

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais – CFT

**CRESCIMENTO, ESTADO NUTRICIONAL E CARACTERÍSTICAS
FOTOSSINTÉTICAS DE *Bertholletia excelsa* SOB TRATAMENTOS DE
ADUBAÇÃO EM ÁREA DEGRADADA NA AMAZÔNIA CENTRAL**

MARCIEL JOSÉ FERREIRA

Manaus, Amazonas

2009

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA – INPA
Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais - CFT

**CRESCIMENTO, ESTADO NUTRICIONAL E CARACTERÍSTICAS
FOTOSSINTÉTICAS DE *Bertholletia excelsa* SOB TRATAMENTOS DE
ADUBAÇÃO EM ÁREA DEGRADADA NA AMAZÔNIA CENTRAL**

MARCIEL JOSÉ FERREIRA

Orientador: Dr. João Baptista Silva Ferraz

Co-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, área de concentração: Silvicultura Tropical.

Manaus, Amazonas

2009

F383 Ferreira, Marciel José
Crescimento, estado nutricional e características fotossintéticas de
Bertholletia excelsa sob tratamentos de adubação em área
degradada na Amazônia central / Marciel José Ferreira .--- Manaus : [s.n.], 2009.
xv, 52 f. : il.

Dissertação (mestrado)-- INPA/UFAM, Manaus, 2009
Orientador : João Baptista Silva Ferraz
Co-orientador : José Francisco de Carvalho Gonçalves
Área de concentração : Silvicultura Tropical

1. Fotossíntese. 2. Fertilidade do solo. 3. Restauração florestal. 4. Nutrição
Florestal. 5. Castanheira-da-Amazônia. I. Título.

CDD 19. ed. 634.575

Sinopse:

As respostas fisiológicas de plantas jovens de *Bertholletia excelsa* foram estudadas sob diferentes tipos de adubação para restauração de área degradada na Amazônia central. Aspectos de crescimento das plantas, trocas gasosas, estado nutricional e desempenho fotossintético foram analisados sob plantio.

Palavras-chave:

Fotossíntese, fertilidade do solo, restauração florestal, nutrição florestal, castanheira-da-Amazônia

AGRADECIMENTOS

Ao INPA e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências de Florestas Tropicais pela oportunidade;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - CNPq por financiar parte do projeto de pesquisa e pela bolsa de mestrado concedida;

Aos meus orientadores Dr. João Ferraz e Dr. José Francisco, pela orientação, confiança, respeito, amizade, oportunidade e contribuição em minha carreira profissional;

A todos os professores do Programa de Ciências de Florestas Tropicais pelos ensinamentos de ciências na maior floresta tropical do planeta;

Ao 1º BIS-Amv (CMA – Manaus) pela concessão da área de estudo e apoio durante a realização da pesquisa de campo;

À Agropecuária Aruanã S/A por ter cedido as mudas de castanheira-da-Amazônia para este estudo.

Aos meus queridos e amados pais, e ao meu irmão, pelo amor, carinho, compreensão, incentivo e total apoio na realização desta dissertação e por me ensinarem os verdadeiros princípios de convivência, honestidade e ética;

A toda equipe do LTSP (INPA): Suellen, Nonato, Kléber, Rosângela, Tânia, Tatiane, em especial a Patrícia, Giuliano, Jair, Alex, Carol, pela grande força na condução do experimento e coleta dos dados, e do Laboratório de Fisiologia e Bioquímica Vegetal: Larissa, Adamir, Ulysses, Adriana, Eneida, Glaudecy, João Victor, Emanuelle, Lissandra, Regiane, em especial ao Roni e ao Carlos, pela grande ajuda na coleta dos dados;

Aos colegas das turmas de mestrado e doutorado do CFT, e dos demais programas de pós-graduação do INPA, pela amizade, convivência, carinho e pelos momentos de confraternização;

À amada companheira, minha namorada Fernanda, por estar presente em todos os momentos, sempre com palavras de apoio e incentivo;

Aos amigos de república: André (Gaúcho), Carlos (Carlitos), Rubens (Rubão), Ricardo (Alemão), Rafael (Sussu), e aqueles que primeiro me receberam em Manaus: Sinomar Júnior, Daniel Berô e Carlos Leandro;

Enfim, a todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho e curso, eu deixo o meu *MUITO OBRIGADO!*

RESUMO

Atividades antrópicas sobre os ecossistemas florestais podem resultar na remoção da cobertura florestal, seguida pelo empobrecimento das propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Ao longo do tempo, essas áreas desprovidas de cobertura florestal podem transformar-se em extensas áreas degradadas. Para a revegetação dessas áreas com espécies florestais têm sido empregados diferentes métodos para recuperação das propriedades do solo. Além disso, têm sido utilizadas espécies capazes de se desenvolver sob condições adversas relativas à disponibilidade dos recursos primários (luz, água e nutrientes). Neste sentido, o objetivo deste trabalho foi investigar as respostas no crescimento, trocas gasosas, desempenho fotossintético e no estado nutricional de plantas jovens de *Bertholletia excelsa*, crescendo em plantio florestal submetido a diferentes tratamentos de adubação para restauração de área degradada no município de Manaus, AM (60° 01' 07" W e 03° 05' 08" S). Os tratamentos foram: T0 = controle (sem adubação), T1 = adubação verde (galhos e folhas) e T2 = adubação química (Ouromag[®]). Também foi analisada a influência dos diferentes tratamentos de adubação, sobre o restabelecimento da fertilidade do solo. Para tanto, foram determinadas, no solo, a granulometria e as concentrações de nutrientes. Nas plantas, foram medidos: o crescimento em altura e em diâmetro, os teores de nutrientes foliares, as trocas gasosas, os teores de pigmentos cloroplastídicos foliares, a fluorescência da clorofila *a*, o potencial hídrico foliar e a área foliar específica. Quanto à fertilidade do solo observou-se que nos tratamentos T1 e T2 os solos apresentaram maiores concentrações dos nutrientes C, N, K, Ca e Mg, quando comparados com o tratamento T0. Essas melhorias nas condições edáficas, resultaram em maiores teores de nutrientes foliares. No geral, os maiores teores foram obtidos no tratamento T1, com exceção dos nutrientes K, Ca e Fe, que foram superiores no tratamento T2. Para o N, o tratamento T1 exibiu valores 41 e 37% maiores que os tratamentos T0 e T2, respectivamente. As taxas de fotossíntese líquida variaram entre 4,8 e 13,2 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, com valores do tratamento T1 177 e 65% maiores que os tratamentos T0 e T2, respectivamente. Com relação à eficiência no uso de nutrientes foliares, o tratamento T1 apresentou valores 135, 57, 57, 255, 147, 363, 100 e 76% maiores que o tratamento T0 para os elementos N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn e Mn, respectivamente. Os valores das taxas de crescimento absoluto em altura e diâmetro não exibiram diferenças entre os tratamentos T0 e T2 durante o período de estudo. Por outro lado, o tratamento T1 exibiu 10,2 cm mês^{-1} e 2,4

mm mês⁻¹ em altura e diâmetro, respectivamente, os quais foram cerca de 12 vezes maiores quando comparados com o tratamento T0. Na avaliação da eficiência quântica máxima do PSII (F_v/F_m) os indivíduos de *B. excelsa* do tratamento T1 (0,75) não apresentaram diferenças quando comparados aos indivíduos do tratamento T2 (0,68). No entanto, entre T1 e T0 (0,64) exibiram menores valores de estresse quando analisada a razão F_v/F_m . Em relação aos teores dos pigmentos cloroplastídicos analisados, os teores de clorofila *b* (chl *b*) e carotenóides (c_{x+c}) não exibiram diferenças entre os tratamentos T1 (chl *b* = 2,3 $\mu\text{mol g}^{-1}$ e c_{x+c} = 0,8 $\mu\text{mol g}^{-1}$) e T0 (chl *b* = 1,9 $\mu\text{mol g}^{-1}$ e c_{x+c} = 0,6 $\mu\text{mol g}^{-1}$). Os valores do potencial hídrico foliar variaram ao longo do dia, sendo que o tratamento T2 exibiu o maior valor ao meio-dia ($\Psi_{\text{md}} = -2,42$ MPa) seguido pelos tratamentos T0 (-2,64 MPa) e T1 (-2,79 MPa). Os valores de área foliar específica (AFE) variaram entre 78,0 e 91,0 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$, sendo que os tratamentos T0 e T2 exibiram valores 16 e 15% mais elevados, respectivamente, quando comparados com o tratamento T1. A aplicação dos tratamentos de adubação, especialmente o tratamento T1, resultou em aumentos consideráveis nas taxas fotossintéticas, os quais compensaram as maiores taxas de transpiração, refletindo no aumento da eficiência no uso da água (EUA). Estes valores foram 66 e 38% mais elevados nos tratamentos T1 e T2, respectivamente, quando comparados ao tratamento T0. Portanto, conclui-se que há necessidade de recuperar *a priori* a fertilidade do solo em áreas degradadas para implantação de plantios florestais. Salienta-se também a importância de pesquisas relacionadas às respostas fisiológicas, nutricionais e de crescimento da planta, aos diferentes tratamentos silviculturais, como suporte ao desenvolvimento de programas de reflorestamento para a restauração de áreas degradadas na Amazônia.

ABSTRACT

Human activities on forest ecosystems can result in the removal of forest cover followed by impoverishment of the soil physical, chemical and biological properties. Throughout time, these areas without forest coverage can turn in to degraded areas. In face of this, for the revegetation of these areas with forest species different methods have been applied for the recovery of the soil properties. Moreover, have been used species able to develop in under limiting environmental conditions regarding the availability of primary resources (light, water and nutrients). In this sense, this research aims to investigate the responses of growth, gas exchange, photosynthetic performance and nutritional status of young plants of *Bertholletia excelsa*, growing in a forest plantation under different fertilization treatments, established to restore a degraded area in the county of Manaus, AM (60° 01' 07" W and 03° 05' 08" S). The treatments were: T0 = control (without fertilization), T1 = fertilization with green fertilizer (branches and leaves) and T2 = chemical fertilization (Ouromag[®]). It was also analyzed the influence of the different fertilizer treatments on the recovery of the soil fertility. For this, soil particle sizes and the concentrations of nutrients were also analyzed. In plants of *B. excelsa* were evaluated the growth in height and diameter, as also the leaf nutrient contents, gas exchange, leaf chloroplastid pigment contents, chlorophyll *a* fluorescence, leaf water potential, and specific leaf area. For the soil fertility, it was observed that in the treatments T1 and T2 the soils presented higher concentrations of the nutrients C, N, K, Ca and Mg, when compared to T0. These changes in the soil fertility provided also higher nutrient contents of the leaves. Most of the foliar nutrients contents were higher in treatment T1, excepted for K, Ca and Mg, which presented higher values in T2. The N content in the leaves of treatment T1 presented values 41 and 37% higher than in treatments T0 and T2, respectively. The net photosynthetic rates varied between 4.8 and 13.2 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, with values of treatment T1 177 and 65% higher than treatments T0 and T2, respectively. For the photosynthetic nutrient use efficiency, the treatment T1 presented values 135, 57, 57, 255, 147, 363, 100 and 76% higher than T0 for the nutrients N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn and Mn, respectively. In the period of this study, the variables height and diameter did not presented absolute growth rates differences between treatments T0 and T2. On the other side, treatment T1 presented 10.2 cm mês^{-1} and 2.4 mm mês^{-1} in height and diameter, respectively. This values were 12 times higher than in treatment T0. In the evaluation of the maximum photochemical efficiency

(F_v/F_m) the plants of *B. excelsa* in treatment T1 (0.75) did not presented differences when compared with the individuals of treatment T2 (0.68). However, between T1 and T0 (0.64) they presented lower values of stress when the ratio F_v/F_m was analyzed. For the chloroplastid pigment contents, the values of chlorophyll *b* (chl *b*) and carotenoids (c_{x+c}) did not presented differences between treatments T1 (chl *b* = 2.3 $\mu\text{mol g}^{-1}$ and c_{x+c} = 0.8 $\mu\text{mol g}^{-1}$) and T0 (chl *b* = 1.9 $\mu\text{mol g}^{-1}$ and c_{x+c} = 0.6 $\mu\text{mol g}^{-1}$). The values for the leaf water potential varied during the day, with treatment T2 presenting higher values at midday (Ψ_{md} = -2.42 MPa) followed by the treatments T0 (-2.64 MPa) and T1 (-2.79 MPa). The specific leaf area (SLA) presented values between 78.0 and 91.0 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$, treatments T0 and T2 presented values 16 and 15% higher, respectively, when compared with treatment T1. The application of fertilizer treatments, especially T1, promoted high increases of net photosynthetic rates, which compensate the higher transpiration rates, reflecting an increase of the water use efficiency (WUE). These values were 66 and 38% higher in treatments T1 and T2, respectively, as in treatment T0. Therefore, it is ended that is important reestablishing *a priori* soil fertility in degraded areas destined for reforestation, as also the importance of physiological, nutritional and growth research as a basis for the development of reforestation programs aiming the restoration of degraded areas in Amazonia.

