solo foram coletadas ao final do experimento num raio de 15 cm de cinco plantas de cada tratamento, na profundidade de 0 a 20 cm. As concentrações dos macronutrientes (N, P, K, Ca e Mg) e o $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ foram analisadas para cada amostra. As extrações de Ca, Mg e Al foram feitas a partir de uma solução extratora de KCl 1 M (Miyazawa *et al.*, 1999), o Ca e o Mg foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica e o Al pelo método de titulação com NaOH. Os macronutrientes (P e K) foram extraídos com solução Mehlich 1 (HCl 0,05 M + H₂SO₄ 0,0125 M), sendo o P determinado pelo método azul de molibdato e por espectrofotometria ($\lambda=660$ nm) e o K determinado por espectrofotometria de absorção atômica (Perkin-Elmer 1100B). Os valores de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ foram obtidos potenciométricamente, utilizando eletrodo combinado, imerso em solução de solo e água (1:2,5). A leitura foi efetuada após 1 min de agitação individual das amostras e 1 hora de repouso da solução. O N total foi determinado conforme o método de Kjeldahl (EMBRAPA, 1999).

3.3.3 Teores de nutrientes foliares e eficiência no uso de nutrientes

Os teores de macro e micronutrientes foliares foram determinados ao final do experimento. As folhas coletadas foram secas em estufa a 65°C até massa constante e posteriormente moídas, obtendo-se material finamente pulverizado. Para a determinação dos teores de nitrogênio, amostras contendo 0,1 g de matéria seca foram submetidas a uma pré-digestão, durante uma noite, e em seguida uma digestão com duplo ácido (H₂O₂ + H₂SO₄),

utilizando-se como catalizadores o sulfato de lítio e o selênio, a uma temperatura gradativa até 350°C (Miyzawa *et al.*, 1999). Posteriormente, o nitrogênio total foi determinado de acordo com o método de Kjeldahal, a partir de uma alíquota de 25 ml do extrato puro. Os teores de fósforo foram determinados a partir de amostras contendo 0,5 g de matéria seca submetidas à digestão nitro-perclórica, com temperatura ajustada de 50 em 50°C até 210°C, em intervalos de 30 minutos. Posteriormente, os teores de fósforo foram determinados por espectrofotometria a 725 nm (Vitti e Ferreira, 1997). A partir do mesmo extrato nitro-perclórico foram retiradas alíquotas e os teores dos demais nutrientes (Ca, Mg, K, Fe e Zn) foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (Perkin Elmer 1100B).

A eficiência no uso de nutrientes [EU(nutriente)] foi calculada por meio da razão entre o produto da fotossíntese líquida de cada planta e seus respectivos valores de área foliar específica (AFE) pelos teores de nutrientes foliares (Santos Júnior *et al.*, 2006).

3.3.4 Medidas de trocas gasosas

As medidas de trocas gasosas foram realizadas aos 9 meses após o plantio, no período do dia entre 08:00 e 12:00 horas. As leituras foram realizadas em folhas maduras que exibiam adequado estado fitossanitário e completamente expandidas. As taxas de fotossíntese líquida (A), respiração no escuro (R_d), condutância estomática (g_s) e transpiração (E) foram determinadas por meio de um analisador de gás infravermelho (IRGA) portátil, de sistema aberto, modelo LI-COR 6400, conforme metodologia descrita por Santos Júnior *et al.*, (2006). Para a coleta destes dados, o aparelho foi ajustado para trabalhar com fluxo de 400 μmol s⁻¹ e câmara foliar para concentração de CO₂, temperatura e vapor de água em torno de 380 ± 4 μmol mol⁻¹, 31 ± 1°C e 21 ± 1 mmol mol⁻¹, respectivamente. Os dados da curva de resposta fotossintética à intensidade luminosa foram obtidos para uma densidade de fluxo de fótons (PPDF) entre 0 e 2000 μmol m⁻² s⁻¹ nas mesmas condições de ajuste do aparelho supracitadas. O modelo da exponencial foi usado para ajustar a curva de resposta fotossintética e intensidade luminosa para cada planta (Iqbal *et al.*, 1997).

$$A = (A_{\max} + R_d)[1 - \exp(-\alpha I / (A_{\max} + R_d))] - R_d$$

Onde:

A - fotossíntese líquida [μmol CO₂ m⁻² s⁻¹]

A_{max} - taxa fotossintética máxima sob condições de luz saturante [μmol CO₂ m⁻² s⁻¹]

R_d - respiração no escuro [μmol CO₂ m⁻² s⁻¹]

α - rendimento quântico aparente [mol CO₂ mol fóton⁻¹] e I - irradiância fotossinteticamente ativa [μmol fótons m⁻² s⁻¹]

As curvas de fotossíntese foram ajustadas usando o algoritmo de Levenberg-Marquardt com base na rotina do programa Statistica, versão 6.0 (StatSoft Inc., 2004). A irradiância de compensação de luz (I_c ; PPFd no qual $A=0$) foi calculada pela fórmula:

$$I_c = R_d/\alpha$$

Onde:

I_c - irradiância de compensação de luz
 R_d - respiração no escuro [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
 α - rendimento quântico aparente da fotossíntese [$\text{mol CO}_2 \text{ mol fóton}^{-1}$]

A irradiância de saturação de luz foi estimada como:

$$I_s = [(A_{\max} + R_d)/-\alpha] \ln\{-(0,9A_{\max} + R_d)/(A_{\max} + R_d)\} + 1$$

Onde:

I_s - irradiância de saturação de luz
 A_{\max} - taxa fotossintética máxima sob condições de luz saturante [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
 R_d - respiração no escuro [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]
 α - rendimento quântico aparente [$\text{mol CO}_2 \text{ mol fóton}^{-1}$]

3.3.5 *Status* hídrico foliar

O potencial hídrico foliar (Ψ_w) foi determinado em folhas maduras coletadas no período da antemanhã (Ψ_{am}) entre 5:00 e 6:00 h, e, ao meio dia (Ψ_{md}) entre 12:00 e 13:00 h, utilizando uma bomba de pressão (Scholander *et al.*, 1965). A determinação consistiu na coleta da amostra foliar, a qual foi inserida na câmara de pressão da bomba de Scholander, onde foi aplicada pressão com gás N_2 até a ocorrência de exsudação na extremidade do pecíolo da folha, sendo neste momento registrada a leitura da pressão aplicada (Turner, 1981).

A eficiência no uso da água (EUA) foi calculada pela razão $EUA [\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}] = \text{fotossíntese/transpiração}$ e a eficiência intrínseca no uso da água (EIUA) foi determinada pela razão $EIUA [\mu\text{mol CO}_2 \text{ mol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}] = \text{fotossíntese/condutância estomática}$.

3.3.6 Teores de pigmentos cloroplastídicos

A coleta das amostras para a determinação dos pigmentos cloroplastídicos foi realizada ao final do experimento. Para o índice de conteúdo de clorofila (ICC) foi utilizado um clorofilômetro portátil SPAD. Para a determinação em laboratório foram coletadas folhas de sete indivíduos de cada tratamento, no período da manhã das 10:00 às 12:00, as quais foram envolvidas em papel alumínio, acondicionadas em caixa térmica com gelo e conduzidas imediatamente ao Laboratório de Fisiologia e Bioquímica Vegetal (INPA) para a determinação dos teores de clorofila *a* (663 nm), clorofila *b* (645 nm) e carotenoides (480 nm) conforme metodologia de Lichtenthaler e Wellburn (1983). Os teores de pigmentos cloroplastídicos, tendo como base a massa foliar [$\mu\text{mol g}^{-1}$] foram calculados a partir das equações descritas por Hendry e Price (1993).

3.3.7 Fluorescência da clorofila *a*

A determinação da fluorescência da clorofila *a* foi realizada ao final do experimento utilizando fluorômetro portátil (PEA, MK2-9600, Norfolk, UK) em folhas completamente expandidas e em perfeito estado fitossanitário. Os dados foram coletados entre 09:00 e 12:00 horas e as folhas selecionadas foram submetidas a um período de adaptação de 30 minutos no escuro, utilizando cliques específicos para este fim, sendo este o período suficiente para a completa oxidação dos centros de reação. Em seguida foram aplicados pulsos de luz saturante à intensidade de $3000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e comprimento de onda de 650 nm durante 5 segundos (Gonçalves *et al.*, 2001).

3.4 Desenho experimental e análise estatística

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), sendo quatro tratamentos (T0, T1, T2 e T3) com 15 repetições cada (ver croqui do experimento em Anexos). Os dados de cada variável foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey utilizando-se o *software* Statistica versão 6.0 para Windows (StatSoft Inc., 2004).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Biometria

Do ponto de vista biométrico e morfológico, os indivíduos dos tratamentos T0, T2 e T3 exibiram resultados muito semelhantes (Figura 1), com T2 e T3 destacando-se no acúmulo de biomassa e T3 com maior área foliar (AF). As taxas de sobrevivência foram de 100, 93, 87 e 93% para os tratamentos T0, T1, T2 e T3, respectivamente.

Considerando a variável altura, os melhores resultados foram observados para os tratamentos T0, T2 e T3, com taxas médias de crescimento mensal de 3,0, 3,1 e 3,4 cm mês⁻¹, respectivamente, diferenciando-se do tratamento T1 que exibiu taxa de crescimento médio de 1,9 cm mês⁻¹ (Figura 1). Com relação às taxas de crescimento absoluto em diâmetro à altura do solo (DAS), não houve diferença entre os tratamentos e os valores variaram de 0,82 (T1) a 1,06 (T0) mm mês⁻¹. Resultados semelhantes foram encontrados em estudo realizado com mudas de *B. excelsa* submetidas à fertilização com diferentes combinações e dosagens de N, P, K em casa de vegetação, destacando-se que não houve diferenças entre os tratamentos para as variáveis altura e DAS, as maiores médias foram encontradas nos tratamentos com a presença de P (Magalhães, 2001). É importante mencionar que neste trabalho, inicialmente, haviam dois tratamentos com a presença de fertilização fosfatada, mas que foram perdidos devido ao ataque de formigas cortadeiras alguns meses após o plantio.

Ao comparar espécies com alguma similaridade de grupo sucessional, neste caso espécies de crescimento lento classificadas como clímax, como o mogno (*Swietenia macrophylla*) submetidas à fertilização com N, P e K em doses crescentes, observou-se não haver ganho significativo em altura, DAS e massa seca em resposta a nenhum dos tratamentos, quando comparados ao controle (Tucci *et al.*, 2011). Estes mesmos autores discutem a baixa responsividade de espécies florestais clímax à adubação na fase de muda, considerando que espécies de crescimento lento apresentam baixa resposta ao fornecimento de nutrientes e que esta característica está relacionada ao mecanismo de adaptação aos solos pouco férteis da região amazônica.

A espécie *B. excelsa* tem sido considerada uma espécie de crescimento relativamente rápido, no entanto, verificou-se a partir de monitoramento do crescimento durante dez anos em plantios com várias espécies florestais, que o crescimento desta espécie nos estágios iniciais é mais lento, acelerando principalmente em altura depois do 5 anos de idade (Tonini *et al.*, 2008).