LISTA DE TABELAS

Capítulo I: Crescimento, interface nutricional solo-planta e eficiência no uso de nutrientes por plantas jovens de *Bertholletia excelsa* submetidas a diferentes adubações em área degradada

Tabela 1. Teores de areia total, argila e silte no solo do plantio de *B. excelsa* sobre área degradada após as aplicações dos tratamentos de adubação.....27

Tabela 2. Fotossíntese líquida, teores foliares de nutrientes e eficiência no uso de nutrientes em plantas de *Bertholletia excelsa* em área de solo degradado após as aplicações dos tratamentos de adubação. A = Fotossíntese líquida, P(nutriente)UE = Eficiência no uso de nutrientes.....31

Capítulo II: Fotossíntese, teores de pigmentos cloroplastídicos e fluorescência da clorofila *a* em plantas jovens de *Bertholletia excelsa* submetidas a diferentes tipos de adubação

Tabela 1. Trocas gasosas e características fotossintéticas em plantas de *Bertholletia excelsa* em área de solo degradado submetidas a diferentes adubações. Fotossíntese líquida (A), respiração no escuro (R_d), condutância estomática (g_s), transpiração (E) e eficiência no uso da água (EUA). Médias de dez plantas (\pm desvios padrão); valores médios seguidos pelas mesmas letras entre os tratamentos não diferem a $p \leq 0,05$ pelo teste de Tukey.....41

Tabela 2. Teores médios de macro e micronutrientes do material vegetal (galhos + folhas) utilizado no tratamento T1 (adubação verde). Médias de quatro amostras (\pm desvios padrão).....43

Tabela 3. Variáveis de fluorescência da clorofila *a* em plantas de *Bertholletia excelsa* em área de solo degradado submetidas a diferentes adubações. Fluorescência inicial (F_0), fluorescência máxima (F_m), fluorescência variável ($F_v = F_m - F_0$), eficiência fotoquímica do PSII (F_v / F_m) e índice de desempenho (P.I.). Médias de dez plantas (\pm desvios padrão); valores médios seguidos pelas

mesmas letras entre os tratamentos não diferem a $p \leq 0,05$ pelo teste de Tukey.....44

LISTA DE FIGURAS

Capítulo I: Crescimento, interface nutricional solo-planta e eficiência no uso de nutrientes por plantas jovens de *Bertholletia excelsa* submetidas a diferentes adubações em área degradada

- Figura 1.** Valores médios e desvios padrão das taxas de crescimento absoluto (TCA) em diâmetro e altura das plantas de *B. excelsa* sob diferentes tratamentos de adubação durante o período analisado (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química, n = 20).....24
- Figura 2.** Potencial hidrogeniônico (pH_{H2O}) e concentrações de Al no solo do plantio de *B. excelsa* sobre área degradada após as aplicações dos tratamentos de adubação (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química). Os valores são médias e as linhas horizontais são desvios padrão (n=4).....25
- Figura 3.** Concentrações de C e N no solo do plantio de *B. excelsa* sobre área degradada após as aplicações dos tratamentos de adubação (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química). Os valores são médias e as linhas horizontais são desvios padrão (n=4).....26
- Figura 4.** Concentrações de P e K no solo do plantio de *B. excelsa* sobre área degradada após as aplicações dos tratamentos de adubação (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química). Os valores são médias e as linhas horizontais são desvios padrão (n=4).....28
- Figura 5.** Concentrações de Ca e Mg no solo do plantio de *B. excelsa* sobre área degradada após as aplicações dos tratamentos de adubação (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química). Os valores são médias e as linhas horizontais são desvios padrão (n=4).....28
- Figura 6.** Concentrações de Fe, Mn e Zn no solo do plantio de *B. excelsa* sobre área degradada após as aplicações dos tratamentos de adubação (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química). Os valores são médias e as linhas horizontais são desvios padrão (n=4).....29

Capítulo II: Fotossíntese, teores de pigmentos cloroplastídicos e fluorescência da clorofila *a* em plantas jovens de *Bertholletia excelsa* submetidas a diferentes tipos de adubação

Figura 1. Box-plot dos teores de pigmentos cloroplastídicos na base de massa foliar, para os diferentes tratamentos de adubação (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química). Clorofila *a* (chl *a*); clorofila *b* (chl *b*); clorofila total (chl *a* + chl *b*); carotenóides (c_{x+c}), clorofila *a* / clorofila *b* (chl *a* / chl *b*) e clorofila total / carotenóides (chl total / c_{x+c}). Valores médios seguidos pela mesma letra entre os tratamentos não diferem a $p \leq 0,05$ pelo teste de Tukey. $n = 10$42

Capítulo III: Características foliares e *status* hídrico foliar em plantas jovens de *Bertholletia excelsa* crescendo sob área degradada e submetidas a diferentes tratamentos de adubação

Figura 1. Potenciais hídricos foliares na ante manhã (05:00 h), ao meio-dia (12:00 h) e ao entardecer (17:00 h) em plantas de *Bertholletia excelsa* em área de solo degradado após as aplicações dos tratamentos de adubação (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química) ($n = 10$).....48

Figura 2. Área foliar específica e trocas gasosas em plantas de *Bertholletia excelsa* em área de solo degradado submetidas a diferentes adubações (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química). AFE = Área foliar específica; *A* = fotossíntese líquida; g_s = condutância estomática; *E* = transpiração; EUA = eficiência no uso da água e EIUA = eficiência intrínseca no uso da água ($n = 10$).....50

Figura 3. Relação entre a taxa de assimilação de CO₂ (*A*) e (a) área foliar específica (AFE); (b) condutância estomática (g_s) para os indivíduos de *Bertholletia excelsa* em área degradada submetidos a diferentes tipos de adubação. T0 (▲) = Controle; T1 (●) = Adubação verde; T2 (○) = Adubação química ($n = 30$).....51

SUMÁRIO

RESUMO.....	vi
ABSTRACT.....	viii
LISTA DE TABELAS.....	x
LISTA DE FIGURAS.....	xii
INTRODUÇÃO GERAL.....	16
OBJETIVO GERAL.....	18
OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18

Capítulo I: Crescimento, interface nutricional solo-planta e eficiência no uso de nutrientes por plantas jovens de *Bertholletia excelsa* submetidas a diferentes adubações em área degradada.....19

Introdução.....	19
Materiais e métodos.....	20
Resultados.....	24
Discussão.....	31
Conclusão.....	36

Capítulo II: Fotossíntese, teores de pigmentos cloroplastídicos e fluorescência da clorofila *a* em plantas jovens de *Bertholletia excelsa* submetidas a diferentes tipos de adubação.....37

Introdução.....	37
Materiais e métodos.....	39
Resultados e discussão.....	40

Capítulo III: Características foliares e *status* hídrico foliar em plantas jovens de *Bertholletia excelsa* crescendo sob área degradada e submetidas a diferentes tratamentos de adubação.....45

Introdução.....	45
Material e métodos.....	46

Resultados e discussão.....	48
CONCLUSÃO GERAL.....	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

INTRODUÇÃO GERAL

A rápida conversão da floresta a outras formas de uso da terra em regiões tropicais, em particular, na Amazônia, tem sido responsável, dentre outras consequências, por modificações na dinâmica de nutrientes no solo, sendo que com a remoção da cobertura florestal, o solo se torna desprotegido, e conseqüentemente pode sofrer alterações nas suas propriedades físico-químicas e biológicas (McGrath et al, 2001; Hartemink et al, 2008). Em razão da baixa fertilidade natural da grande maioria dos solos tropicais e reduzida capacidade de suporte, o impacto pode ser ainda mais acentuado, podendo resultar na formação de extensas áreas degradadas (Eyre, 1968; Jordan, 1985; Chauvel, 1991; Grimaldi et al., 1992).

Por sua vez, em ambientes degradados as plantas estão submetidas a diferentes tipos de estresse (reduzida disponibilidade de nutrientes e água no solo, altos níveis de irradiância) (Nussbaum et al, 1995; Parrotta et al, 1997; Gonçalves & Santos Júnior, 2005; Fang et al, 2008). A limitação na disponibilidade de nutrientes pode comprometer o desenvolvimento das espécies, uma vez que a presença de elementos como o N, P, K desempenham funções vitais como às relacionadas aos processos de assimilação de carbono e manutenção do *status* hídrico das plantas (Arora et al, 2001; Graciano et al, 2006; Chaudhary et al, 2008). A presença do N, especialmente, nas moléculas de clorofila e da proteína rubisco é essencial para o pleno funcionamento do aparato fotossintético (Evans, 1989; Makoto & Koike, 2007); o P é constituinte das moléculas de ATP que representa a principal forma de armazenamento de energia necessária ao metabolismo das plantas (Raghothama, 1999; Vance et al, 2003); enquanto o K está envolvido nos processos de osmoregulação celular (Ford & Wilson, 1981; Ashraf et al, 2001).

Embora haja muitos estudos que dizem respeito ao papel dos nutrientes sobre os mecanismos fisiológicos das espécies vegetais, pouco se conhece sobre as respostas ecofisiológicas de espécies nativas da Amazônia em plantios para restauração de áreas degradadas (Santos Júnior et al, 2006). É também pouco entendida a contribuição proporcionada por diferentes fontes de adubação com relação à mitigação da degradação dos atributos físicos e químicos do solo e seus reflexos nos mecanismos fisiológicos e de crescimento das espécies utilizadas para o reflorestamento em áreas alteradas. Adicionalmente, percebe-se na literatura poucos estudos relacionados à fisiologia da espécie *Bertholletia excelsa* H. B., o que causa estranheza pelo fato de

tratar-se de uma das espécies de maior valor econômico da região amazônica e que tem apresentado altas taxas de crescimento quando utilizada em plantios florestais.

Neste sentido, o objetivo desta pesquisa foi investigar os efeitos proporcionados pela aplicação de diferentes fontes de adubação sobre a capacidade de recuperação das propriedades físicas e químicas do solo e suas consequências para os mecanismos fisiológicos de tolerância ao estresse (nutricional, lumínico e hídrico) em plantas jovens de *Bertholletia excelsa* crescendo sobre área degradada.

Para tanto, esta dissertação foi dividida em três capítulos. No capítulo I foram investigadas as contribuições dos diferentes tratamentos de adubação sobre a recuperação da fertilidade do solo e seu reflexo no crescimento, estado nutricional e eficiência no uso de nutrientes das plantas de *Bertholletia excelsa*. No capítulo II foram abordados a quantificação dos teores de pigmentos cloroplastídicos, o desempenho fotossintético e o estudo da fluorescência da clorofila *a* de *B. excelsa* sob as distintas adubações. Por último, no capítulo III foram analisadas alterações morfológicas (área foliar específica), o *status* hídrico e parâmetros de eficiência no uso da água de *B. excelsa* nas diferentes condições de adubação.

A expectativa é que as informações obtidas possam contribuir sobremaneira para aperfeiçoar os plantios de restauração e/ou de produção estabelecidos sobre áreas degradadas na Amazônia Brasileira.

OBJETIVO GERAL: O objetivo desta pesquisa foi investigar o crescimento, o estado nutricional e as respostas ecofisiológicas de plantas jovens da espécie *Bertholletia excelsa* em plantio florestal submetido a diferentes tratamentos de adubação para restauração de áreas degradadas e, também, verificar a capacidade dos diferentes tratamentos de adubação com relação à recuperação da fertilidade do solo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Determinar as características físicas e químicas do solo sob plantio de *Bertholletia excelsa* submetido a diferentes tipos de adubação (Capítulo I);
- 2) Determinar o crescimento em altura e diâmetro de plantas jovens de *Bertholletia excelsa* sob diferentes tratamentos de adubação (Capítulo I);
- 3) Determinar os teores de nutrientes foliares e a eficiência no uso de nutrientes em plantas jovens de *Bertholletia excelsa* crescendo sobre solo degradado e submetidas a diferentes tratamentos de adubação (Capítulo I);
- 4) Determinar as trocas gasosas (fotossíntese líquida, respiração no escuro, condutância estomática e transpiração) em plantas jovens de *Bertholletia excelsa* crescendo sob diferentes tipos de adubação (Capítulo II);
- 5) Determinar os teores de pigmentos cloroplastídicos (clorofilas *a* e *b*, carotenóides) em plantas jovens de *Bertholletia excelsa* crescendo sob diferentes tipos de adubação (Capítulo II);
- 6) Analisar a fluorescência da clorofila *a* em plantas jovens de *Bertholletia excelsa*, crescendo sobre solo degradado (Capítulo II);
- 7) Determinar o potencial hídrico, a eficiência no uso da água, a eficiência intrínseca no uso da água e a área foliar específica em plantas jovens de *Bertholletia excelsa* submetidas a diferentes tipos de adubação em área degradada (Capítulo III).

Capítulo I. Crescimento, interface nutricional solo-planta e eficiência no uso de nutrientes por plantas jovens de *Bertholletia excelsa* submetidas a diferentes adubações em área degradada¹

Introdução

Dados recentes mostram que na Amazônia apenas no período entre agosto de 2007 e julho de 2008 foram desmatados 11968 km² de floresta, equivalentes a mais do que a área de dois campos de futebol destruídos a cada minuto (INPE 2008).

Com a remoção da cobertura florestal, o solo se torna desprotegido e, conseqüentemente, pode sofrer alterações nas suas propriedades físicas, químicas e biológicas. Em razão da baixa fertilidade natural da grande maioria dos solos tropicais e reduzida capacidade suporte, o impacto pode ser ainda mais acentuado, resultando na formação de extensas áreas degradadas (Eyre 1968; Jordan 1985; Chauvel 1991; Grimaldi et al. 1992).

A reocupação destas áreas por meio do reflorestamento torna-se extremamente difícil devido ao grau de deterioração da qualidade edáfica resultante da intervenção antropogênica. O fato é que, a eliminação da cobertura florestal pode resultar rápida redução dos estoques de matéria orgânica e nitrogênio do solo, além da potencial conversão do cálcio e potássio a formas solúveis, podendo provocar perdas consideráveis destes nutrientes (Jordan 1985).

Na Amazônia, em algumas destas áreas, onde o impacto causado não tenha sido tão severo, observa-se, quase sempre, ocupação vegetal devido à sucessão secundária emergente, porém dominada por gramíneas e herbáceas e, ainda, por espécies pioneiras como as dos gêneros *Vismia*, *Cecropia*, *Bellucia*, *Laetia*, adaptadas a baixa disponibilidade de nutrientes no solo (Nepstad et al. 1996; Mesquita et al. 2001; Monaco et al. 2003). Neste sentido, a fim de promover a restauração dessas áreas mediante utilização de espécies florestais de importância econômica torna-se necessário, primariamente, o restabelecimento das condições físicas, químicas e biológicas do solo, o que favorecerá o estabelecimento inicial dessas espécies.

Conjuntamente com o processo de recuperação dos atributos do solo é necessário usar espécies florestais capazes de se desenvolver frente às novas condições criadas. No que concerne diretamente às espécies, é muito desejável que as plantas

¹ Escrito conforme as normas da revista Plant and Soil

sejam aptas a produzir grande quantidade de biomassa, utilizando o mínimo de recursos, como água e nutrientes (Santos Júnior et al. 2006; Silva et al. 2006; Silva et al. 2008).

Blair (1993) definiu o termo “eficiência na utilização de nutrientes” como a capacidade de uma espécie de adquirir nutrientes necessários ao crescimento médio e/ou incorporá-los ou utilizá-los na produção de biomassa aérea e de raízes ou na formação de frutos, sementes e folhas. A utilização de espécies com maior eficiência na utilização de nutrientes poderá, dentre outras vantagens, reduzir os custos de adubação e as perdas de nutrientes ao considerar os ciclos biogeoquímicos. Características genéticas, morfológicas e fisiológicas, e a interação destas com fatores externos como umidade do solo, luz solar, temperatura, estão associadas com a maior ou menor eficiência na utilização dos nutrientes. A adoção de práticas de manejo constitui a melhor alternativa externa para o aumento da eficiência no uso dos nutrientes pelas espécies (Baligar et al. 2001). Adicionalmente, uma das principais razões para o limitado sucesso nos estudos que envolvem a eficiência no uso de nutrientes, é que tanto o componente genético quanto fisiológico de respostas das plantas à adição de nutrientes são ainda pouco entendidos (Fageria et al. 2008).

Neste contexto, foi elaborada a hipótese de que o uso de diferentes tipos de adubação em plantio florestal de *Bertholletia excelsa* crescendo em área degradada, ao proporcionar alterações nas propriedades físicas e químicas do solo, implicará em maiores taxas de crescimento como resultado da maior assimilação de carbono e eficiência no uso de nutrientes desta espécie. Para tanto, este trabalho teve como objetivo investigar a relação nutriente solo-plantas, o crescimento e as variáveis de trocas gasosas em plantas jovens de *B. excelsa* submetidas a diferentes tratamentos de adubação.

Materiais e métodos

Área de estudo

O experimento foi implantado numa área degradada no município de Manaus, AM (60° 01' 07" W e 03° 05' 08" S), que, no início dos anos 80, foi desmatada, retirando-se a vegetação original formada por “Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme” (Veloso et al. 1991). Além disso, foi removida uma camada de solo até a profundidade de aproximadamente 3 m. A superfície foi então terraplanada e

compactada para o início de construções militares. Posteriormente, com a não execução das obras, a área foi abandonada. O clima na área é classificado como “Amw” (Köppen 1948), com temperatura e pluviosidade média anual de 26,7°C e 2.186 mm, respectivamente (Fish 1990).

Seleção da espécie e plantio

A espécie selecionada para o plantio foi *Bertholletia excelsa* H. B. que é uma espécie florestal de porte arbóreo pertencente à família Lecythidaceae (Mori 1992). Além de possuir amplo valor econômico, tem apresentado boas características de crescimento quando em plantios agroflorestais ou povoamentos homogêneos (Yared 1990; Tonini et al. 2005; Souza et al. 2008, Tonini et al. 2008).

Em março de 2004, o experimento com o objetivo de revegetar a área foi implantado. Para tanto, covas de tamanho 30 x 40 cm foram abertas manualmente, em espaçamento de 1 x 1 m.

Tratamentos de adubação

Em dezembro de 2007 o plantio foi submetido a diferentes tratamentos de adubação, sendo que: T0 = controle (não recebeu adubação), T1= recebeu adubação de cobertura com material vegetal (galhos + folhas) e T2 = cada planta recebeu adubação química com 150g de adubo mineral (Ouromag[®] 4% N, 14% P, 7% K, 11,5% Ca, 2,7% Mg, 10,4% S, 0,07% B, 0,59% Zn e 0,15% Cu) e 50g de calcário dolomítico incorporados em um raio de 30 cm da planta.

Medidas de crescimento

As taxas de crescimento absoluto (TCA) em altura e diâmetro a altura do coleto (DAC) foram obtidas entre os períodos de aplicação das adubações (novembro de 2007) e 240 dias após as adubações (agosto de 2008) em 20 plantas de cada tratamento (Bugbee 1996).

Granulometria e fertilidade do solo

As amostras de solo foram coletadas ao final do experimento entre as linhas de plantio, sendo quatro amostras para cada profundidade de 0-2,5 cm, 2,5-7,5 cm, 7,5-20 cm e 20-40 cm. Cada repetição representou uma amostra composta de três sub-amostras para cada profundidade, totalizando quatro repetições por tratamento em cada profundidade.

A análise granulométrica foi realizada a partir do método de dispersão total, o qual se baseia na velocidade de queda das partículas que compõem o solo, onde o teor de argila foi determinado a partir de uma alíquota de 20 mL da suspensão, a areia total foi separada por tamisação (peneiras) e os teores de silte por diferença em relação ao valor de 100% da amostra original (EMBRAPA 1997).

As concentrações dos macronutrientes (C, N, P, K, Ca e Mg), dos micronutrientes (Fe, Mn e Zn) 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), sendo o Ca e Mg determinados por espectrofotometria de absorção atômica e o Al pelo método de titulação com NaOH. Os macronutrientes (P e K) e micronutrientes (Fe, Zn e Mn) foram extraídos com solução Mehlich 1 (HCl 0,05 M + H_2SO_4 0,0125 M), sendo o P determinado pelo método do azul de molibdato e por espectrofotometria ($\lambda = 660$ nm), K e micronutrientes foram determinados 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 h de repouso da solução (EMBRAPA 1999).

Determinação das trocas gasosas

As medidas de trocas gasosas foram realizadas no período entre 9:00 e 12:00 horas, em dez indivíduos por tratamento 60 dias após as adubações. Em cada planta foi selecionada uma folha completamente expandida, em bom estado fitossanitário, exposta a pleno sol. Neste capítulo são apresentados apenas os dados de fotossíntese líquida (A) com o objetivo de calcular a eficiência no uso de nutrientes pelas plantas (ver tópico Teores foliares de nutrientes e eficiência no uso de nutrientes). As taxas de fotossíntese líquida 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). Os dados pontuais foram obtidos à densidade de fluxo de fótons (PPFD) de 0 e 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com a câmara foliar ajustada para concentração de CO_2 , temperatura e vapor de H_2O em torno de $380\pm 4 \mu\text{mol mol}^{-1}$, $31\pm 1^\circ\text{C}$ e $21\pm 1 \text{mmol mol}^{-1}$, respectivamente.

Teores foliares de nutrientes e eficiência no uso de nutrientes

Os teores de macro e micronutrientes foram determinados nas mesmas folhas em que foram medidas as variáveis de trocas gasosas ao final do experimento após as aplicações dos tratamentos de adubação. As amostras foram secas em estufa a 65°C até massa constante. Para a determinação dos teores de nitrogênio, amostras contendo 0,1g de matéria seca foram submetidas a uma pré-digestão, durante uma noite, e posteriormente a uma digestão com duplo ácido ($\text{H}_2\text{O}_2 + \text{H}_2\text{SO}_4$), utilizando-se como catalisadores o sulfato de lítio e o selênio, a uma temperatura gradativa de até 350°C , segundo a metodologia descrita por Miyazawa et al. (1999). Posteriormente, o nitrogênio total foi determinado de acordo com o método de Kjeldahl, 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 conforme Vitti e Ferreira (1997). A partir do mesmo extrato nitro-perclórico foram retiradas alíquotas e os teores dos demais nutrientes (Ca, Mg, K, Fe, Zn e Mn) foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica (Perkin Elmer, 1100B).

A eficiência no uso de nutrientes [P(nutriente)UE] 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).

Desenho experimental e análises estatísticas

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), sendo amostradas dez plantas em cada um dos três tratamentos (controle, adubação verde e adubação química). Os dados das variáveis de crescimento, fotossíntese líquida,

teores de nutrientes foliares e eficiência no uso de nutrientes foram submetidos à análise de variância (ANOVA One-Way) por meio do software estatístico Statistica versão 6.0 para Windows (StatSoft Inc. 2003). Em seguida, foi aplicado o teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para comparação das médias dos tratamentos.