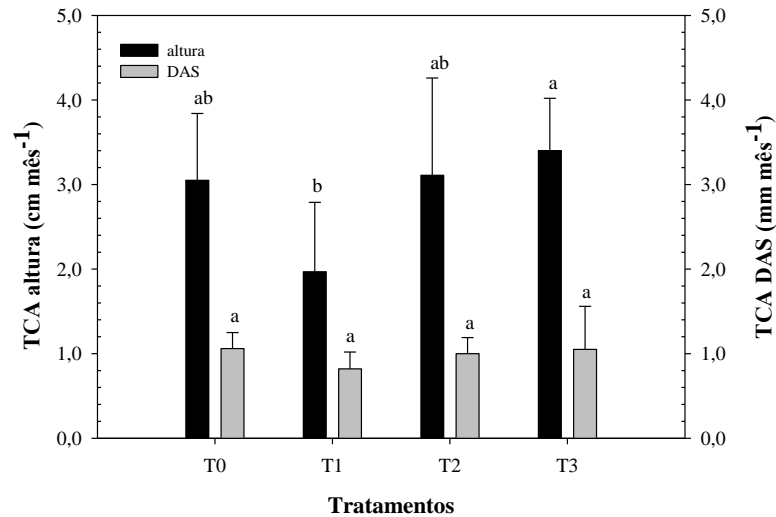


Figura 1. Valores médios e desvio-padrão das taxas de crescimento absoluto (TCA) em altura e em diâmetro à altura do solo (DAS) de plantas jovens de *Bertholletia excelsa* sob diferentes tratamentos de fertilização (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

O ganho foliar para os tratamentos T2 e T3 foi duas vezes maior em comparação aos tratamentos T0 e T1, comportamento semelhante ao observado para o índice de ganho foliar (IGF) (Figura 2). Enquanto T0 e T1 aumentaram o número de lançamentos foliares em torno de 10% ao mês, T2 e T3 tiveram incrementos da ordem de cerca de 30 e 40% a cada mês. O maior número de lançamentos do tratamento T3 ocorreu nas semanas subsequentes ao término das aplicações de nitrogênio e potássio, tendo decaído nos meses finais do experimento. Todos os indivíduos do experimento sofreram danos foliares pela exposição à radiação logo após o plantio, com queda das folhas danificadas para o lançamento de folhas novas, sendo a presença de N essencial para a recuperação mais rápida dos indivíduos do tratamento T3.

Estes resultados, em grande parte, justificam relações de causa e efeito associados não somente aos princípios funcionais do nitrogênio, mas também à própria estratégia da planta na forma como usa este nutriente. Isto é, provavelmente as folhas sob o tratamento T3 tiveram investimento diluído em massa com ganho em área. Estes resultados merecem atenção uma vez que outras variáveis investigadas nesta pesquisa, especialmente o teor de clorofilas, deveriam ter apresentado resultados convencionais para o uso no nitrogênio mas não exibiram os incrementos esperados. Este deve ser o primeiro indício que aponta para a diluição de nitrogênio nas folhas, e, por conseguinte, de clorofilas.

A adição de nitrogênio aos indivíduos do tratamento T3 permitiu maior investimento em biomassa aérea e tecido foliar, sendo a média para os valores de área foliar (AF) de 114,2 cm², valor 53, 43 e 35% superior aos tratamentos T2, T1 e T0, respectivamente. Quanto ao desempenho do tratamento T0, isto pode ser explicado pela quantidade de matéria orgânica (MO) presente no solo da área do experimento, que foi de 20,7 g kg⁻¹. Em solos com teores de matéria orgânica a partir de 20,0 g kg⁻¹, a disponibilidade de N para as culturas pode ser considerada razoável (Ribeiro *et al*, 1999). Portanto, é possível que mesmo não havendo nenhuma interferência no tratamento controle, os teores de MO existentes tenham fornecido N suficiente para as necessidades das mudas de *B. excelsa*, esta observação se aplica a outras variáveis em que também foi verificado o bom desempenho do tratamento controle (T0).

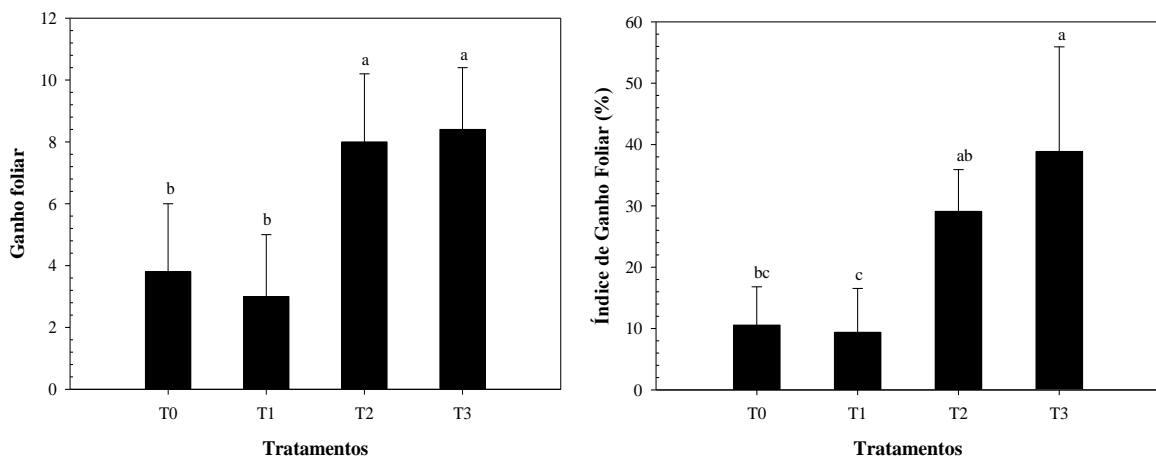


Figura 2. Ganho foliar e índice de ganho foliar de plantas jovens de *Bertholletia excelsa* sob diferentes tratamentos de fertilização (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey P<0,05).

Para área foliar específica (AFE), não se observou diferenças entre os tratamentos, cujos valores variaram entre 133,2 (T2) e 137,6 cm² g⁻¹ (T1) (Tabela 3). Estes valores podem ser considerados elevados, quando comparados aos encontrados em plantio de castanheira aos quatro anos de idade sobre área degradada, cujos valores variaram entre 78,0 cm² g⁻¹ para o tratamento com adubação verde e 91,0 cm² g⁻¹ para o tratamento com adubação química (Gonçalves, J.F.C, dados não publicados). A relação entre a AFE e o crescimento de todas as partes da planta parece ter maior relação com os níveis de irradiância a que as plantas estão submetidas do que com exigências nutricionais (Silva, 2001; Macedo e Haridasan, 2006). A AFE é um dos principais parâmetros indicadores da taxa de crescimento e das estratégias de uso de recursos pelas plantas, podendo ser considerada como um índice de produtividade, dada a importância dos órgãos fotossintetizantes na produção biológica (Scalon *et al.*, 2003; Boeger *et al.*, 2006).

Tabela 3. Área foliar e área foliar específica de plantas jovens de *B. excelsa* sob diferentes tratamentos de fertilização. Os valores são médias \pm desvio-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey P<0,05).

Tratamento	Área Foliar [cm ²]	Área Foliar Específica [cm ² g ⁻¹]
T0 - controle	84,8 \pm 22,0 b	135,0 \pm 11,2 a
T1 - Ca e Mg	80,0 \pm 14,4 b	137,6 \pm 10,4 a
T2 - (Ca e Mg) + K + Micronutrientes	74,8 \pm 9,7 b	133,2 \pm 12,6 a
T3 - (Ca e Mg) + K + Micronutrientes + N	114,2 \pm 18,4 a	134,5 \pm 10,8 a

O acúmulo de biomassa na parte aérea foi maior para os tratamentos T2 e T3, sendo que os maiores valores foram observados para o T2 (40,2 g), com 123% a mais de biomassa aérea que o tratamento com menor acúmulo, T1 (18,7 g). Embora T3 tenha exibido maior quantidade de tecido foliar, como já foi observado para as variáveis GF e AF, os indivíduos do tratamento T2 apresentaram maior quantidade de ramificações, sendo o tecido dos ramos mais denso e lenhoso e, conseqüentemente, com maior massa.

Considerando as variáveis massa seca da raiz e massa seca total, não se observou diferença entre os tratamentos, provavelmente, devido ao alto grau de variação das amostras (Tabela 4). Para massa seca da raiz os valores variaram entre 17,2 g (T0) e 26,2 g (T2). A variável massa seca da parte aérea influenciou os resultados para a razão raiz/parte aérea, que

variaram entre 0,5 (T3) e 0,9 (T1). Em termos de proporcionalidade, estes números indicam que no tratamento T1 o investimento em biomassa aérea e biomassa de raízes foi praticamente o mesmo, ao passo que no tratamento T3, o investimento em parte aérea foi 95% maior que a biomassa de raízes, corroborando as variáveis discutidas anteriormente. A relação raiz/parte aérea expressa o equilíbrio entre os órgãos em resposta a modificações no ambiente (Bernardi *et al.*, 2000). O N interfere diretamente neste balanço alterando a morfologia da planta. Quando há baixa disponibilidade do nutriente, há menor crescimento da parte aérea. Nos níveis intermediários, há desenvolvimento e divisão adequados do sistema radicular. No excesso do nutriente, observa-se que o sistema radicular é reduzido e há estímulo para o desenvolvimento da parte aérea (Marschner, 1995). Em contrapartida, a baixa disponibilidade de nutrientes no solo pode induzir o aumento de alocação de massa seca para a raiz em relação à parte aérea (Illenseer e Paulilo, 2002), o que não foi verificado em nenhum dos tratamentos componentes deste experimento.

Em condições de campo, maior proporção em parte aérea pode representar maior suscetibilidade das plantas ao tombamento pela ação do vento e aumento nas taxas de transpiração (Witt, 1997).

Tabela 4. Matéria seca da parte aérea (PA), das raízes, total e razão raiz/parte aérea (R/PA) de plantas jovens de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de adubação. Os valores são médias \pm desvio-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

Tratamento	Matéria seca [g]			
	PA	Raiz	Total	R/PA
T0 - controle	29,0 \pm 14,8 ab	17,3 \pm 5,7 a	46,3 \pm 16,5 a	0,6 \pm 0,17 ab
T1- Ca e Mg	18,7 \pm 5,4 b	17,4 \pm 5,6 a	36,1 \pm 10,1 a	0,9 \pm 0,19 a
T2 - (Ca e Mg) + K + Micronutrientes	40,2 \pm 7,6 a	26,2 \pm 9,1 a	66,4 \pm 16,7 a	0,7 \pm 0,15 ab
T3 - (Ca e Mg) + K + Micronutrientes + N	37,0 \pm 10,7 a	19,3 \pm 9,4 a	56,3 \pm 19,7 a	0,5 \pm 0,17 b

De modo geral, verificou-se desempenho aquém do esperado para as plantas do tratamento T1. A acidez do solo é um dos fatores que mais limitam a produtividade das culturas, sendo assim, a correção desta acidez, por meio da calagem, bem como o fornecimento de Ca e Mg, pode promover importantes ganhos no crescimento e desenvolvimento das plantas (Bonfim-Silva *et al.*, 2011). No entanto, estudos mostram que

algumas espécies são tolerantes à acidez do solo e respondem negativamente à calagem, como no caso de plantas jovens de grábia (*Apuleia leiocarpa* (Vog.) Macbride), uma espécie florestal madeireira que ocorre no sul do Brasil, a qual teve seu crescimento diminuído pela calagem do solo e só respondeu ao fornecimento de N, P, K e S quando em condição de solo ácido, com pH em torno de 4,8, o efeito negativo da calagem foi atribuído a um provável distúrbio nutricional (Nicoloso *et al.*, 2008). Outro estudo com resultados semelhantes foi realizado com mudas de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.) que tiveram seu crescimento depreciado pelo aumento da saturação por bases, exibindo melhor desempenho no tratamento controle, onde não houve adição de calcário (Santin *et al.*, 2007). Em experimento com mudas de seringueira (*Hevea brasiliensis* H. B. K.) cultivadas em viveiro, verificou-se que diversas combinações de calcário e gesso não contribuíram para o crescimento em altura e diâmetro das plantas nem para o aumento na produção de matéria seca (Venturin *et al.*, 1995).

A submissão de 15 espécies florestais pertencentes a três grupos ecológicos nativas do cerrado ao efeito da calagem mostrou que os efeitos no crescimento das plantas foi diferente conforme o grupo sucessional, as melhores respostas foram observadas para as pioneiras e secundárias, ao mesmo tempo que as clímax não responderam à mudança no solo ocasionada pela calagem (Furtini Neto *et al.*, 1999). Estes mesmos autores observaram, ainda, que dentre as espécies clímax estudadas, *Platycamus regnelli* Benth., *Hymenaea courbaril* L. e *Copaifera lansdorfii* Desf. exibiram decréscimo na quantidade de matéria seca total nos tratamentos com calagem quando comparadas com o tratamento controle e relacionam estes resultados aos baixos níveis de Ca e Mg requeridos por espécies clímax.