Resultados

Crescimento

Os valores de TCA em diâmetro e altura variaram entre 0,2 e 2,4 mm mês⁻¹ e 0,84 e 10,2 cm mês⁻¹, respectivamente, sendo que o tratamento T1 exibiu valores cerca de 12 vezes superiores em relação ao tratamento T0. Por outro lado, não foram observadas diferenças entre os tratamentos T0 e T2 (Fig. 1).

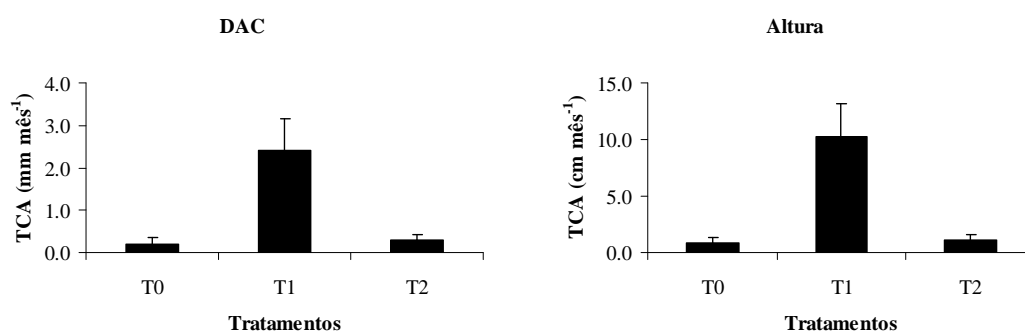


Fig. 1 Valores médios e desvios padrão das taxas de crescimento absoluto (TCA) em diâmetro e altura das plantas de *B. excelsa* sob diferentes tratamentos de adubação durante o período analisado (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química, n = 20).

Granulometria e fertilidade do solo

No que diz respeito à análise granulométrica verificou-se maiores teores de areia total em todos os tratamentos para todas as profundidades quando comparados aos teores de argila e silte. Os maiores teores de areia (0-2,5 cm = 771,8 g kg⁻¹), argila (2,5-7,5 cm = 283,5 g kg⁻¹) e silte (0-2,5 cm = 97,2 g kg⁻¹) foram encontrados nos tratamentos T1, T0 e T2, respectivamente (Tabela 1).

Os valores de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ na profundidade de 0-2,5 cm variaram entre 4,9 e 6,5, sendo que no tratamento T2 (adubação química) este valor foi 28 e 34% mais elevado quando comparado aos tratamentos T0 (controle) e T1 (adubação verde), respectivamente (Fig. 2). Na profundidade de 2,5-7,5 cm houve redução de 28% no valor de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ registrado no tratamento T2. Nas profundidades de 7,5-20 cm e 20-40 cm não foram observadas diferenças nos valores de $\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$ entre os três tratamentos. As concentrações de Al na profundidade de 0-2,5 cm foram 133% superior e 72% inferior nos tratamentos T1 ($0,4 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e T2 ($0,1 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), respectivamente, quando comparados ao tratamento T0. Até a profundidade de 20-40 cm houve uma redução de 28 e 81% nas concentrações de Al obtidas nos tratamentos T0 e T1, respectivamente. Por outro lado, não se observou diferenças nas concentrações deste elemento ao longo das profundidades amostradas no tratamento T2.

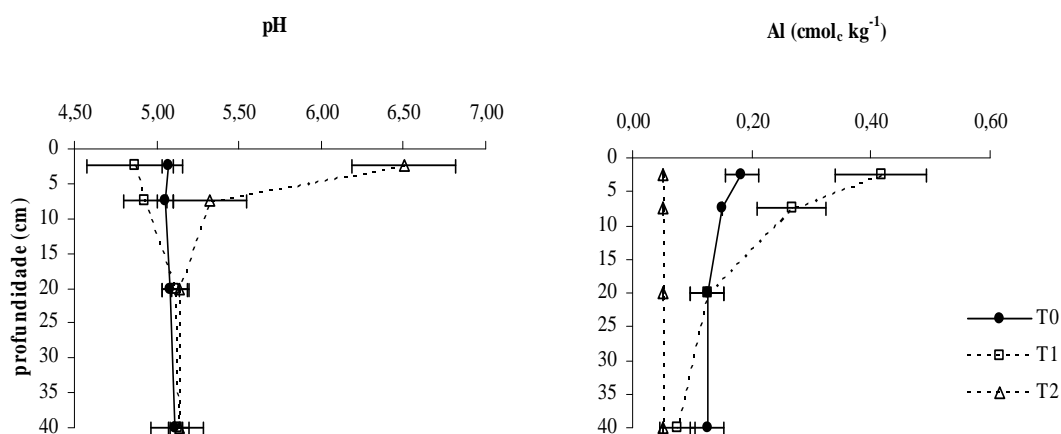


Fig. 2 Potencial hidrogeniônico ($\text{pH}_{\text{H}_2\text{O}}$) e concentrações de Al no solo do plantio de *B. excelsa* sobre área degradada após as aplicações dos tratamentos de adubação (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química). Os valores são médias e as linhas horizontais são desvios padrão ($n=4$)

As concentrações de C variaram de 5,7 a $23,4 \text{ g kg}^{-1}$ entre os tratamentos na profundidade de 0-2,5 cm, sendo que os tratamentos T1 e T2 apresentaram valores 307 e 21% maiores, respectivamente, quando comparados ao tratamento T0 (Fig. 3). Houve redução nas concentrações deste elemento em função da profundidade em todos os tratamentos, sendo que na profundidade de 20-40 cm o tratamento T1 exibiu $1,5 \text{ g kg}^{-1}$ de C, seguido pelos tratamentos T2 ($1,1 \text{ g kg}^{-1}$) e T0 ($0,6 \text{ g kg}^{-1}$). O teor de N total na profundidade de 0-2,5 cm no tratamento T1 ($0,8 \text{ g kg}^{-1}$) foi 147 e 133% maior que os

valores obtidos nos tratamentos T0 ($0,3 \text{ g kg}^{-1}$) e T2 ($0,4 \text{ g kg}^{-1}$), respectivamente (Fig. 3). Até a profundidade de 7,5-20 cm o tratamento T1 ainda apresentou, para este elemento, valor 71% superior a ambos os tratamentos T0 e T2.

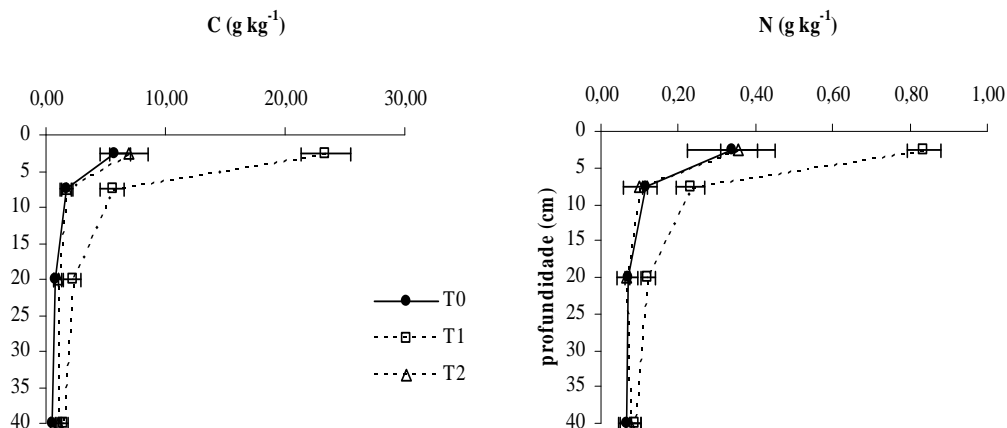


Fig. 3 Concentrações de C e N no solo do plantio de *B. excelsa* sobre área degradada após as aplicações dos tratamentos de adubação (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química). Os valores são médias e as linhas horizontais são desvios padrão (n=4)

As concentrações de P na profundidade de 2,5-7,5 cm variaram de 0,2 a 1,4 mg kg^{-1} , sendo que os tratamentos T0 e T2 apresentaram os menores e maiores valores, respectivamente (Fig. 4). Houve aumento de 185% nas concentrações deste elemento na profundidade de 20-40 cm em relação à profundidade de 2,5-7,5 cm no tratamento T2. Por outro lado, houve redução de 89 e 79% nos tratamentos T0 e T1, respectivamente, em relação à profundidade de 0-2,5 cm. As concentrações de K na profundidade de 0-2,5 cm foram 27 e 196% mais elevados nos tratamentos T1 ($24,3 \text{ mg kg}^{-1}$) e T2 ($56,7 \text{ mg kg}^{-1}$), respectivamente, quando comparados ao tratamento T0 ($19,2 \text{ mg kg}^{-1}$). Na profundidade de 20-40 cm o tratamento T2 ($13,0 \text{ mg kg}^{-1}$) ainda apresentou maiores valores seguido dos tratamentos T1 ($6,0 \text{ mg kg}^{-1}$) e T0 ($2,3 \text{ mg kg}^{-1}$).

Tabela 1 Teores de areia total, argila e silte no solo do plantio de *B. excelsa* sobre área degradada após as aplicações dos tratamentos de adubação.

Profundidade (cm)	Areia total (g kg ⁻¹)			Argila (g kg ⁻¹)			Silte (g kg ⁻¹)		
	Controle	Adubação verde	Adubação química	Controle	Adubação verde	Adubação química	Controle	Adubação verde	Adubação química
0 - 2,5	672,1 ± 74,7	771,8 ± 50,8	639,3 ± 56,5	263,5 ± 58,2	172,3 ± 35,0	263,5 ± 49,2	64,4 ± 19,1	56,0 ± 17,0	97,2 ± 11,4
2,5 - 7,5	663,0 ± 72,9	692,3 ± 13,1	645,4 ± 75,2	283,5 ± 80,4	262,3 ± 16,0	278,5 ± 74,2	53,6 ± 28,4	45,5 ± 11,1	76,1 ± 8,9
7,5 - 20	673,6 ± 29,0	685,8 ± 21,2	648,3 ± 69,5	262,3 ± 30,7	247,3 ± 33,0	258,5 ± 63,4	64,1 ± 11,6	66,9 ± 17,9	93,3 ± 16,5
20 - 40	676,3 ± 39,3	677,5 ± 11,5	650,9 ± 65,0	252,3 ± 27,8	239,8 ± 21,4	268,5 ± 60,1	71,5 ± 19,8	82,8 ± 14,4	80,7 ± 29,0

Os valores são médias ± desvios padrão (n=4)

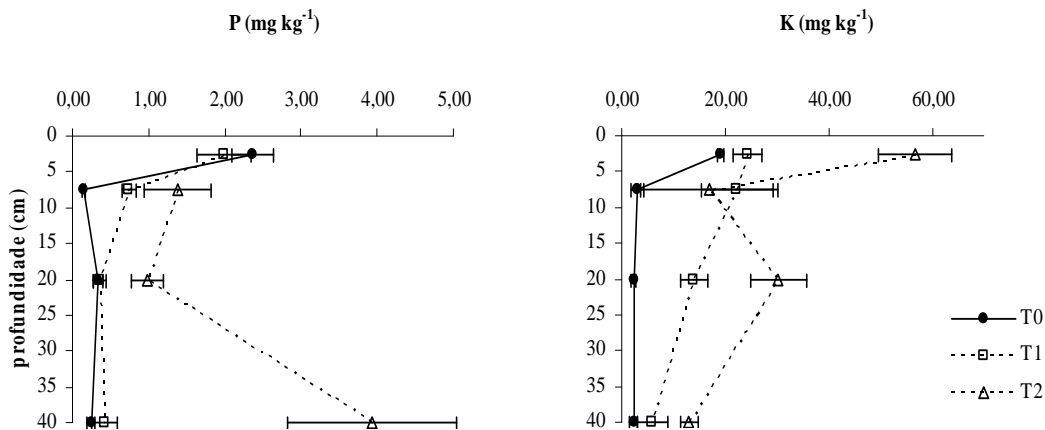


Fig. 4 Concentrações de P e K no solo do plantio de *B. excelsa* sobre área degradada após as aplicações dos tratamentos de adubação (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química). Os valores são médias e as linhas horizontais são desvios padrão (n=4)

Maiores concentrações de Ca na profundidade de 0-2,5 cm foram observadas nos tratamentos T1 ($0,8 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) e T2 ($0,9 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$), sendo que o tratamento T0 exibiu valor de $0,2 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ (Fig. 5). Houve redução nas concentrações deste elemento em todos os tratamentos em função da profundidade, onde os valores variaram entre $0,03$ e $0,13 \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ na profundidade de 20-40 cm.