4.2 Status nutricional do plantio

4.2.1 Fertilidade do solo

Os valores de pH em H₂O na profundidade de 0 a 20 cm variaram entre 4,3 (T0) e 5,5 (T2) (Tabela 5). Os resultados indicam que houve aumento em torno de 20% no pH do solo naqueles tratamentos que receberam, além da calagem, adição de nutrientes. Com base na análise preliminar de fertilidade do solo da área do experimento (Tabela 1), verificou-se o mesmo nível de acidez no tratamento controle (pH=4,3) e no tratamento T1 (pH=4,8), que apesar de serem submetidos à correção com calcário dolomítico, não demonstrou redução de acidez. Ao mesmo tempo foram diagnosticadas diferenças nos teores de Al³⁺ para esse tratamento. Os elementos Ca²⁺ e Mg²⁺ atuam como agentes de troca com o Al³⁺ presente no

solo e contribuem para a formação de precipitados. Assim, nos tratamentos T2 e T3, onde ocorreu elevação dos valores de pH, os teores de Al^{3+} foram 100 e 80% inferiores aos do tratamento controle.

As concentrações de N variaram entre 0,66 (T1) e 0,95 $g\ kg^{-1}$ (T3). A variação entre o tratamento controle (T0) e o tratamento que recebeu adubação nitrogenada foi de apenas 17%. A respeito dos níveis de P no solo, as concentrações encontradas foram dez vezes maiores no tratamento T2 (11,8 $mg\ kg^{-1}$) e cinco vezes maiores (5,8 $mg\ kg^{-1}$) no tratamento T3 em comparação com os tratamentos T0 e T1, 1,2 e 1,0 $mg\ kg^{-1}$, respectivamente. A correção da acidez conduz à diminuição nos teores solúveis de Fe e Al, acarretando no acréscimo nos teores de P na solução do solo (Lopes *et al.*, 2002). O fato da correção da acidez ter sido verificada nos tratamentos T2 e T3, poderia explicar os maiores teores deste elemento nos respectivos tratamentos. Para o T2 os níveis de fósforos alcançaram valores considerados adequados, para o T3 os níveis foram razoáveis e para os tratamentos T0 e T1, muito baixos.

Tabela 5. Análise de fertilidade do solo após 10 meses de experimentação (profundidade 0-20 cm). H+Al - acidez potencial; t - CTC efetiva; T - CTC a pH 7,0; V - porcentagem de saturação por bases da CTC a pH 7,0 e m - porcentagem de saturação por Al da CTC efetiva. Tratamentos: T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Os valores são médias \pm desvio-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

	T0	T1	T2	T3
pH (H ₂ O)	4,3 \pm 0,5 b	4,8 \pm 0,4 ab	5,5 \pm 0,2 a	5,0 \pm 0,3 a
N [$g\ kg^{-1}$]	0,78 \pm 0,23 a	0,66 \pm 0,13 a	0,88 \pm 0,09 a	0,95 \pm 0,11 a
P [$mg\ kg^{-1}$]	1,20 \pm 0,44 c	1,00 \pm 0,01 c	11,80 \pm 2,62 a	5,80 \pm 1,64 b
K [$cmol_c\ kg^{-1}$]	0,03 \pm 0,01 c	0,02 \pm 0,01 c	1,85 \pm 0,50 a	0,99 \pm 0,50 b
Ca [$cmol_c\ kg^{-1}$]	0,07 \pm 0,03 b	0,65 \pm 0,12 a	0,59 \pm 0,14 a	0,68 \pm 0,14 a
Mg [$cmol_c\ kg^{-1}$]	0,05 \pm 0,01 b	0,72 \pm 0,21 a	0,50 \pm 0,16 a	0,55 \pm 0,18 a
Al [$cmol_c\ kg^{-1}$]	0,95 \pm 0,12 a	0,24 \pm 0,13 b	0,01 \pm 0,00 c	0,19 \pm 0,08 c
H+Al [$cmol_c\ kg^{-1}$]	3,30 \pm 0,56 a	2,21 \pm 0,68 a	2,59 \pm 0,47 a	2,65 \pm 1,26 a
Fe [$mg\ kg^{-1}$]	94,60 \pm 7,6 a	94,60 \pm 11,8 a	113,20 \pm 13,8 a	88,60 \pm 7,2 a
t [$cmol_c\ kg^{-1}$]	1,48 \pm 0,09 b	1,64 \pm 0,08 b	2,96 \pm 1,04 a	2,42 \pm 1,02 ab
T [$cmol_c\ kg^{-1}$]	3,83 \pm 0,48 b	3,61 \pm 0,50 b	5,54 \pm 0,99 a	4,88 \pm 1,08 ab
V [%]	13,42 \pm 3,35 b	39,14 \pm 10,91 a	52,28 \pm 5,30 a	45,85 \pm 8,30 a
m [%]	62,30 \pm 10,40 a	15,00 \pm 5,30 b	0,42 \pm 0,16 c	9,02 \pm 2,70 b

As concentrações de K encontradas para os tratamentos T0 ($0,03 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e T1 ($0,02 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), os quais não receberam adição de cloreto de potássio, são consideradas muito baixas segundo a classificação de Ribeiro *et al.* (1999). Em contrapartida, os tratamentos submetidos à aplicação de KCl exibiram concentrações bastante elevadas do referido nutriente, com valores 60 vezes superiores ao do tratamento controle.

As maiores concentrações de Ca foram observadas nos tratamentos T3 e T1, com valores de $0,68$ e $0,65 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente. Embora estes valores sejam cerca de dez vezes maiores que a concentração encontrada no tratamento controle ($0,07 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), ainda assim são classificados como muito baixos. Neste caso, devido ao fato da amostragem ter sido realizada ao final do experimento, dez meses após a aplicação do calcário dolomítico, é possível que os níveis de Ca e Mg estejam abaixo daqueles verificados nos meses subsequentes à calagem. O Mg, por sua vez, exibiu o teor mais elevado no tratamento T1 ($0,7 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) seguido pelos tratamentos T2 e T3, ambos com $0,5 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ e tratamento T0 ($0,05 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$). Os maiores valores de Ca e Mg exibidos nas amostras dos tratamentos T1, T2 e T3 devem ser reflexos do fornecimento destes nutrientes pela aplicação do calcário dolomítico na camada de 0 a 20 cm de profundidade do solo, fato verificado em experimento em solos de pastagens degradadas submetidos a correção com calcário e gesso (Silva *et al.*, 2006).

As concentrações de Al foram baixas nos tratamentos T1, T2 e T3, com valores de $0,24$, $0,01$ e $0,19 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$, respectivamente. Estes resultados, provavelmente, são consequências do efeito da calagem. Para o tratamento controle a concentração de Al de $0,95 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ é considerada mediana (Ribeiro *et al.*, 1999). Os valores da CTC efetiva (t) para T0 ($1,48 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e T1 ($1,64 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) refletiram baixa capacidade dos solos sob estes tratamentos em reter cátions próximos aos valores de pH atuais, ao passo que para T2 ($2,96 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e T3 ($2,42 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) esta capacidade foi melhorada e classificada como média (Lopes *et al.*, 1991). Nestes tratamentos houve adição de fertilizante potássico, que, pode ter sido a razão do aumento da soma de bases.

A porcentagem de saturação por Al da CTC efetiva (m) foi considerada alta apenas para o tratamento T0 (62,3%), como reflexo das condições naturais dos Latossolos de textura muito argilosa, como o solo da área do experimento. Em geral, quanto mais ácido é um solo, maior o teor de Al trocável em valor absoluto, menores são os teores de Ca, Mg e K, conseqüentemente menor é a soma de bases e maior é o valor de m. Esta variável reflete o grau de toxicidade do solo e é recomendável que esteja abaixo de 20% (Lopes *et al.*, 1991). A descrição que caracteriza o solo onde foi realizado o experimento, sugere, juntamente com as

demais variáveis que serão discutidas ao longo do trabalho, que *B. excelsa* apresenta características de espécies adaptadas a solos ácidos e parece não ser sensível a altos teores de Al. Os valores da porcentagem de saturação por bases da CTC a pH 7,0 (V) mostram que em condições normais o solo da área é de baixa fertilidade (T0 = 13,4%). Os resultados indicam que houve melhoria da fertilidade nos tratamentos T2 e T3, devido à oferta de nutrientes via fertilização, com melhores resultados verificados no tratamento T2 (52,3%), considerado fértil com o aumento de V.

4.2.2 Nutrientes foliares e eficiência no uso dos nutrientes

O maior teor de N foliar foi obtido no tratamento T3 (17,0 g kg⁻¹), o qual foi 79, 30 e 13% maior que os valores observados nos tratamentos T0, T1 e T2, respectivamente. No entanto, mesmo o valor mais baixo, encontrado no tratamento T0 (9,5 g kg⁻¹), situa-se próximo aos valores encontrados em outros trabalhos com espécies florestais amazônicas (Gonçalves *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2006; Souza, 2006; Souza *et al.*, 2010). Dessa forma, e considerando a ausência de sintomas de deficiência visual deste nutriente e o aspecto fisionômico sadio das mudas de todos os tratamentos, a faixa dos teores de N encontrados nesta pesquisa, independente do tratamento aplicado, pode ser relacionada às condições naturais onde a espécie *B. excelsa* está evolutivamente adaptada, exibindo adequado crescimento e desenvolvimento das mudas desde os valores mais baixos até aqueles onde foram observados incrementos.

Os maiores teores de N decorrentes da adição deste nutriente ao tratamento T3, pode ser entendido como "consumo de luxo". Nos estudos de nutrição mineral de plantas, quando o elemento encontra-se em baixas concentrações no solo, o crescimento das plantas aumenta quando quantidades adicionais deste elemento são fornecidas, resultando no aumento de sua concentração na planta. Acima de uma concentração crítica (aquela na qual o elemento proporciona 90% do crescimento máximo), o aumento no fornecimento do nutriente não afeta consideravelmente o crescimento, caracterizando assim o "consumo de luxo" do elemento, definido como sendo seu armazenamento no vacúolo durante períodos de crescimento ativo. A zona de consumo de luxo é normalmente extensa para macronutrientes (Epstein e Bloom, 2004; Farnezi, 2008). No entanto, espera-se que o quadro relacionado às estratégias relacionadas aos ganhos foliares seja um sinal mais claro do investimento fisiológico em estruturas de captação de luz e assimilação de carbono. Este direcionamento exibido pelas plantas do tratamento T3 pode não ter sido completado por desequilíbrio nutricional,

particularmente no que se refere às concentrações de fósforo, uma vez que a concentração de nitrogênio quase dobrou entre os resultados dos tratamentos T0 e T3, mas os teores de fósforo foram praticamente os mesmos.

Tabela 6. Teores foliares de nutrientes em plantas jovens de *B. excelsa* após aplicação de diferentes tratamentos de fertilização 9 meses após o plantio. Tratamentos: T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Os valores são médias \pm desvio-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

	T0	T1	T2	T3
N [g kg ⁻¹]	9,53 \pm 4,08 b	13,08 \pm 2,95 ab	15,06 \pm 1,03 ab	17,05 \pm 1,26 a
P [g kg ⁻¹]	0,67 \pm 0,04 a	0,80 \pm 0,02 a	0,66 \pm 0,06 a	0,65 \pm 0,06 a
K [g kg ⁻¹]	7,77 \pm 0,54 b	6,37 \pm 1,32 b	11,47 \pm 0,90 a	10,46 \pm 1,44 a
Ca [g kg ⁻¹]	8,39 \pm 1,54 b	16,21 \pm 1,38 a	5,98 \pm 1,31 b	3,19 \pm 0,50 c
Mg [g kg ⁻¹]	1,58 \pm 0,53 b	2,85 \pm 0,65 a	1,18 \pm 0,15 b	0,79 \pm 0,24 b
Fe [mg kg ⁻¹]	143,66 \pm 11,50 ab	148,00 \pm 12,12 ab	121,75 \pm 14,70 b	182,75 \pm 29,34 a
Zn [mg kg ⁻¹]	18,33 \pm 3,51 a	15,33 \pm 3,51 a	15,25 \pm 2,75 a	16,75 \pm 5,43 a

O maior teor de P foi observado no tratamento T1 (0,80 g kg⁻¹), ao passo que não foram observadas diferenças entre os tratamentos, T0, T2 e T3, sendo 0,67, 0,66 e 0,65 g kg⁻¹, respectivamente. Teores de fósforo de 1,28 g kg⁻¹ foram encontrados em plantas jovens de *B. excelsa* submetidas a tratamento com adubação química convencional (Ferreira *et al.* (2009). O valor encontrado por esses autores é quase o dobro do valor obtido neste experimento, sugerindo que a presença de adubação fosfatada poderia ter favorecido a absorção deste nutriente pelas mudas e incrementado o desempenho fisiológico das mesmas de um modo geral. Outra evidência importante relacionada à presença ou ausência de P se deve à reconhecida deficiência deste nutriente nos solos da Amazônia ocidental, fato que não tem sido destacado para o elemento N, devido aos elevados teores de matéria orgânica (Falcão e Silva, 2004; Ferreira *et al.*, 2006)