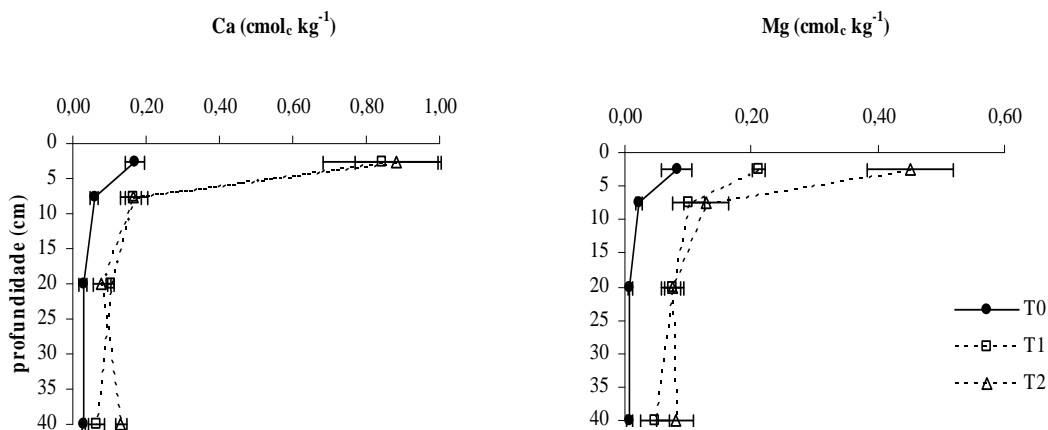


Fig. 5 Concentrações de Ca e Mg no solo do plantio de *B. excelsa* sobre área degradada após as aplicações dos tratamentos de adubação (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química). Os valores são médias e as linhas horizontais são desvios padrão (n=4)

O valor mais elevado de Mg na profundidade de 0-2,5 cm foi observado no tratamento T2 (0,5 cmol_c kg⁻¹) seguido pelos tratamentos T1 (0,2 cmol_c kg⁻¹) e T0 (0,1 cmol_c kg⁻¹). Na profundidade de 20-40 cm os valores variaram de 0,01 a 0,08 cmol_c kg⁻¹, sendo que os tratamentos T0 e T2 exibiram os menores e maiores valores, respectivamente.

Até a profundidade de 2,5-7,5 cm não se observou grande variação nas concentrações de Fe (Fig. 6). No entanto, na profundidade de 7,5-20 cm, o tratamento T0 (126,3 mg kg⁻¹) exibiu valor 218 e 49% superior quando comparado com os tratamentos T1 (39,7 mg kg⁻¹) e T2 (84,5 mg kg⁻¹), respectivamente.

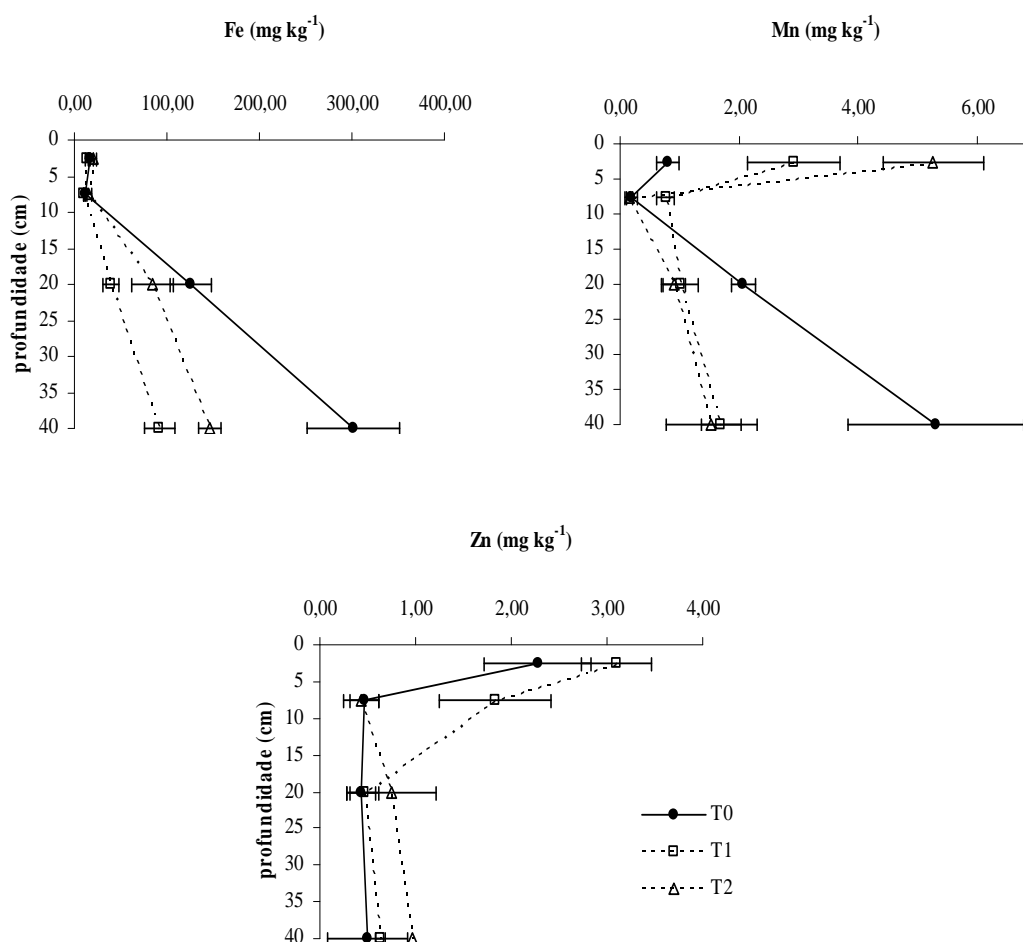


Fig. 6 Concentrações de Fe, Mn e Zn no solo do plantio de *B. excelsa* sobre área degradada após as aplicações dos tratamentos de adubação (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química). Os valores são médias e as linhas horizontais são desvios padrão (n=4)

Com relação às concentrações de Mn, verificou-se na profundidade 0-2,5 cm maior valor deste elemento no tratamento T2 (5,3 mg kg⁻¹), seguido pelos tratamentos T1 (2,9 mg kg⁻¹) e T0 (0,8 mg kg⁻¹). Na profundidade de 20-40 cm houve inversão no ranqueamento dos valores, onde o tratamento T0 exibiu valor 212 e 246% superior aos valores registrados nos tratamentos T1 e T2, respectivamente. Com relação às concentrações de Zn na profundidade de 2,5-7,5 cm verificou-se no tratamento T1 (1,8 mg kg⁻¹) valor 289 e 326% superior aos obtidos nos tratamentos T0 (0,5 mg kg⁻¹) e T2 (0,4 mg kg⁻¹), respectivamente. No entanto, nas profundidades de 7,5-20 cm e 20-40 cm os maiores valores deste elemento foram observados no tratamento T2 (0,8 e 1,0 mg kg⁻¹, respectivamente).

Teores foliares de nutrientes e eficiência no uso de nutrientes

O maior teor de N foliar foi obtido no tratamento T1 (15,1 g kg⁻¹), o qual foi 41 e 37% maior que os valores observados nos tratamentos T0 e T2, respectivamente. O maior teor de P também foi observado no tratamento T1 (2,4 g kg⁻¹) seguido pelos tratamentos T2 (1,3 g kg⁻¹) e T0 (1,2 g kg⁻¹). Os teores dos nutrientes foliares variaram entre 3,1 e 5,8 g kg⁻¹ para o K, 11,2 e 12,2 g kg⁻¹ para o Ca, 2,4 e 3,0 g kg⁻¹ para o Mg, 77,6 e 121,9 mg kg⁻¹ para o Fe, 14,9 e 29,9 mg kg⁻¹ para o Zn, 25,8 e 56,6 mg kg⁻¹ para o Mn. Com exceção do K, Ca e Fe, os maiores teores de nutrientes foliares foram obtidos no tratamento T1. Por outro lado, o tratamento T2 exibiu os maiores teores destes elementos (Tabela 2).

Com relação à eficiência no uso dos nutrientes, o tratamento T1 apresentou maiores valores de eficiência para todos os nutrientes foliares, os quais foram 135, 57, 57, 255, 147, 363, 100 e 76% maiores que o tratamento T0 para os elementos N, P, K, Ca, Mg, Fe, Zn e Mn, respectivamente. A semelhança do tratamento T1, o tratamento T2 também exibiu valores superiores de eficiência no uso dos nutrientes P, Zn e Mn (Tabela 2).

Tabela 2 Fotossíntese líquida, teores foliares de nutrientes e eficiência no uso de nutrientes em plantas de *Bertholletia excelsa* em área de solo degradado após as aplicações dos tratamentos de adubação. A = Fotossíntese líquida, P(nutriente)UE = Eficiência no uso de nutrientes.

Parâmetros	Tratamentos		
	Controle	Adubação verde	Adubação química
A ($\mu\text{mol g}^{-1} \text{s}^{-1}$)	51,63 \pm 8,35c	169,77 \pm 12,70a	87,93 \pm 15,84b
N (g kg^{-1})	10,71 \pm 1,57b	15,06 \pm 0,93a	11,01 \pm 0,90b
P (g kg^{-1})	1,18 \pm 0,45b	2,42 \pm 0,60a	1,28 \pm 0,85b
K (g kg^{-1})	3,05 \pm 1,78b	5,07 \pm 1,24a	5,77 \pm 0,99a
Ca (g kg^{-1})	11,90 \pm 3,55a	11,19 \pm 2,81a	12,22 \pm 2,06a
Mg (g kg^{-1})	2,44 \pm 0,93a	2,97 \pm 0,28a	2,83 \pm 0,44a
Fe (mg kg^{-1})	119,56 \pm 47,55a	77,60 \pm 8,02b	121,90 \pm 36,13a
Zn (mg kg^{-1})	19,56 \pm 9,98b	29,90 \pm 9,46a	14,90 \pm 5,28b
Mn (mg kg^{-1})	32,56 \pm 14,02b	56,60 \pm 17,21a	25,80 \pm 15,59b
PNUE ($\text{mmol mol}^{-1} \text{s}^{-1}$)	67,54 \pm 4,78c	158,90 \pm 20,47a	111,30 \pm 14,69b
PPUE ($\text{mmol mol}^{-1} \text{s}^{-1}$)	1462,41 \pm 320,54b	2296,24 \pm 614,96a	2466,81 \pm 656,68a
PKUE ($\text{mmol mol}^{-1} \text{s}^{-1}$)	880,13 \pm 488,75b	1385,27 \pm 404,14a	595,23 \pm 59,77b
PCaUE ($\text{mmol mol}^{-1} \text{s}^{-1}$)	181,92 \pm 34,30b	647,14 \pm 186,80a	288,62 \pm 29,98b
PMgUE ($\text{mmol mol}^{-1} \text{s}^{-1}$)	569,07 \pm 168,75b	1406,71 \pm 224,45a	755,94 \pm 106,86b
PFeUE ($\mu\text{mol mol}^{-1} \text{s}^{-1}$)	26,75 \pm 8,12c	123,87 \pm 20,09a	41,83 \pm 8,44b
PZnUE ($\mu\text{mol mol}^{-1} \text{s}^{-1}$)	206,33 \pm 78,42b	413,51 \pm 161,98a	408,67 \pm 85,16a
PMnUE ($\mu\text{mol mol}^{-1} \text{s}^{-1}$)	101,95 \pm 44,67b	179,79 \pm 58,73a	235,17 \pm 94,15a

Médias de dez plantas (\pm desvios padrão); valores médios seguidos pelas mesmas letras entre os tratamentos não diferem a $p \leq 0,05$ pelo teste de Tukey

Discussão

Dinâmica dos nutrientes no solo

Diante dos resultados obtidos, observou-se que a aplicação do tratamento T2 foi eficiente no aumento dos valores de pH nas profundidades de 0-2,5, 2,5-7,5 e 7,5-20 cm (Fig. 2). O aumento nos valores de pH na camada superficial do solo está associado à redução no grau de floculação da argila, resultado do aumento da espessura da dupla camada elétrica difusa dos colóides em razão da criação de cargas negativas que induzem a substituição do Al^{3+} no complexo de troca pelo Ca^{2+} e Mg^{2+} , ocasionando a precipitação de polímeros de hidróxidos de Al^{3+} (Albuquerque et al. 2003). Esta afirmação pode ser confirmada pelas concentrações praticamente nulas de Al^{3+}

encontradas ao longo de toda a profundidade analisada no tratamento T2 (Fig. 2). Observaram-se baixos valores de pH e conseqüentemente maiores concentrações de Al^{3+} no tratamento com adubação verde (T1) nas profundidades de 0-2,5 cm e 2,5-7,5 cm. Alguns trabalhos têm mostrado que a decomposição do material vegetal pode resultar no aumento do pH do solo pelo efeito de neutralização da acidez em virtude da produção de íon amônio (Hoyt e Turner 1975) ou pelo excesso da concentração de cátions sobre ânions no material vegetal (Noble et al. 1996; Noble e Randall 1999), assim como, na redução do pH, pelo processo de nitrificação e conseqüente perda de nitrato ou por aumento da capacidade de troca de cátions e correspondente elevação da acidez trocável do solo (Bolan et al. 1991; Tang e Yu 1999). Com isso, o aumento ou a redução nos valores de pH do solo estão intimamente relacionados ao balanço entre os processos de amonificação e nitrificação em consequência da decomposição do material vegetal (Xiong et al. 2008).

O fato das concentrações de N e C apresentarem-se superiores nas camadas mais superficiais do tratamento T1 pode estar relacionado ao alto valor da razão C/N encontrada no material vegetal, que é um dos principais parâmetros que regulam a taxa de decomposição (Pérez-Harguindeguy et al. 2000; Barbhuiya et al. 2008). Portanto, altos valores desta razão implicam decomposição lenta deste material contribuindo, em curto prazo, para a elevação das concentrações de nutrientes inicialmente na camada superficial do solo. Apesar da importância da calagem na correção da acidez e conseqüente aumento na taxa de mineralização do N no solo (Rosolem et al. 2003), não se verificou diferenças tanto nas concentrações de N quanto de C entre os tratamentos T2 e T0 ao longo de todas as profundidades do solo analisadas.

Maiores concentrações de P e K foram observadas no tratamento T2 quando comparado aos tratamentos T0 e T1, sendo que estes teores diminuíram em função da profundidade do solo com exceção da profundidade de 20-40 cm, no caso do P, e 7,5-20 cm no caso do K (Fig. 4). Os maiores teores de P e K encontrados no tratamento T2 estão relacionados à elevação na disponibilidade destes elementos no solo proporcionada pela correção da acidez e conseqüentemente pelo aumento da eficiência do fertilizante químico aplicado (Haynes 1982; Matzner et al. 1985; Carvalho e Raij 1997).

As concentrações de Ca^{2+} e Mg^{2+} foram mais elevadas nos tratamentos T1 e T2 se comparados ao tratamento T0 em todas as profundidades analisadas com redução destas concentrações em função da profundidade para todos os tratamentos (Fig. 5). Os

altos valores de Ca^{2+} e Mg^{2+} exibidos nas camadas mais superficiais do tratamento T2 também são reflexos da correção da acidez do solo e do fornecimento destes nutrientes pela aplicação do calcário dolomítico (Silva et al. 1980; Valeri et al. 1985; Alfaia e Muraoka 1997; Silva et al. 2006). Por outro lado, as altas concentrações de Ca^{2+} no tratamento T1 são resultado dos elevados teores deste elemento presentes no material vegetal, o qual é fornecido ao solo em grande parte pela degradação da lignina (Yadav e Malanson 2007).

Os micronutrientes Fe, Mn e Zn não exibiram padrão semelhante em suas concentrações nas diferentes profundidades, sendo que as concentrações de Fe aumentaram em todos os tratamentos. Por sua vez, as concentrações de Mn foram maiores na profundidade de 0-2,5 cm nos tratamentos T1 e T2, ao passo que no tratamento T0 as concentrações deste elemento foram bastante superiores em maiores profundidades. Por outro lado, Zn exibiu maiores concentrações nas camadas mais superficiais do solo para todos os tratamentos (Fig. 6). Alguns autores têm demonstrado o efeito benéfico da correção da acidez do solo na disponibilidade de micronutrientes, os quais em altas concentrações podem ser tóxicos às plantas (Andreotti et al. 2001; Nunes et al. 2004). Este efeito foi observado para o Fe e Mn nas maiores profundidades quando comparado ao tratamento T0. Na camada de aplicação do calcário, não se verificou efeito do aumento do pH sobre as concentrações de Mn, assim como obtido por Silva et al. (2006). As altas concentrações de Mn e Zn nas camadas superficiais do tratamento T1, provavelmente, estão associadas aos elevados teores destes elementos no material vegetal utilizado. Por outro lado, apesar do Fe também ser encontrado em altos teores no material vegetal aplicado, as concentrações deste nutriente nas camadas mais profundas do solo do tratamento T1 apresentaram-se abaixo dos demais tratamentos.

Teores foliares e eficiência na utilização dos nutrientes pelas plantas

Os teores de N nas folhas das plantas do tratamento T1 foram superiores aos teores dos tratamentos T0 e T2, que não apresentaram diferenças entre si ($F = 42,96$, $P = 0,00000$) (Tabela 2). No entanto, estes teores são inferiores aos observados em estudos com diversas espécies na região Amazônica (Marenco et al. 2001; Gonçalves et al. 2005; Santos Júnior et al. 2006; Silva et al. 2006; Santos Júnior 2008). Por outro lado, os teores de N em T1 podem ser considerados adequados ao desenvolvimento das plantas de *B. excelsa*, uma vez que não foram encontrados, em análise visual, sintomas

de deficiência deste elemento (por exemplo, clorose generalizada das folhas), enquanto que em T0 e T2 esses sintomas foram diagnosticados. A semelhança dos teores de N, os teores de P também foram mais elevados no tratamento T1 quando comparado aos dos tratamentos T0 e T2 ($F = 11,18$, $P = 0,00029$). A relação N:P tem sido apontada como indicadora da natureza da limitação às plantas desses nutrientes. A relação $N:P > 14$ indica maior limitação por fósforo, enquanto que a relação $N:P < 14$ sugere maior limitação por nitrogênio (Koerselman e Meuleman 1996). Portanto, no presente estudo a concentração de N, comparada a de P, pode ser indicada como fator mais limitante ao crescimento das plantas com valores bem abaixo do índice 14. A deficiência de N tem se apresentado como principal responsável por afetar o desenvolvimento de *Bertholletia excelsa* (Camargos et al. 2002). Esses resultados reforçam a importância da contribuição do tratamento T1 na amenização da carência de N dessas plantas quando comparado aos tratamentos T0 e T2. Os teores de K foram maiores nos tratamentos T1 e T2 quando comparados ao tratamento T0 ($F = 10,55$, $P = 0,00041$). A presença de K tem-se revelado de extrema importância no ajustamento osmótico de plantas submetidas a condições de déficit hídrico (Morgan 1984; Ashraf et al. 2001). Os teores de Ca ($F = 0,34$, $P = 0,715$) e Mg ($F = 2,03$, $P = 0,151$) não exibiram diferenças entre os três tratamentos. Em todos os tratamentos as plantas acumularam altos teores de Ca. O maior acúmulo deste elemento nas folhas de *Bertholletia excelsa* parece ser uma estratégia adotada por esta espécie, o qual, juntamente com o Cl e Mn, constituem os principais responsáveis pelo funcionamento do complexo de evolução de oxigênio (OEC) do aparato fotossintético (Sauer e Yachandra 2004). O Ca participa como cofator essencial para oxidação da molécula de água, sendo que sua remoção ou substituição por outro íon metálico pode inibir o OEC (Vrettos et al. 2001). Os menores teores de Mg encontrados podem estar relacionados à interrupção do efeito sinérgico desempenhado pela presença de P no solo, onde as reduzidas concentrações deste elemento podem ter desfavorecido a aquisição de Mg pelas plantas (Santos Júnior et al. 2006).

Com relação aos teores dos micronutrientes Fe, Zn e Mn, observou-se maior teor do primeiro nas folhas das plantas dos tratamentos T0 e T2 ($F = 5,13$, $P = 0,013$) e maior teor de Mn e Zn no tratamento T1 ($F = 10,68$, $P = 0,00038$ e $F = 8,15$, $P = 0,0017$, respectivamente). O maior teor de Mn encontrado no tratamento T1 pode favorecer o funcionamento do aparato fotoquímico da fotossíntese em função de sua participação como constituinte de manganoproteínas responsáveis pelo funcionamento

do complexo de evolução de oxigênio nas células do cloroplasto (Sauer e Yachandra 2004; Dau e Haumann 2007; Raymond e Blankenship 2008).

De maneira geral, são visíveis os efeitos proporcionados pelos tratamentos com adubação química (T2) e principalmente a adubação verde (T1) no que diz respeito à promoção da eficiência no uso dos nutrientes pelas plantas, em razão das maiores taxas fotossintéticas quando comparados com o tratamento controle (T0). Esses resultados reforçam a hipótese de que a adoção de melhores práticas de manejo do solo e a seleção de espécies eficientes quanto ao uso dos recursos primários constitui a melhor alternativa para restauração de áreas alteradas (Baligar et al. 2001).

Análise de crescimento

Maiores valores de TCA em altura ($F = 187,84$, $P = 0,00000$) e diâmetro ($F = 144,93$, $P = 0,00000$) foram nitidamente observados nas plantas do tratamento T1 quando comparados às plantas dos tratamentos T0 e T2.

A comprovada maior disponibilidade de nutrientes no solo aliada aos maiores teores destes nas folhas das plantas do tratamento T1 contribuíram para a maior assimilação de carbono destas plantas e conseqüente maior acúmulo de biomassa, refletida pelas elevadas taxas de crescimento absoluto (DeLucia et al. 1992; Feng e Li 2007). Além disso, o maior conforto térmico e disponibilidade hídrica proporcionados pela cobertura do solo com o material vegetal nesse tratamento pode também ter favorecido o desenvolvimento das plantas. Por outro lado, não foram observadas diferenças nos valores de TCA em altura e diâmetro entre os tratamentos T0 e T2, apesar das plantas do segundo apresentarem maiores taxas fotossintéticas. A possível menor disponibilidade de água no solo comparada ao tratamento T1, provavelmente, provocou mudanças nos padrões de distribuição de biomassa das plantas do tratamento T2 (Chapin 1991; Hayashida-Oliver et al. 2001). Deve ser ressaltado ainda, que os dados de fotossíntese líquida foram obtidos aos 60 dias após as adubações, enquanto que as medidas de crescimento foram coletadas aos 240 dias após as adubações. Além disso, maiores taxas fotossintéticas nem sempre refletem maiores taxas de crescimento da planta (Poorter et al. 1990; Litton et al. 2007).