Os teores de K variaram entre 7,77 (T0) e 11,47 (T2) g kg⁻¹. Estudos com fertilização de mudas de acariquara (*Minquatia guianensis*) com macro, micronutrientes e bactérias solubilizadoras de fosfato (BSF), exibiram valores entre 8,21 e 12,38 g kg⁻¹ de K nos tratamentos com a presença da mesma combinação de nutrientes utilizada neste trabalho (Souza, 2006). A concentração média de K necessária para o adequado crescimento vegetal

está em torno de $10,0 \text{ g kg}^{-1}$ de matéria seca da parte aérea (Kerbaudy, 2004). Se considerado o metabolismo vegetal, independente de suas variações específicas, pode-se observar que os tratamentos T2 ($11,47 \text{ g kg}^{-1}$) e T3 ($10,46 \text{ g kg}^{-1}$) que receberam adubação potássica, encontram-se dentro do padrão considerado satisfatório. Os menores teores de K foram encontrados no tratamento T1 ($6,37 \text{ g kg}^{-1}$), o qual recebeu apenas a correção do solo com calcário dolomítico. O excesso de Ca e em menor escala de Mg, determinam a menor absorção de K, provavelmente por inibição competitiva (Patel *et al.*, 1993; Fonseca e Meurer, 1997). Isto pôde ser verificado, uma vez que o teor de Ca para o tratamento T1 foi de $16,21 \text{ g kg}^{-1}$, valor cinco vezes superior ao encontrado no tratamento T3 ($3,19 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 6).

Os teores de Mg variaram entre $0,79$ e $2,85 \text{ g kg}^{-1}$, e de forma semelhante às respostas dos tratamentos quanto aos teores de Ca, o T3 exibiu as menores concentrações em contraste ao tratamento T1, com teores cerca de quatro vezes maiores (Tabela 6). O fato do Mg constituir íon com pequeno raio iônico, porém com grande raio de hidratação, sua absorção pode ser fortemente reduzida pelo K^+ , NH_4^+ , Ca^{2+} e pelos íons H^+ em baixo pH (Kerbaudy, 2004). Este fenômeno pode ter acontecido nas plantas dos tratamentos T2 e T3, em consequência da adição de K^+ oriundo do cloreto de potássio e da amônia do fertilizante nitrogenado (ureia) utilizado no T3, como ação competitiva isolada de uma única forma do nutriente ou em conjunto. Folhas deficientes em Mg^{2+} são sensíveis à luz, e os sintomas de clorose e necrose se acentuam quando estão expostas à alta intensidade luminosa (Epstein e Bloom, 2004). Neste experimento, mesmo sob condições de alta irradiância (a pleno sol, no campo) e baixos teores de Mg foliar, *B. excelsa* não apresentou nenhum dos sintomas de deficiência supracitados, o que pode ser explicado pela alta eficiência no uso destes nutrientes, que será discutido mais adiante neste trabalho.

Com relação aos teores foliares de Fe, foram encontrados valores entre 121 (T2) e 148 mg kg^{-1} (T3). Partindo do pressuposto que as quantidades médias para o adequado desenvolvimento vegetal estão em torno de 100 mg kg^{-1} de matéria seca (Kerbaudy, 2004), todos os tratamentos apresentaram concentrações de Fe acima deste valor. O Fe está envolvido na biossíntese dos citocromos, de coenzimas e da clorofila. Com a deficiência de ferro, portanto, dentre outros processos, pode ocorrer decréscimo nas concentrações de clorofila e de outros pigmentos receptadores de luz como os carotenoides. É importante mencionar que, de acordo com as análises de fertilidade do solo da área do experimento antes da instalação do plantio, haviam altas concentrações de Fe, da ordem de 168 mg kg^{-1} , evidenciando a não limitação quanto à disponibilidade deste nutriente.

Os teores de Zn variaram entre 15,2 (T2) e 18,3 (T0) mg kg⁻¹, não havendo diferenças entre os tratamentos. Os valores encontram-se dentro da faixa demandada pelos vegetais que está entre 15,0 e 30,0 mg kg⁻¹ (Kerbauy, 2004). Estudos utilizando solução nutritiva com mudas de *B. excelsa* em casa de vegetação, mostraram que a omissão de Zn não foi fator limitante ao crescimento das plantas (Camargos *et al.*, 2002). Os autores atribuíram tais resultados à elevada concentração de Zn encontrada na amêndoa na ocasião da germinação e crescimento inicial das plantas (56,12 mg kg⁻¹).

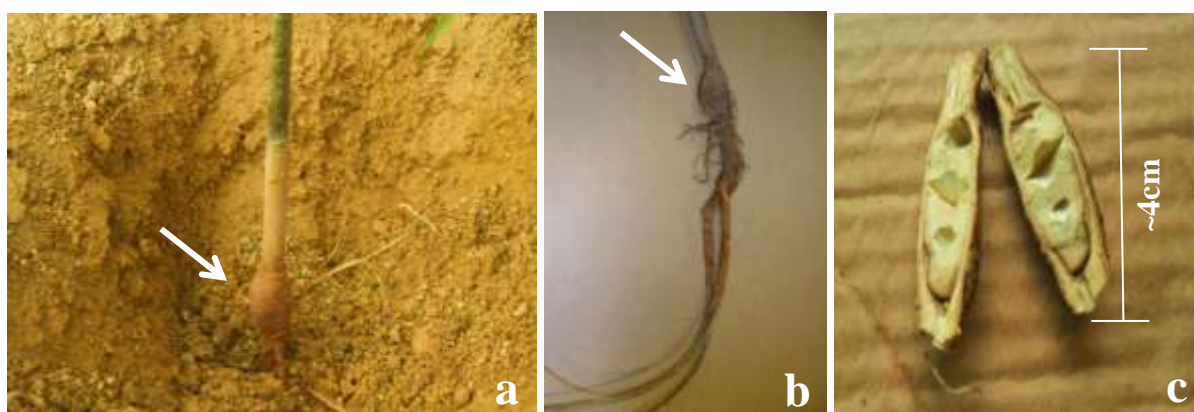


Figura 3. Aspectos morfológicos da raiz de plantas jovens de *B. excelsa* com aproximadamente 22 meses de idade, evidenciando presença de endosperma.

De forma geral, as concentrações para os nutrientes analisados estiveram dentro do intervalo de adequação para o crescimento e desenvolvimento das plantas de *B. excelsa* quando jovens, com exceção do P, elemento que não estava presente em nenhum dos tratamentos aplicados. A amêndoa da castanheira e sua reserva nutricional permanecem presentes na planta jovem mesmo após 1 ano e 9 meses, como foi verificado neste estudo. Este fato merece atenção, pois é provável que esta reserva seja suficiente para a manutenção da muda por longo período após a germinação. Algumas evidências são: a) a morfologia da raiz demonstra investimento em sustentação, com uma ou duas raízes pivotantes, em contraste a poucas raízes secundárias e de comprimento e espessura muito menores às principais, sendo estas as principais responsáveis pela absorção de nutrientes do solo (Figura 3b); b) os teores de nutrientes encontrados no tratamento controle (T0) que pouco se diferenciaram dos demais tratamentos que receberam fertilização química. Em teoria, estes indivíduos podem ter como fonte as amêndoas, tanto pela facilidade de retranslocação, regulada internamente pela planta, no que concerne à relação fonte e dreno, mas também considerando-se a baixa capacidade do

solo no tratamento T0 de fornecer nutrientes. Em ambiente natural, a presença de endosperma é atrativo alimentar para roedores e outros mamíferos terrestres, e, a predação desta parte integrante do caule causa a morte da planta (Oliveira, 2000; Zuidema, 2003).

No que diz respeito à eficiência no uso dos nutrientes ($EU_{\text{nutriente}}$), o tratamento T3 apresentou maiores valores de eficiência para N, P, Ca, Mg e Zn, com destaque para a eficiência no uso do P, que foi 70% maior que o tratamento T0 com pior desempenho, e para a eficiência no uso do Ca e Mg, que foi 6 e 4 vezes maior que o tratamento T2, o qual exibiu os menores valores de eficiência no uso destes dois nutrientes. Quanto ao K, o tratamento T1 mostrou eficiência 46% maior em relação ao tratamento T0. Os resultados de eficiência no uso do Fe foram próximos para todos os tratamentos, sendo apenas T0 diferente dos demais (Figura 4). Do ponto de vista nutricional, uma espécie robusta quanto à tolerância a faixas amplas dos fatores físicos do meio é aquela capaz de crescer e se desenvolver, apresentando boa produtividade primária em condições desfavoráveis de fertilidade do solo, tendo capacidade de absorver os nutrientes necessários, mesmo que estejam em menor quantidade, e ou, distribuí-los de maneira mais eficiente nos diversos componentes da planta, sem comprometer sua produção (Caldeira *et al.*, 2004). Experimentos de nutrição com N e P em mudas de *Euterpe edulis*, mostraram que a eficiência na utilização de N aumenta com o menor suprimento de N (Illenseer e Paulilo, 2002), neste trabalho, contrariamente, a maior EUN foi verificada para o tratamento que recebeu adubação nitrogenada.

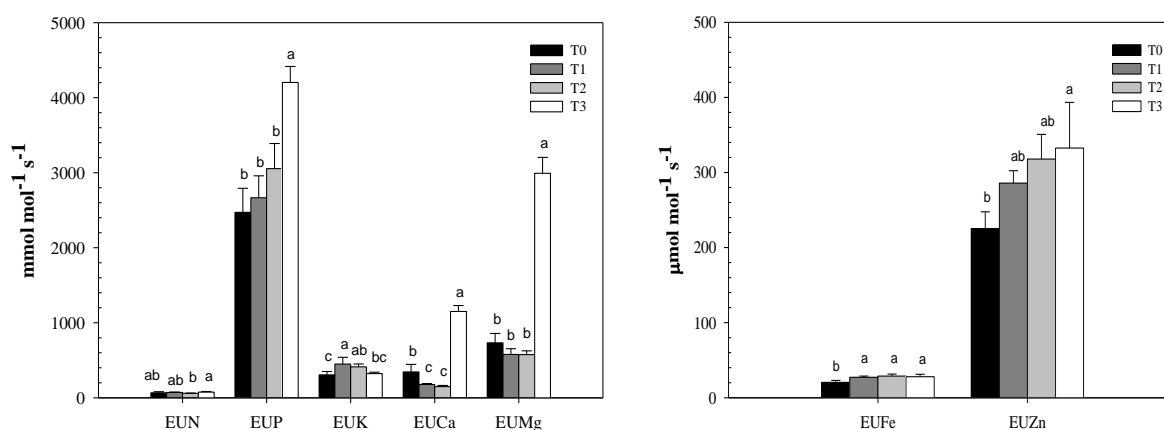


Figura 4. Eficiência no uso de nutrientes ($EU_{\text{nutriente}}$) em plantas de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de fertilização (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Os valores são médias e as linhas verticais os desvios-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

4.3 Trocas gasosas

As taxas de fotossíntese máxima estimada (A_{\max}) não diferiram entre os tratamentos, no entanto os maiores valores foram observados para indivíduos do tratamento T3 ($10,6 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), os demais tratamentos alcançaram os seguintes valores em ordem decrescente: tratamento T1 ($9,9 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), T0 ($9,7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e T2 ($9,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Figura 5). Estes valores são superiores aos encontrados em plantas jovens de *B. excelsa* aos 4 anos de idade crescendo sobre solo degradado sem fertilização ($4,7 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e, quando submetidas ao tratamento com adubação química ($8,0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), porém inferiores ao tratamento com adubação verde ($13,2 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (Ferreira *et al.*, 2009).

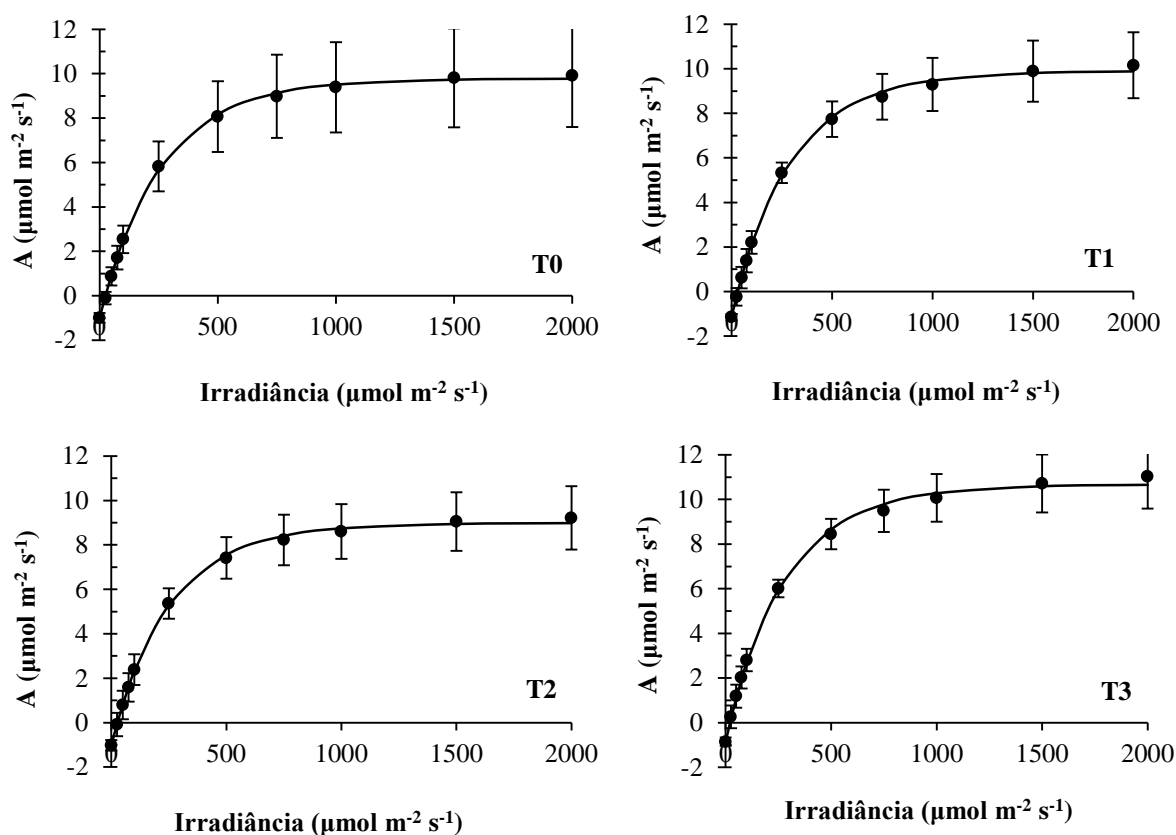


Figura 5. Curvas de resposta de fotossíntese (A) em função do aumento nos níveis de irradiância em plantas de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de fertilização (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Círculos representam os valores médios dos dados observados com seus respectivos desvios-padrão e as linhas representam curvas ajustadas.

Os resultados do tratamentos controle (T0) quanto aos valores de A_{\max} foram em média 55% maiores nesta pesquisa do que aquele supracitado. Desconsiderando-se os atributos químicos inerentes de cada sítio, verifica-se a possível influência da reserva nutricional ainda presente nas mudas deste trabalho, com 1 ano e 9 meses de idade e que já não estaria mais presente nas plantas jovens do experimento de Ferreira *et al.* (2009), onde as plantas já apresentavam cerca 4 anos de idade. Além dos atributos químicos, é possível que alterações nas propriedades físicas tenham exercido influência importante, como o preparo do solo por meio de gradeamento e a descompactação no momento da abertura das covas, favorecendo a aeração, o movimento da água e a disponibilidade de nutrientes. Mesmo assim, guardando-se as diferentes condições experimentais e a diversidade de abordagens teóricas que envolvem as duas pesquisas, vale destacar a plasticidade fisiológica da espécie, uma vez que *B. excelsa* conseguiu assimilar carbono adequadamente em ambas as situações e respondeu aos tratamentos aplicados.

Ainda na intenção de verificar o nível de desempenho nutricional e fotossintético nas duas pesquisas, pode-se afirmar que ao considerar os fertilizantes químicos utilizados, a composição e dosagem dos tratamentos foram diferentes, e, ainda, que o ônus da ausência do fornecimento de P neste trabalho, destaca-se pela dificuldade das comparações, mas sinaliza para a provável ação fundamental deste nutriente. E, finalmente, concluídos os prováveis efeitos comparativos em se tratando da adubação verde aplicada por Ferreira *et al.* (2009), é possível que a presença de cobertura no solo, favorecendo a manutenção de maiores níveis de umidade e temperaturas mais amenas próximo à zona de crescimento do sistema radicular nas camadas superficiais do solo, aliada ao fornecimento de nutrientes via decomposição do material vegetal deve exercer melhorias significativas no desempenho dos mecanismos fisiológicos das plantas, principalmente, no ajuste das taxas de transpiração.

As taxas de respiração (R_d), variaram entre 0,9 e 1,1 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Altas taxas de R_d podem refletir alto custo na manutenção do aparato fotossintético e aumento do investimento em mecanismos de fotoproteção (Clearwater *et al.*, 1999). Neste sentido, os valores encontrados foram aproximados àqueles encontrados também com a espécie *B. excelsa* nos trabalhos de Morais (2003) e Ferreira *et al.* (2009), confirmando alta plasticidade fisiológica para a espécie estudada, a qual já havia sido evidenciada pelos trabalhos supracitados.

As taxas de condutância estomática (g_s), por sua vez, variaram entre 0,32 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para o tratamento T0 e 0,53 $\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ para o tratamento T1, no entanto não foram observadas diferenças entre os tratamentos (Tabela 7). Em experimentos de campo as plantas estão expostas diretamente à radiação incidente, necessitando regular a temperatura interna

através da transpiração, o que pode explicar as altas taxas de g_s para os tratamentos (Nery *et al.*, 2011). Além disso, não foi observada deficiência hídrica para os tratamentos, confirmada pelos valores de potencial hídrico na antemanhã (Figura 6). Com base nisto, pode-se sugerir que as plantas tenderiam a manter os estômatos abertos para a absorção de CO_2 , o que pode ser confirmado pelos valores de fotossíntese (Figura 5). Em experimento de deficiência hídrica controlada, *B. excelsa* parece exibir estratégia bastante eficiente quanto ao controle da abertura e fechamento dos estômatos, uma vez que, mesmo diante de leve queda em g_s no tratamento irrigado, mudas de *B. excelsa* exibiram capacidade de manutenção das taxas de assimilação de carbono e, em apenas quatro dias após a reidratação das mudas sob deficiência hídrica as taxas de g_s e E estavam completamente reestabelecidas ao patamar inicial de experimentação (Gonçalves, J. F. C, dados não publicados). Os valores dos tratamentos T0 e T3 para EUA deste experimento foram semelhantes aos encontrados à condição irrigada do trabalho supracitado. Para a transpiração a variação foi de $3,4 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (T0) a $4,8 \text{ mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (T1). De modo geral, as respostas nas taxas de fotossíntese, condutância estomática e transpiração ocorrem de maneira uniforme, pois constituem variáveis diretamente relacionadas (Kerbaui, 2004).

Tabela 7. Taxas de respiração (R_d), condutância estomática (g_s), transpiração (E), eficiência do uso da água (EUA) e eficiência intrínseca do uso da água (EIUA) de plantas de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de fertilização (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Os valores são médias \pm desvio-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

	T0	T1	T2	T3
Rd [$\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	$1,0 \pm 0,3$ a	$1,1 \pm 0,2$ a	$0,9 \pm 0,3$ a	$0,9 \pm 0,2$ a
g_s [$\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	$0,32 \pm 0,12$ a	$0,53 \pm 0,24$ a	$0,44 \pm 0,22$ a	$0,51 \pm 0,17$ a
E [$\text{mmol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	$3,4 \pm 0,7$ a	$4,8 \pm 1,3$ a	$4,2 \pm 0,9$ a	$4,5 \pm 0,5$ a
EUA [$\mu\text{mol mmol}^{-1}$]	$2,5 \pm 0,6$ a	$1,5 \pm 0,1$ b	$1,8 \pm 0,3$ b	$2,0 \pm 0,1$ ab
EIUA [$\mu\text{mol mol}^{-1}$]	$37,6 \pm 10,9$ a	$13,9 \pm 2,9$ b	$22,5 \pm 9,5$ b	$14,2 \pm 1,8$ b

4.4 Status hídrico do plantio

O potencial hídrico foliar na antemãnhã (Ψ_{am}) variou entre -0,29 (T3) e -0,26 (T1) MPa. O Ψ_{am} reflete a capacidade noturna de uma planta em recuperar a água perdida durante o dia e é um indicador da disponibilidade hídrica na rizosfera. O Ψ_{am} é considerado o melhor parâmetro na avaliação do status hídrico por não envolver variáveis como evapotranspiração e/ou fechamento estomático, que estão sujeitos à variações ao longo do dia (Miranda *et al.*, 2011).

Valores entre -2,7 (T1) e -1,7 (T3) MPa registrados ao meio dia (Ψ_{md}) refletem maior demanda evaporativa nesse período quando comparado à antemãnhã. Na antemãnhã, as plantas de todos os tratamentos exibiram comportamento semelhante. No entanto, considerando o Ψ_{md} , os tratamentos T2 e T3 exibiram os melhores desempenhos (Figura 6). Este fato pode ser atribuído, provavelmente, à adição de fertilizante potássico nestes dois tratamentos, uma vez que o potássio participa do ajustamento osmótico, que, por sua vez, promove tolerância à desidratação (Taiz e Zieger, 2004).

De modo geral, os valores de Ψ_w tanto na antemãnhã quanto ao meio dia estão próximos àqueles encontrados em outros estudos com espécies amazônicas (Silva, 2005; Oliveira e Carvalho, 2008).

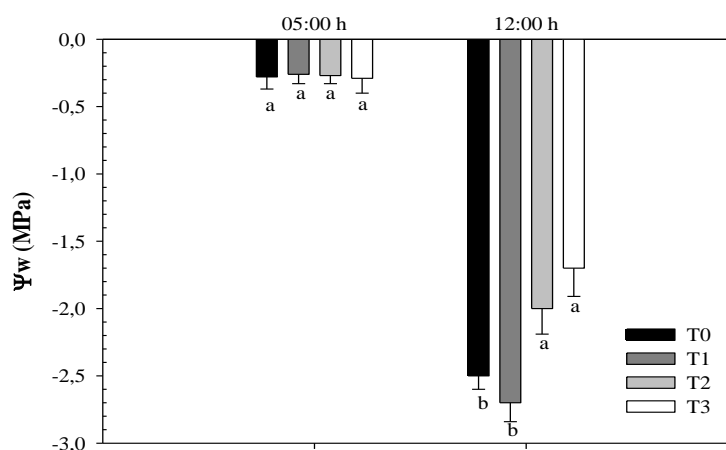


Figura 6. Potenciais hídricos foliares na antemãnhã (05:00 h) e ao meio-dia (12:00 h) de mudas de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de adubação (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Os valores são médias e as linhas verticais são os desvios-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

Com relação aos parâmetros de eficiência no uso da água, o tratamento T0 mostrou o melhor desempenho, tanto para EUA ($2,5 \mu\text{mol mmol}^{-1}$) quanto para EIUA ($37,6 \mu\text{mol mol}^{-1}$) (Tabela 7). Diversos aspectos fisiológicos estão relacionados à melhor eficiência no uso da água, dentre eles a capacidade de regulação das taxas de assimilação de carbono e o controle da abertura e fechamento estomático merecem destaque, pois o ajuste osmótico, assim como o fechamento dos estômatos, permite às plantas escapar da condição de desidratação e da perda de turgescência pela manutenção do conteúdo de água nas células (Roza, 2010). À semelhança do obtido em *B. excelsa* crescendo em área degradada sob adubação verde, a espécie apresentou menor valor de EUA em T3 em função do aumento das taxas de fotossíntese e não pela regulação da transpiração (Gonçalves, J. F. C, dados não publicados). Por outro lado, em T0 verificou-se estratégia de controle da EUA mais associada à regulação das taxas de transpiração.