Conclusão

A aplicação dos tratamentos adubação verde (T1) e adubação química (T2) foram capazes de proporcionar benefícios no que diz respeito à melhoria da qualidade do solo e do *status* nutricional das plantas. Estas vantagens refletiram no incremento da eficiência no uso de nutrientes em função, principalmente, de maiores taxas fotossintéticas e, conseqüentemente, promoção das variáveis de crescimento investigadas, que no caso do tratamento T1, foram cerca de 12 vezes superiores ao tratamento T0. No entanto, o tratamento químico por não apresentar efetividade assemelhando-se ao padrão de resposta das plantas no tratamento T0, denota que a abrangência de benefícios (não somente de fertilidade do solo) parece ser o fator preponderante para a melhor restauração de área degradada e que pode ser verificada na adubação verde.

Capítulo II. Fotossíntese, teores de pigmentos cloroplastídicos e fluorescência da clorofila *a* em plantas jovens de *Bertholletia excelsa* submetidas a diferentes tipos de adubação²

Introdução

A castanheira-da-Amazônia (*Bertholletia excelsa* H. B.) é uma espécie florestal de porte arbóreo pertencente à família das Lecythidaceae. Esta família possui um total de 200 espécies, que se distribuem desde o sul do México até a região sul do Brasil. Por sua vez, a castanheira-da-Amazônia se apresenta como única espécie dentro do gênero *Bertholletia* (Prance e Mori 1979, Mori e Prance 1990, Mori 1992). *Bertholletia excelsa* é uma espécie amazônica que se adapta melhor a regiões que não sofrem inundações, como as florestas de terra firme das Guianas, Colômbia, Venezuela, Peru, Bolívia e Brasil (Mori 1992). Dentre as espécies arbóreas da Amazônia, *B. excelsa* destaca-se pelo seu grande valor econômico e bom ritmo de crescimento (Salomão *et al.* 2006, Souza *et al.* 2008, Tonini *et al.* 2008). Então, testar esta espécie visando confirmar seu desempenho fisiológico quanto à atividade fotossintética poderá ser de grande importância para os programas de restauração florestal e plantios de produção na Amazônia.

O fato é que, em ambientes degradados, as plantas são submetidas a diferentes situações de estresse sejam estes bióticos ou abióticos (competição entre espécies, deficiência hídrica, excesso de luminosidade, disponibilidade de nutrientes, entre outras características do sítio), sendo necessário o desenvolvimento de estratégias adaptativas que possam favorecer o seu estabelecimento e crescimento em tais áreas (Puerta 2002). Neste contexto, alguns aspectos como a eficiência fotossintética, a utilização da energia luminosa, a assimilação de carbono, a regulação na absorção de água e nutrientes, poderiam ser otimizados de acordo com as exigências de cada espécie (Santos Júnior *et al.* 2006). O grau de desconhecimento que se tem sobre a biologia e a ecofisiologia das espécies e sua adaptação a estresses ambientais tem limitado o seu uso em programas de reflorestamento (Gebrekirstos *et al.* 2006). Por sua vez, assim como para plantios de espécies florestais na Amazônia, a quantidade de estudos ecofisiológicos em floresta tropical ainda é reduzida, especialmente considerando a enorme complexidade e

² Escrito conforme as normas da revista *Photosynthetica*

dinamismo do ambiente das florestas tropicais aos quais as espécies estão submetidas (Pezzopane *et al.* 2002).

Dentre os fatores abióticos, uma das principais alterações causadas pela remoção da cobertura florestal consiste no aumento significativo nos níveis de irradiância (Gonçalves e Santos Júnior 2005). Sob altos níveis de irradiância, as plantas podem sofrer alteração nos teores de pigmentos cloroplastídicos, redução na atividade de enzimas antioxidantes e, ainda, fotoinibição dos seus centros de reação fotossintética (Engel e Poggiani 1991, Gonçalves *et al.* 2001, Jiao *et al.* 2004, Gonçalves *et al.* 2005, Liu *et al.* 2006, Morais *et al.* 2007).

A disponibilidade de nutrientes no solo e seus teores foliares aliados a outros fatores abióticos, como a intensidade de luz, também contribui para limitar o pleno crescimento e desenvolvimento das plantas (Gonçalves *et al.* 2005, Silva *et al.* 2006). Por outro lado, o suprimento adequado de nutrientes pode favorecer diferentes mecanismos de crescimento das plantas, como no caso do desempenho fotossintético, contribuindo sobremaneira para o estabelecimento das plantas no campo (Marenco *et al.* 2001, Gonçalves *et al.* 2005, Silva *et al.* 2008). Os nutrientes são incorporados aos tecidos das plantas, tornando-se componentes ou ativadores de enzimas, ou ainda reguladores do grau de hidratação do protoplasma (Larcher 2003). Os nutrientes nas suas múltiplas funcionalidades conferem melhor estabilidade para o desempenho de processos vitais às plantas. Na literatura a relação N, clorofila e fotossíntese já é bem estabelecida (Evans 1989, Mauromicale *et al.* 2006, Fritsch e Ray 2007, Makoto e Koike 2007). Alguns micronutrientes, por exemplo, Cu, Mn, Zn e B, podem contribuir para a tolerância a estresses abióticos e bióticos (Kirkby e Römheld 2007). No entanto, a forma como estes elementos são disponibilizados para as plantas, muitas vezes representa um desafio para maximizar os sistemas de produção.

Neste contexto, o presente estudo objetivou investigar os efeitos de diferentes adubações aplicadas em plantio florestal de *Bertholletia excelsa* em área de solo degradado, sobre às trocas gasosas, concentração de pigmentos cloroplastídicos e fluorescência da clorofila *a* desta espécie. Nesse trabalho, testou-se a hipótese que a adubação de áreas degradadas pode acarretar alterações benéficas no solo, considerando os aspectos químicos os quais poderiam definir maior estabilidade funcional para o processo fotossintético em plantas jovens de *B. excelsa*.

Materiais e métodos

O experimento foi implantado numa área degradada no município de Manaus, AM (60° 01' 07" W e 03° 05' 08" S), que anteriormente, no início dos anos 80, foi desmatada retirando-se a vegetação original formada por “Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme” (Veloso *et al.* 1991). Além disso, foi removida uma camada de solo até a profundidade de aproximadamente 3 m. A superfície foi então terraplanada e compactada para o início de construções militares. Posteriormente, com a não execução das obras, a área foi abandonada. O clima na área é classificado como “Amw” (Köppen 1948), com temperatura e pluviosidade média anual de 26,7°C e 2.186 mm, respectivamente (Fish 1990). Em março de 2004, o experimento, com o objetivo de revegetar a área, foi implantado. Para tanto, covas de 30 x 40 cm foram abertas manualmente, em espaçamento de 1 x 1 m.

Em dezembro de 2007, o plantio foi submetido a diferentes tratamentos de adubação, sendo que: T0 = controle (não recebeu adubação), T1= recebeu adubação de cobertura com material vegetal (galhos + folhas) e T2 = cada planta recebeu adubação química com 150g de adubo mineral (Oouromag[®] 4% N, 14% P, 7% K, 11,5% Ca, 2,7% Mg, 10,4% S, 0,07% B, 0,59% Zn e 0,15% Cu) e 50g de calcário dolomítico incorporados em um raio de 30 cm da planta.

Medidas de trocas gasosas: As medidas de trocas gasosas foram realizadas no período entre 9:00 e 12:00 horas, em dez indivíduos por tratamento, 60 dias após as adubações. Em cada planta foi selecionada uma folha completamente expandida, em bom estado fitossanitário, exposta a pleno sol. 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). Os dados pontuais das variáveis mencionadas anteriormente foram obtidos à densidade de fluxo de fótons (PPFD) de 0 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com a câmara foliar ajustada para concentração de CO₂, temperatura e vapor de H₂O em torno de 380±4 $\mu\text{mol mol}^{-1}$, 31±1°C e 21±1 mmol mol⁻¹, respectivamente. A eficiência no uso da água (EUA) foi calculada por meio da razão EUA ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) = fotossíntese / transpiração.

Teores de pigmentos cloroplastídicos: A coleta de amostras para a determinação dos pigmentos cloroplastídicos foi realizada após as aplicações dos tratamentos de adubação. As folhas dos indivíduos foram coletadas e envolvidas em papel alumínio, acondicionadas em isopor com gelo e conduzidas ao Laboratório de Fisiologia e Bioquímica Vegetal (INPA) para a determinação dos teores de clorofila *a* (663 nm), clorofila *b* (645 nm) e carotenóides (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).

Fluorescência da clorofila *a*: A determinação da fluorescência da clorofila *a* foi realizada após as adubações utilizando um fluorômetro portátil (PEA, MK2-9600, Norfolk, UK) em folhas completamente expandidas em perfeito estado fitossanitário. Os dados foram coletados também entre 09:00 e 12:00 horas nos mesmos indivíduos em que foram determinadas as trocas gasosas e os teores de pigmentos cloroplastídicos. As folhas selecionadas foram sujeitas a um período de adaptação de 30 min no escuro, suficiente para a completa oxidação dos centros de reação. Estas folhas foram então expostas a pulsos de luz saturante à intensidade de $3000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ e comprimento de onda de 650 nm por 5 s (Gonçalves *et al.* 2001).

Desenho experimental e análises estatísticas: O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), sendo três tratamentos (T0, T1 e T2) com dez repetições cada (indivíduos amostrados). Os dados de cada variável foram submetidos à análise de variância por meio do software estatístico Statistica versão 6.0 para Windows (StatSoft Inc. 2003). Em seguida, o teste de Tukey ($p \leq 0,05$) foi aplicado para comparação das médias dos tratamentos. Os gráficos dos teores de pigmentos cloroplastídicos foram plotados utilizando-se o software Sigmaplot 8.0 (SPSS Inc. 2002).

Resultados e discussão

Os resultados das trocas gasosas para os indivíduos de *Bertholletia excelsa* mostraram diferenças significativas entre os três tratamentos de adubação (Tabela 1).

Os valores de fotossíntese líquida foram altamente superiores quando determinados nos indivíduos do tratamento T1 ($13,2 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), os quais apresentaram taxa fotossintética quase três vezes maior quando comparada com os valores dos indivíduos do tratamento T0 ($4,7 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$).

A exceção das taxas de respiração, os indivíduos do tratamento T1 sempre apresentaram maiores valores para todas as variáveis de trocas gasosas quando comparados aos indivíduos do tratamento T0. No entanto, quando comparados com T2, não apresentaram diferenças significativas para as variáveis respiração no escuro, condutância estomática, transpiração e eficiência no uso da água. Mas, foi mantida a superioridade do tratamento T1 no que concerne ao ganho na assimilação de carbono.

Tabela 1. Trocas gasosas e características fotossintéticas em plantas de *Bertholletia excelsa* em área de solo degradado submetidas a diferentes adubações. Fotossíntese líquida (A), respiração no escuro (R_d), condutância estomática (g_s), transpiração (E) e eficiência no uso da água (EUA). Médias de dez plantas (\pm desvios padrão); valores médios seguidos pelas mesmas letras entre os tratamentos não diferem a $p \leq 0,05$ pelo teste de Tukey.

Variáveis	Controle	Adubação verde	Adubação química
A [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	$4,76 \pm 1,31c$	$13,21 \pm 1,04a$	$8,01 \pm 1,81b$
R_d [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	$0,97 \pm 0,29a$	$1,30 \pm 0,43a$	$1,19 \pm 0,32a$
g_s [$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	$124,0 \pm 61,25b$	$232,85 \pm 36,23a$	$174,70 \pm 83,60ab$
E [$\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$]	$2,71 \pm 1,03b$	$4,23 \pm 0,43a$	$3,37 \pm 1,24ab$
EUA [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$]	$1,89 \pm 0,49b$	$3,14 \pm 0,30a$	$2,60 \pm 0,77a$

O valor médio de fotossíntese líquida obtido para os indivíduos do tratamento T1 neste estudo é superior ao maior valor ($9,4 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) à mesma densidade de fluxo de fótons ($1500 \mu\text{mol fótons m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) encontrado por Morais (2003) em indivíduos desta mesma espécie em plantio florestal misto com dez anos de idade em área degradada.