4.5 Teores foliares de pigmentos cloroplastídicos

Os teores de clorofila *a* (Chl *a*) e carotenoides (C_{x+c}) foram maiores no tratamento T0, com $0,91$ e $0,54 \mu\text{mol g}^{-1}$, respectivamente. Em razão dos maiores valores de Chl *a* e Chl *b*, o tratamento T0 também exibiu resultados superiores quanto aos teores de clorofila total (Chl total) e razão Chl *a*/Chl *b*. Em relação ao conteúdo de clorofila *b*, todos os valores foram próximos, entre $0,20$ e $0,25 \mu\text{mol g}^{-1}$. Da mesma forma que as Chl *a* e *b*, os carotenoides estão estruturalmente relacionados com os fotossistemas I e II e desempenham papel importante na estabilização e fluidez da membrana do tilacoide, assim como na dissipação da energia em excesso na forma de calor (Nelson e Yocum, 2006).

Melhores resultados observados nos tratamentos T0, T2 e T3, no que diz respeito aos teores de pigmentos cloroplastídicos, novamente corroboram com o melhor desempenho ecofisiológico destes três tratamentos em comparação ao tratamento T1. Na avaliação do conteúdo de pigmentos cloroplastídicos, o tratamento T1 apresentou os menores resultados em todos os parâmetros. Esperava-se que os maiores teores de pigmentos fossem encontrados no tratamento T3 (fertilização nitrogenada), dada a relação positiva e bem conhecida entre N, clorofilas e fotossíntese, no entanto isto não aconteceu. O fato das plantas estarem expostas ao ambiente de alta irradiância (plantio em sol pleno, 2100 a $2300 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) pode induzir maior velocidade de degradação de pigmentos em comparação à sua síntese, implicando que

nem sempre maiores teores de nitrogênio foliar refletem maior concentração de pigmentos cloroplastídicos (Mendes *et al.*, 2001).

Em estudo de correlação entre o teor de clorofila e N total em espécies florestais amazônicas utilizando determinação destrutiva e não destrutiva, foi constatado não haver relação entre as duas variáveis, indicando que alta porcentagem do N absorvido na fase inicial de crescimento das espécies é provavelmente utilizada na produção de outras estruturas da planta e não necessariamente na síntese de clorofila (Santos Filho *et al.*, 2006). Os dados de ganho foliar e índice de ganho foliar de plantas jovens de *B. excelsa* deste experimento discutidos anteriormente (Figura 2) evidenciam estratégia desta espécie no lançamento de maior número de folhas induzidas pelo fornecimento de N, o que pode ter comprometido o equilíbrio nutricional em termos de teores de N. Em resposta ao aumento no estoque de N, a produção de área foliar aumenta mais que a taxa fotossintética por unidade de folha, a produção de novas folhas cria uma nova demanda por N, novas folhas tendem a maximizar o crescimento porque estão produzindo novo tecido fotossintético (Loustau *et al.*, 2001). Além disso é sabido que o aumento no conteúdo de clorofilas está diretamente relacionado com a exposição do vegetal à baixos níveis de irradiância e vice-versa (Nery *et al.*, 2011; Hallik *et al.*, 2012).

Tabela 8. Concentrações de pigmentos cloroplastídicos foliares em plantas jovens de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de fertilização (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Os valores são médias \pm desvio-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

	T0	T1	T2	T3
Chl <i>a</i> [$\mu\text{mol g}^{-1}$]	0,91 \pm 0,11 a	0,67 \pm 0,07 b	0,80 \pm 0,15 ab	0,72 \pm 0,06 ab
Chl <i>b</i> [$\mu\text{mol g}^{-1}$]	0,25 \pm 0,07 a	0,20 \pm 0,05 a	0,25 \pm 0,03 a	0,25 \pm 0,11 a
C _{x+c} [$\mu\text{mol g}^{-1}$]	0,54 \pm 0,06 a	0,39 \pm 0,04 b	0,47 \pm 0,09 ab	0,42 \pm 0,03 ab
Chl <i>a</i> /Chl <i>b</i>	3,9 \pm 0,8 a	3,3 \pm 0,5 a	3,1 \pm 0,3 a	3,3 \pm 0,6 a
Chl total [$\mu\text{mol g}^{-1}$]	1,16 \pm 0,17 a	0,87 \pm 0,11 b	1,06 \pm 0,18 ab	0,97 \pm 0,16 ab
Chl total/ C _{x+c}	2,1 \pm 0,1 a	2,2 \pm 0,1 a	2,2 \pm 0,1 a	2,3 \pm 0,2 a

Clorofila *a* (Chl *a*); clorofila *b* (Chl *b*); carotenoides (C_{x+c}); razão clorofila *a*/clorofila *b* (Chl *a*/Chl *b*); clorofila total (Chl total) e razão clorofila total/carotenoides (Chl total/ C_{x+c}).

Este fenômeno não ocorre apenas em espécies florestais, como foi verificado em estudo com *Achillea millefolium* L. submetida à fertilização nitrogenada (ureia) e dois níveis de sombreamento, onde os resultados mostraram não haver influência da oferta de N nem da interação entre estes fatores sobre os teores de clorofilas *a* e *b* nesta espécie (Lima *et al.*, 2008).

Os teores de clorofilas obtidos neste trabalho foram em média 30% mais baixos do que aqueles encontrados por Ferreira *et al.* (2009) em plantio com 4 anos de idade e até 170% inferiores àqueles encontrados por Morais *et al.* (2007) em plantio com 10 anos de idade, nos quais *B. excelsa* mostrou os maiores teores de pigmentos tanto em período seco quanto chuvoso. É evidente que as folhas na fase de muda possuem estrutura anatômica diferente das folhas adultas, que contam com aumento no número de parênquimas e conseqüentemente de cloroplastos (Medri e Lleras, 1979). Além disso, estes resultados podem ser reflexo do estresse causado pela alta irradiância a que as mudas foram submetidas na fase inicial de estabelecimento no campo. O mesmo comportamento diagnosticado pelo método de extração química foi verificado para as estimativas do índice de conteúdo de clorofila (ICC), onde os tratamentos T0, T2 e T3 não exibiram diferenças, com valores da ordem de 19,0, 18,4 e 18,2 respectivamente (Figura 7).

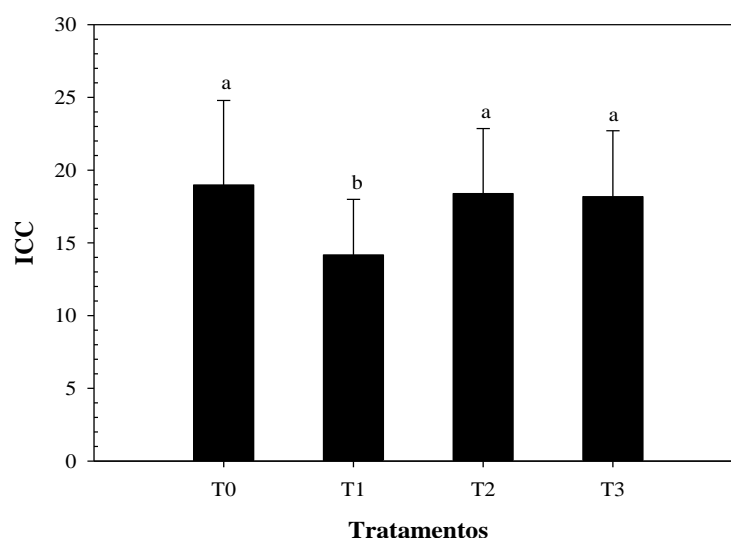


Figura 7. Índice de Conteúdo de Clorofila (ICC) em *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de fertilização (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Linhas verticais indicam os desvios-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

4.6 Fluorescência da clorofila *a*

Os resultados obtidos na análise de fluorescência da clorofila *a* revelaram que não houve diferença entre os tratamentos para os parâmetros de emissão de fluorescência inicial (F_0), fluorescência máxima (F_m), fluorescência variável (F_v) e índice de desempenho (P.I.), à exceção da razão F_v/F_m que mostrou-se superior nos tratamentos T0, T1 e T2 (Tabela 9). Sob condições de alta luminosidade, como observado em plantios a sol pleno no campo, o sucesso do estabelecimento das plantas depende da capacidade efetiva de cada espécie para usar de forma eficiente a luz capturada (Gonçalves e Santos Júnior, 2005).

Neste sentido, o índice de desempenho tem sido proposto como parâmetro mais apropriado para avaliação das respostas do fotossistema II (PSII) às condições de estresse que a própria razão F_v/F_m isoladamente, pois o P.I. é resultado da combinação de eventos estruturais do PSII responsáveis pelo transporte de elétrons na fase fotoquímica da fotossíntese e, ainda, de outro evento, referente à energia que é dissipada ou perdida durante esse transporte (Baker, 2008). Neste aspecto, o tratamento T3 foi inferior aos demais tratamentos exibindo valores de P.I. 35% menores que o tratamento com valor mais alto (T2) e uma diferença de 12% em comparação aos valores de eficiência máxima do PSII. Talvez estes resultados possam ser consequência do teor de clorofila *a*, produto da diluição deste pigmento no maior número de folhas do tratamento T3.

O desempenho na dissipação de energia das mudas de *B. excelsa* deste experimento foi satisfatório quando comparado ao desempenho verificado em outras espécies arbóreas em solos degradados sob alta irradiância. Estudos utilizando a técnica da fluorescência da clorofila *a* como ferramenta para a seleção de espécies tolerantes a altos níveis de irradiância, mostraram melhores resultados quanto ao índice de desempenho (P.I.) para plantas jovens das espécies *Eugenia cumini* (jamelão) e *Senna reticulata* (mata-pasto), com valores iguais a 0,40 e 0,23, respectivamente (Gonçalves e Santos Júnior, 2005). Ao passo que, para *B. excelsa*, foram verificados valores entre 0,38 (T3) e 0,55 (T0).

No entanto, quando a comparação é feita com mudas de *Carapa guianensis* (andiroba) e *Dipteryx odorata* (cumaru) em experimento de exposição à sombra e sol, verifica-se que *C. guianensis* exibiu valor médio de P.I. em torno de 0,9, ou seja, um desempenho superior em 60% aos melhores tratamentos com *B. excelsa*. Para *D. odorata* os resultados foram semelhantes aos obtidos no presente estudo (Gonçalves *et al.*, 2010).

Em comparação ao estudo realizado por Ferreira *et al.* (2009) com plantas jovens de *B. excelsa* em solo degradado, os tratamentos T0, T1 e T2 desta pesquisa alcançaram valores de

eficiência máxima do PSII iguais ao melhor tratamento daquele experimento (adubação verde, $F_v/F_m=0,75$) e P.I. superior ao tratamento controle e ao tratamento de adubação química. Os valores observados neste experimento também foram iguais aos encontrados para mudas de acariquara (*M. guianensis*) expostas à alta irradiância, que à semelhança das plantas de *B. excelsa*, também exibiram danos fotoinibitórios e abscisão de folhas no período inicial de aclimatação (Azevedo e Marengo, 2012). Segundo Björkman e Demming-Adams (1987), valores da razão F_v/F_m abaixo de 0,83 são indicativos da presença de certo grau de estresse em tecidos vegetais.

Tabela 9. Variáveis de fluorescência da clorofila *a* em mudas de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de adubação (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Fluorescência inicial (F_0), fluorescência máxima (F_m), fluorescência variável ($F_v = F_m - F_0$), eficiência fotoquímica do fotossistema II (F_v/F_m) e índice de desempenho (P.I.). Os valores são médias \pm desvio-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

	F_0	F_m	F_v	F_v/F_m	P.I.
T0	746 \pm 111 a	3019 \pm 438 a	2273 \pm 386 a	0,74 \pm 0,04 a	0,55 \pm 0,13 a
T1	745 \pm 62 a	3031 \pm 246 a	2286 \pm 188 a	0,74 \pm 0,01 a	0,54 \pm 0,07 a
T2	771 \pm 172 a	3113 \pm 132 a	2342 \pm 79 a	0,75 \pm 0,05 a	0,59 \pm 0,23 a
T3	784 \pm 100 a	2646 \pm 289 a	1862 \pm 325 a	0,67 \pm 0,06 b	0,38 \pm 0,12 a

Com relação aos parâmetros de rendimento energético (razões de fluxo), observou-se que o tratamento T3 exibiu média inferior aos demais tratamentos para eficiência máxima do fotossistema II (TR_0/ABS) e, ao mesmo tempo, valores superiores para eficiência máxima de excitação não fotoquímica (DI_0/ABS). A fotoinibição é mais precisamente identificada pelo declínio da ET_0/TR_0 do que propriamente pelo declínio da razão F_v/F_m , isso nos permite afirmar que todos os tratamentos apresentaram sensibilidade semelhante quanto ao efeito de fotoinibição, dados os valores de ET_0/TR_0 muito próximos, variando entre 0,32 e 0,34. Estudos em mudas de *B. excelsa* submetidas à deficiência hídrica e reidratação exibiram valores entre 0,30 e 0,38 para ET_0/TR_0 , sendo que este valor só passou a decrescer após 30 dias sem irrigação, recuperando-se quatro dias após o reestabelecimento do fornecimento de água (Gonçalves, J. F. C, dados não publicados).

Quanto aos valores de máxima eficiência de excitação não fotoquímica (DI_0/ABS), os resultados variaram entre 0,24 (T0 e T2) e 0,32 (T3), indicando alta eficiência das plantas de todos os tratamentos na dissipação da energia na forma de calor e fluorescência. Valores da ordem de 0,27 e 0,28 para DI_0/ABS foram encontrados para *E. cumini* e *S. reticulata* em estudo que indicou estas espécies como adequadas para plantios a pleno sol, em função de seus mecanismos mais eficientes para o uso e captura da energia em comparação a outras espécies avaliadas no mesmo experimento (Gonçalves e Santos Júnior, 2005).

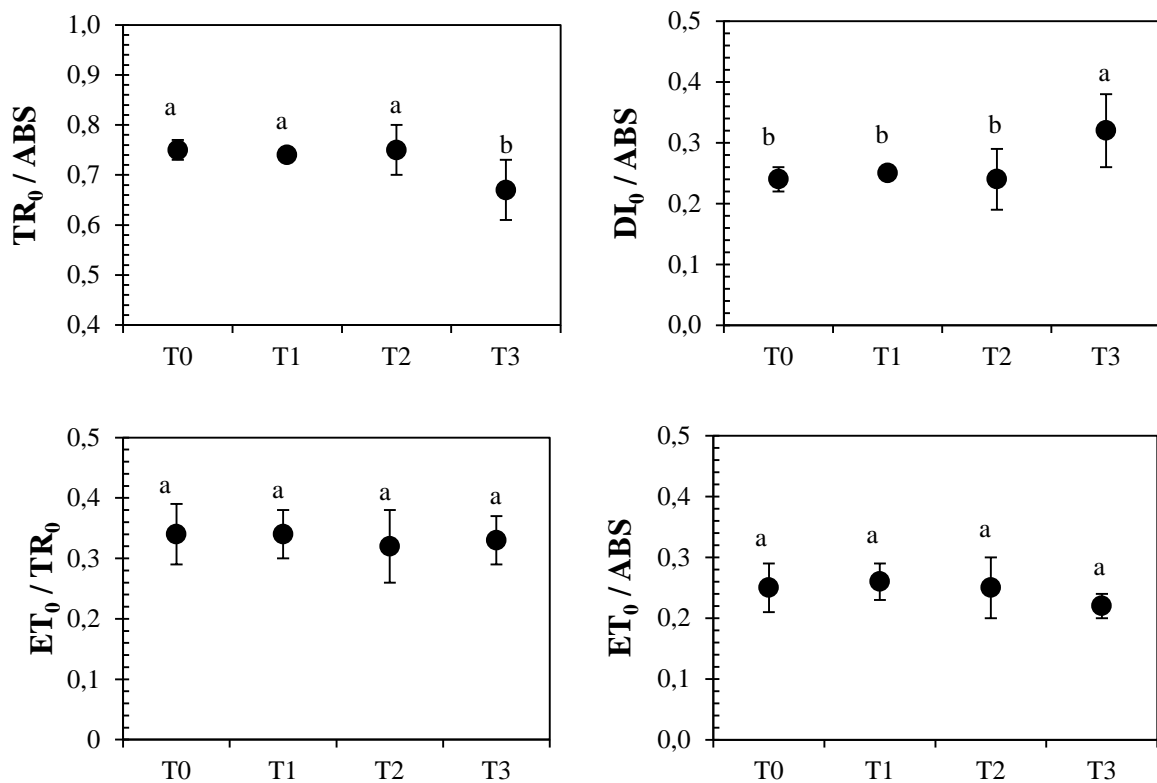


Figura 8. Eficiência máxima do fotossistema II (TR_0/ABS), eficiência máxima de excitação não fotoquímica (DI_0/ABS), probabilidade de um elétron capturado ser transportado após a quinona A (ET_0/TR_0) e probabilidade de um fóton absorvido mover um elétron após a quinona A (ET_0/ABS) em mudas de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de adubação (T0: controle; T1: Ca e Mg; T2: Ca e Mg + K + micronutrientes e T3: Ca e Mg + K + micronutrientes + N). Os círculos pretos são médias e as linhas verticais são os desvios-padrão. Letras diferentes indicam valores significativos entre tratamentos de fertilização (Teste de Tukey $P < 0,05$).

CONCLUSÕES

Diante destes resultados, pode-se inferir que plantas jovens de *B. excelsa* crescendo em plantios homogêneos em solo corrigido, com adição de micronutrientes e de nitrogênio mineral responderam quanto aos aspectos biométricos, com exceção dos efeitos relacionados à correção da acidez que não foram eficientes na melhoria destas variáveis.

Adicionalmente, conclui-se que a fertilização nitrogenada exibiu reflexos diretos, com incrementos sobre o *status* nutricional de plantas jovens de *B. excelsa*. Porém, não houve diferenças entre os tratamentos quanto à fotossíntese, taxas de transpiração, condutância estomática, respiração no escuro e teores de clorofilas, além de não ter influenciado o uso e a dissipação de energia.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Azevedo, G. F. C.; Marengo, R. A. 2012. Growth and physiological changes in saplings of *Minquartia guianensis* and *Swietenia macrophylla* during acclimaion to full sunlight. *Photosynthetica*, 50: (no prelo).
- Baker, N. R. Chlorophyll Fluorescence: A probe of photosynthesis in vivo. 2008. *Annual Review of Plant Biology*, 59: 89-113.
- Bernardi, A. C. C.; Carmello, Q. A. C.; Carvalho, S. A. 2000. Desenvolvimento de mudas de citros cultivadas em vaso em resposta à adubação NPK. *Scientia Agricola*, 57(4): 733-738.
- Björkman. O.; Demming-Adams, B. 1987. Photon yield of O₂ evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77k among vascular plants of diverse origins. *Planta*, 170: 489-504.
- Blind, M. R. 2010. *Características fotossintéticas de plantas jovens de Aniba rosaeodora Ducke e Anica canelilla (Kunth) Mez submetidas a diferentes condições de irradiância e de adubação nitrogenada sob plantio florestal*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas, 72pp.
- Boeger, M. R. T.; Poulson, M. 2006. Efeitos da radiação ultravioleta-B sobre a morfologia foliar de *Arabidopsis thaliana* (L.) Heynh (Brassicaceae). *Acta Botanica Brasilica*, 20(2): 229-338.
- Bonfim-Silva, E. M.; Silva, T. J. A.; Guimarães, S. L.; Pereira, M. T. J.; Gonçalves, J. M. 2011. Leguminosa híbrida java submetida à calagem em latossolo vermelho do cerrado. *Enciclopédia Biosfera*, 7(13): 1811-1820.
- Bugbee, G. 1996. Growth, analyses and yield components. In: Salisbury, F. B. (Ed.). *Units, Symbols and Terminology for plant physiology*, Oxford University Press.

Caldeira, M. V. W.; Rondon Neto, R. M.; Schumacher, M. V. 2004. Eficiência do uso de micronutrientes e sódio em três procedências de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). *Revista Árvore*, 28(1): 39-47.

Camargos, S. L.; Muraoka, T.; Fernandes, S. A. P.; Salvador, J. O. 2002. Diagnose nutricional em mudas de castanheira-do-Brasil. *Agricultura Tropical*, 6(1): 81-96.

Clearwater, M. J.; Susilawaty, R.; Gardingen, P. R. 1999. Rapid photosynthetic acclimation of *Shorea johorensis* seedlings after logging disturbance in Central Kalimantan. *Oecologia*, 121: 478-488.

Costa, J. R.; Castro, A. B. C.; Wandelli, E. V.; Coral, S. C. T.; Souza, S. A. G. 2009. Aspectos silviculturais da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) em sistemas agroflorestais na Amazônia Central. *Acta Amazonica*, 39(4): 843-850.

Davanso, V. M.; Souza, L. A.; Medri, M. E.; Pimenta, A.; Bianchini, E. 2002. Photosynthesis, Growth and development of *Tabebuia ovellanedae* Lor. Ex Griseb. (Bignoniaceae) in flooded soil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 45 (3):375-384.

EMBRAPA. 1999. *Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes*. Brasília. 370pp.

Epstein, E.; Bloom, A. J. 2004. *Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas*. 2. ed. Editora Planta, Londrina, Paraná. 401pp.

Evans, J. R.; Poorter, H. 2001. Photosynthetic acclimation of plants to growth irradiance: the relative importance of specific leaf area and nitrogen partitioning in maximizing carbon gain. *Plant, cell and environment*, 24: 755-767.

Falcão, N. P. S.; Silva, J. R. A. 2004. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. *Acta Amazonica*, 34(3): 337-342.

Farnezi, M. M. M. 2008. *Diagnose nutricional do cafeeiro para produção e qualidade da bebida na região do Alto Vale do Jequitinhonha, MG*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, Minas Gerais. 79 pp.

Ferreira, L. M. M.; Tonini, H. 2009. Comportamento da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) e da cupiúba (*Goupia glabra*) em sistema agrosilvicultural na região da Confiança, Cantá-Roraima. *Acta Amazonica*, 39(4): 835-842.

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(4): 616-620.

Ferreira, S. J. F.; Luizão, F. J.; Miranda, S. A.; Silva, M. S. R.; Vital, A. R. T. 2006. Nutrientes na solução do solo em floresta de terra firme na Amazônia Central submetida à extração seletiva de madeira. *Acta Amazonica*, 36(1): 59-68.

Fonseca, J. A.; Meurer, E. J. 1997. Inibição da absorção de magnésio pelo potássio em plântulas de milho em solução nutritiva. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 21(1): 47-50.

Furtini Neto, A. E.; Resende, A. V.; Vale, F. R.; Silva, I. R. 1999. Liming effects on growth of native woody species from brazilian savannah. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 34(5): 829-837.

Gonçalves, J. F. C.; Marengo, A. R.; Vieira, G. 2001. Concentration of photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence of mahogany and tonka bean under two light environments. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 13: 149-157.

Gonçalves, J. F. C.; Barreto, D. C. S.; Santos Junior, U. M.; Fernandes, A. V.; Sampaio, P. T. B.; Buckeridge, M. S. 2005. Growth, photosynthesis and stress indicators in young rosewood plants (*Aniba rosaeodora* Ducke) under diferente light intensities. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(3): 325-334.

Gonçalves, J. F. C.; Silva, C. E.; Gruimarães, D. G.; Bernardes, R. S. 2010. Análise dos transientes da fluorescência as clorofila *a* de plantas jovens de *Carapa guianensis* e de *Dipteryx odorata* submetidas a dois ambientes de luz. *Acta Amazonica*, 40(1): 89-98.

Gonçalves, J. F. C.; Santos Junior, U. M. 2005. Utilization of the chlorophyll *a* fluorescence technique as a tool for selecting tolerant species to environments of high irradiance. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17(3): 307-313.

Graciano, C.; Goya, J. F.; Frangi, J. L.; Guimet, J. J. 2006. Fertilization with phosphorus increases soil nitrogen absorption in Young plants of *Eucalyptus grandis*. *Forest Ecology and Management*, 236: 202-210.

Hallik, L.; Niinemets, Ü.; Kull, O. 2012. Photosynthetic acclimation to light in woody and herbaceous species: a comparison of leaf structure, pigment content and chlorophyll fluorescence characteristics measured in the field. *Plant Biology*, 14(1): 88-99.

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*, 148-152.

IBGE. 2010. Produção da extração vegetal e Silvicultura 2010. Rio de Janeiro.

INPE. 2009. Monitoramento da floresta Amazônica Brasileira por satélite. Projeto PRODES.

Illenseer, R.; Paulilo, M. T. S. 2002. Crescimento e eficiência na utilização de nutrientes em plantas jovens de *Euterpe edulis* Mart. Sob dois níveis de irradiância, nitrogênio e fósforo. *Acta Botanica Brasiliensis*, 16(4): 385-394.

Iqbal, R. M.; Rao, A. R.; Rasul, E.; Wahid, A. 1997. Mathematical models and response functions in photosynthesis: an exponential model. In: Pessaraki, M. (Ed.). *Handbook of photosynthesis*. Marcel Dekker Inc. New York. P.803-810.

Kato, A. K. 1995. Dinâmica da entrada de nutrientes via liteira em plantios de castanheira-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* H.B.K.) em ecossistemas de pastagens degradadas e de

floresta primária. Tese de Doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas. 180 pp.

Kerbaudy, G. B. 2004. *Fisiologia Vegetal*. Editora Guanabara. Rio de Janeiro.

Köppen, W. 1948. *Climatologia: um estúdio de los climas de la tierra*. Fondo de Cultura Econômica, México.

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*, 591-603.

Lima, M. C.; Serpa, R.; Galho, V. M.; Moraes, P. O.; Corrêa, M. F.; Durigon, M.; Carvalho, D.; Schneider, L.; Mariot, M. P.; Amarante, L. 2008. *Efeitos de níveis de sombreamento e concentrações de nitrogênio sobre o teor de clorofila em Achillea millefolium L.* XVII Congresso de Iniciação Científica e X Encontro de Pós-Graduação, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, Rio Grande do Sul.

Lopes, A. S.; Silva, M. C.; Guilherme, L. R. G. 1991. *Boletim Técnico nº 1: Acidez do solo e calagem*. Associação Nacional para Difusão de Adubos, São Paulo. 17 pp.

Lopes, C. F.; Tamanini, C. R.; Monte Serrat, B.; Lima, M. R. 2002. *Acidez do solo e calagem*. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Projeto de Extensão Universitária Solo Planta. 50 pp.

Loustau, D.; Hungate, B.; Drake, B. G. 2001. Water, nitrogen, rising atmospheric CO₂ and terrestrial productivity. In: Roy, J.; Saugier, B.; Mooney, H. A. (Eds.). *Terrestrial Global Productivity*. p.123-167.

Macedo, Y. A.; Haridasan, M. 2007. *Variações na área específica foliar e concentração de nutrientes em espécies lenhosas da camada rasteira do cerrado*. Monografia. Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal. 18 pp.

Magalhães, H. P. 2001. *Efeito da adubação e inoculação com bactérias solubilizadoras de fosfato na produção de mudas de andiroba (Carapa guianensis Aubl.) e castanha-do-brasil (Bertholletia excelsa H.B.K.) num latossolo da Amazônia*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas, 93pp.

Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. New York: Academic Press, 889 pp.

Medri, M. E.; Lieras, E. 1979. Ecofisiologia de plantas da Amazônia: anatomia foliar e Ecofisiologia de *Bertholletia excelsa* Humb. & Bompl. (castanha-do-pará) - Lecythidaceae. *Acta Amazonica*, 9(1): 15-23.

Mendes, M. M.; Gazarini, L. C.; Rodrigues, M. L. 2001. Acclimation of *Myrtus communis* to contrasting Mediterranean light environments - effects on structure and chemical composition of foliage and plant water relations. *Environmental and Experimental Botany*, 45: 165-178.

Miranda, L. P.; Vitória, A. P.; Funch, L. S. 2011. Leaf phenology and water potencial of five arboreal species in gallery and montane forests in the Chapada Diamantina; Bahia; Brazil. *Environmental and Experimental Botany*, 70: 143-150.

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*. EMBRAPA, Brasília, p. 172-223.

Morais, R. R. 2003. *Ecofisiologia de espécies arbóreas crescidas sob condições de plantios na Amazônia Central*. Tese de Doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia. Manaus, Amazonas. 158 pp.

Morais, R. R.; Gonçalves, J. F. C.; Santos Júnior, U. M.; Dünisch, O.; Santos, A. L. W. 2007. Chloroplastid pigment contents and chlorophyll *a* fluorescence in Amazonian tropical three species. *Revista Árvore*, 31(5): 959-966.

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

Myers, G.; Newton, A. C.; Melgarejo, O. 2000. The influence of canopy gap size on natural regeneration of Brazil nut (*Bertholletia excelsa*) in Bolivia. *Forest Ecology and Management*, 127(3): 119-128.

Nelson, N.; Yocum, C. F. 2006. Structure and Function of Photosystems I and II. *Annual Review of Plant Biology*, 57: 521-565.

Nery, F. C.; Oliveira, H. M.; Alvarenga, A. A.; Dousseau, S.; Castro, E. M.; Campos, A. C. A. L. 2011. Initial development and gas exchange of *Talisia subalbans* (Mart.) Radlk. under different shading conditions. *Revista Árvore*, 35(1): 61-67.

Nicoloso, F. T.; Fortunato, P. R.; Fogaça, M. A. F.; Zanchetti, F. 2008. Calagem e adubação NPKS: (I) Efeito no crescimento de mudas de grábia cultivadas em horizonte A e B de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. *Ciência Rural*. 38(6): 1596-1603.

Oliveira, M. V. T. 2000. Artificial regeneration in gaps and skidding trails after mechanized forest exploitation in Acre, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 127(3): 67-76.

Oliveira, P. C.; Carvalho, C. J. R. 2008. Interações biofísicas em espécies arbóreas potencialmente acumuladoras de fósforo: diversidade de irradiância e de comportamento hídrico. *Acta Amazonica*, 38(3): 445-452.

Paiva, N.; Gomes, M. 2000. *Viveiros florestais (cadernos didáticos)*. 2. Ed. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais, 69pp.

Patel, S. K.; Rhoads, F. M.; Hanlon, E. A.; Barnett, R. D. 1993. Potassium and magnesium uptake by wheat and soybean roots as influenced by fertilizer rate. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 24(13-14): 1543-1556.

Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez, V. H. (Eds.). 1999. *Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais: Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais - 5ª Aproximação*. Viçosa, Minas Gerais.

Roza, F. A. 2010. *Alterações morfofisiológicas e eficiência de uso da água em plantas de Jatropha curcas L. submetidas à deficiência hídrica*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Santa Cruz. Ilhéus, Bahia, 65 pp.

Salomão, R. P. 1991. Estrutura e densidade de *Bertholletia excelsa* H. e B. ('Castanheira') nas regiões de Carajás e Marabá, Estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, série Botânica*, 7: 47-68.

Santin, D.; Benedetti, E. L.; Brondani, G. E.; Reissmann, C. B.; Roveda, L. F.; Wendling, I. 2007. Calagem no crescimento de mudas de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil.). Congresso Brasileiro de Ciências do Solo, Gramado, Rio Grande do Sul.

Santos Filho, B. G.; Pantoja, M. J. R.; Pinheiro, H. A.; Batista, T. F. C. 2006. Correlação entre o teor de clorofilas e N total em espécies florestais introduzidas nas jazidas da BOGPM, Urucu, Am. (http://projetos.inpa.gov.br/ctpetro/workshop_site/Resumos_PT2/pdf/correlacoes_benedito_revisado.pdf). Acesso: 21/02/2012.

Santos Júnior, U. M.; Gonçalves, J. F. C.; Feldpausch, T. R. 2006. Growth, leaf nutrient concentration and photosynthetic nutrient use efficiency in tropical tree species planted in degraded areas in Central Amazonia. *Forest Ecology and Management*, 226: 299-309.

Santos, R. A.; Tucci, C. A. F.; Hara, F. A. S.; Silva, W. G. 2008. Adubação fosfatada para produção de mudas de mogno (*Swietenia macrophylla* King). *Acta Amazonica*, 38(3): 453-458.

Scalon, S. P. Q.; Mussury, R. M.; Rigoni, M. R.; Scalon Filho, H. 2003. Crescimento inicial de mudas de *Bombacopsis glabra* (Pasq.) A. Robins sob condição de sombreamento. *Revista Árvore*, 27(6): 753-758.

Scholander, P. F.; Hammel, H. T.; Bradstreet, E. D.; Hemmingsen, E. A. 1965. Sap pressure on vacuolar plants. *Science*, 148:39-46.

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(3): 273-293.

Sena, J. S.; Tucci, C. A. F.; Lima, H. N.; Hara, F. A. S. 2010. Efeito da calagem e da correção dos teores de Ca e Mg do solo sobre o crescimento de mudas de angelim-pedra (*Dinizia excelsa* Ducke). *Acta Amazonica*, 40(2): 309-318.

Silva, C. E. M. 2005. *Respostas nutricionais e características fotossintéticas de espécies pioneiras submetidas a diferentes tratamentos de adubação em pastagens abandonadas na Amazônia Central*. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas. 91 pp.

Silva, C. E. M.; Gonçalves, J. F. C.; Feldpausch, T. R.; Luizão, F. J.; Morais, R. R.; Ribeiro, G. O. 2006. Eficiência no uso dos nutrientes por espécies pioneiras crescidas em pastagens degradadas na Amazônia central. *Acta Amazonica*, 36(4): 503-512.

Silva, D. A. 2001. *Comparação de características foliares de espécies lenhosas entre cerrado denso, cerrado sensu stricto e campo sujo na reserva ecológica do IBGE, Brasília (DF)*. Dissertação de Mestrado. Universidade de Brasília, Brasília, Distrito Federal. 72 pp.

Silva, W. G.; Tucci, C. A. F.; Hara, F. A. S.; Santos, R. A. C. 2007. Efeito de micronutrientes sobre o crescimento de mudas de mogno (*Swietenia macrophylla* King) em Latossolo amarelo. *Acta Amazonica*, 37(3): 371-376.

Souza, M. A. S. M. 2006. *Resposta de mudas de espécies florestais, acariquara (Minuartia guianensis Aubl.) e mogno (Swietenia macrophylla Beth.) a diferentes formas de adubação*. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, Amazonas, 161pp.

Souza, C. A. S.; Tucci, C. A. F.; Silva, J. F.; Ribeiro, W. O. 2010. Exigências nutricionais e crescimento de plantas de mogno (*Swietenia macrophylla* King.). *Acta Amazonica*, 40(3): 515-522.

StatSoft Inc. 2004. Statistica (data analysis software system), version 6.1.

Tonini, H.; Arco-Verde, M. F.; Schwengber, D.; Mourão Junior, M. 2006. Avaliação de espécies florestais em área de mata no estado de Roraima. *Cerne*, 12(1): 8-18.

Tonini, H.; Oliveira Junior, M. M. C.; Schwengber, D. 2008. Crescimento de espécies nativas da Amazônia submetidas ao plantio no estado de Roraima. *Ciência Florestal*, 18(2): 151-158.

Tucci, C. A. F.; Santos, J. Z. L.; Silva Junior, C. H.; Souza, P. A.; Batista, I. M. P.; Venturin, N. 2011. Desenvolvimento de mudas de *Swietenia macrophylla* em resposta a nitrogênio, fósforo e potássio. *Floresta*, 41(3): 471-490.

Turner, N. C. 1981. Techniques and experimental approaches for the measurement of plant water status. *Plant and soil*, 58: 339-366.

Venturin, N.; Nogueira, F. D.; Coqueiro, G. R. 1995. Efeito do fosfato de Araxá, calcário e gesso em mudas de seringueira (*Hevea* sp.). *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 30(2): 187-193.

Vitti, G. C.; Ferreira, A. C. 1997. Síntese de análises químicas em tecido vegetal. ESALQ - Departamento de Ciência do Solo.

Witt, H. H. 1997. Root growth of trees as influenced by physical and chemical soilfactors. *Acta Horticulturae*, 450: 205-214.

Zuidema, P. A. 2003. *Demografía y manejo del árbol de castanha (Bertholletia excelsa)*. PROMAB (Serie Científica 6), Riberalta, Bolivia.

ANEXOS

Croqui do experimento.