Os indivíduos do tratamento T1 também apresentaram maiores valores para a maioria dos parâmetros de pigmentos analisados, sendo que apenas para os teores de clorofila *b* (chl *b*) e carotenóides (c_{x+c}), não se verificaram diferenças entre os tratamentos T1 e T0 (Fig. 1). O maior teor de clorofila *a* observado nos indivíduos do

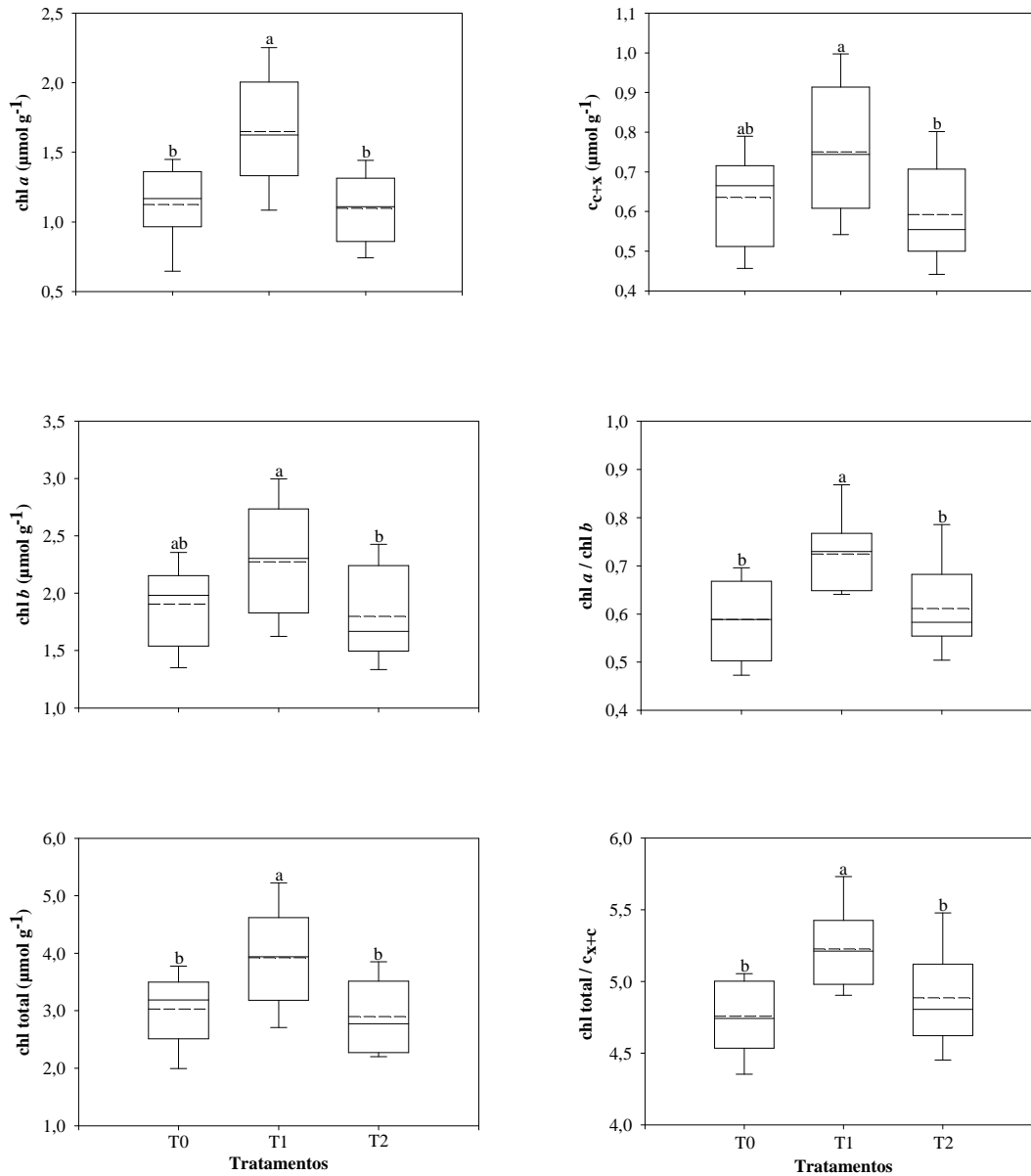


Fig. 1. Box-plot dos teores de pigmentos cloroplastídicos na base de massa foliar, para os diferentes tratamentos de adubação (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química). Clorofila *a* (chl *a*); clorofila *b* (chl *b*); clorofila total (chl *a* + chl *b*); carotenóides (c_{x+c}), clorofila *a* / clorofila *b* (chl *a* / chl *b*) e clorofila total / carotenóides (chl total / c_{x+c}). Valores médios seguidos pela mesma letra entre os tratamentos não diferem a $p \leq 0,05$ pelo teste de Tukey. $n = 10$.

tratamento T1 pode estar relacionado ao maior suprimento de nitrogênio proporcionado pela adubação verde (Tabela 2), uma vez que estudos têm mostrado forte correlação

existente entre o *status* de nitrogênio na planta e a concentração de clorofila foliar (Argenta *et al.* 2001, Schlemmer *et al.* 2005).

Tabela 2. Teores médios de macro e micronutrientes do material vegetal (galhos + folhas) utilizado no tratamento T1 (adubação verde). Médias de quatro amostras (\pm desvios padrão).

Macronutrientes		Micronutrientes	
C [dag kg ⁻¹]	51,36 \pm 2,21	B [mg kg ⁻¹]	5,30 \pm 2,07
N [g kg ⁻¹]	8,70 \pm 1,64	Cu [mg kg ⁻¹]	4,76 \pm 1,02
P [g kg ⁻¹]	0,32 \pm 0,07	Fe [mg kg ⁻¹]	108,01 \pm 46,61
K [g kg ⁻¹]	1,36 \pm 0,26	Mn [mg kg ⁻¹]	75,32 \pm 20,24
Ca [g kg ⁻¹]	4,33 \pm 0,34	Zn [mg kg ⁻¹]	14,66 \pm 2,65
Mg [g kg ⁻¹]	0,51 \pm 0,17		
S [g kg ⁻¹]	0,78 \pm 0,21		

A maioria dos parâmetros de concentração de pigmentos cloroplastídicos obtidos neste estudo são inferiores aos valores encontrados em folhas de *B. excelsa* adulta crescendo sob sistema de plantios florestais, com exceção ao parâmetro chl total/c_{x+c}, cujos valores foram superiores no presente trabalho (Morais *et al.* 2007). Este resultado pode ser uma estratégia de proteção da espécie *B. excelsa* ao estresse causado pela alta irradiância na condição de pleno sol, como é o caso da área onde este trabalho foi realizado.

Os indivíduos de *B. excelsa* do tratamento T1 não apresentaram diferenças quando comparados aos indivíduos do tratamento T2 no que diz respeito à eficiência quântica máxima do PSII (F_v/F_m). Todavia, em relação ao controle, o tratamento T1 exibiu menores valores de estresse quando analisada a razão F_v/F_m. Esse resultado, potencialmente, já reflete melhores condições proporcionadas pelos tratamentos T1 e T2 para a captura e utilização de energia (Tabela 3). Os valores de eficiência fotoquímica do PSII obtidos neste estudo são semelhantes aos encontrados em árvores adultas de *B. excelsa* em plantio misto com cerca de dez anos de idade (Morais *et al.* 2007). Como se trata de um experimento de restauração de área degradada, as plantas são expostas à condição de pleno sol, sendo que a capacidade de aclimação destas plantas a tal situação consiste estratégia essencial para o seu estabelecimento.

Neste cenário, a análise mais profunda da fluorescência da clorofila *a* representa ferramenta para o monitoramento dos efeitos resultantes do estresse em plantas sob alta

irradiância em áreas em processo de restauração (Gonçalves *et al.* 2005). Diante disso, o índice de desempenho constitui parâmetro mais apropriado para avaliação das respostas do PSII às condições de estresse que a própria razão F_v/F_m isoladamente, pois o mesmo é resultado da combinação de eventos estruturais e funcionais do PSII responsáveis pelo transporte de elétrons na fase fotoquímica da fotossíntese e, ainda, de outro evento, o qual se refere à energia que é dissipada ou perdida durante esse transporte (Strasser *et al.* 1999, Gonçalves *et al.* 2007). Nesse aspecto, o tratamento T1 foi bem superior a T0 e T2 exibindo valores de índice de desempenho cerca de 5 e 2 vezes maiores do que os tratamentos citados, respectivamente.

Tabela 3. Variáveis de fluorescência da clorofila *a* em plantas de *Bertholletia excelsa* em área de solo degradado submetidas a diferentes adubações. Fluorescência inicial (F_0), fluorescência máxima (F_m), fluorescência variável ($F_v = F_m - F_0$), eficiência fotoquímica do PSII (F_v / F_m) e Índice de desempenho (P.I.). Médias de dez plantas (\pm desvios padrão); valores médios seguidos pelas mesmas letras entre os tratamentos não diferem a $p \leq 0,05$ pelo teste de Tukey.

Variáveis	Controle	Adubação verde	Adubação química
F_0	243 \pm 28a	228 \pm 25a	229 \pm 79a
F_m	712 \pm 171b	958 \pm 177a	752 \pm 210ab
F_v	468 \pm 171b	730 \pm 180a	522 \pm 205b
F_v/F_m	0,64 \pm 0,09b	0,75 \pm 0,06a	0,68 \pm 0,11ab
P.I.	0,16 \pm 0,18b	0,81 \pm 0,6a	0,36 \pm 0,3b

Como conclusão deste estudo, pode-se afirmar que o tratamento de adubação verde possibilitou maior contribuição ao estabelecimento das plantas de *B. excelsa* refletida pelo melhor desempenho fotossintético, assim como maior eficiência na utilização de energia e acúmulo de pigmentos cloroplastídicos. Também foi confirmada a hipótese de que a melhoria química do substrato permite maior estabilidade ao sistema de plantio florestal relacionando-se este benefício ao processo fotossintético de *B. excelsa* na fase jovem quando cultivada em área degradada.

Capítulo III. Características foliares e *status* hídrico foliar em plantas jovens de *Bertholletia excelsa* crescendo sob área degradada e submetidas a diferentes tratamentos de adubação³

INTRODUÇÃO

A taxa de áreas desmatadas, anualmente, em florestas tropicais atingiu, no período entre 1990 e 1997, cerca de 5,8 milhões de hectares. Destes, 2,3 milhões de hectares por ano foram transformados em áreas degradadas (Achard et al, 2002). Apenas nos anos de 2002 e 2003, a taxa de desmatamento anual da floresta amazônica brasileira, alcançou valores próximos de 2,4 milhões de hectares (Laurance et al, 2004). No total, cerca de 70 milhões de hectares da floresta amazônica brasileira já foram desmatados (IMAZON, 2007).

Em ambientes degradados as plantas são submetidas a diferentes situações de estresse (Puerta, 2002). No que concerne à disponibilidade hídrica, a ausência de cobertura vegetal do solo favorece menor acúmulo de matéria orgânica e aumento na temperatura, reduzindo a capacidade de retenção de água e, conseqüentemente, a umidade deste solo (Rossi et al, 2007).

A água constitui um dos fatores ambientais determinante da diversidade produtiva dos vegetais, podendo comprometer as funções vitais ou estimular o desenvolvimento de respostas adaptativas que possibilitem às plantas sobreviverem por longos períodos de estresse hídrico (Diniz, 1999). Não há processo vital nas plantas que não seja afetado pelo declínio no seu potencial hídrico. No início, ocorre um decréscimo no volume celular, seguido por um aumento na concentração de solutos e progressiva desidratação do protoplasma (Larcher, 2003).

As plantas quando submetidas ao déficit hídrico desenvolvem mecanismos que permitem sua adaptação a esta condição. O mecanismo de abertura e fechamento dos estômatos constitui a principal estratégia utilizada pelas plantas para evitar a perda de água (Hsiao, 1973; Buckley, 2005). A abertura e fechamento dos estômatos são afetados pela diferença de turgescência entre as células-guarda e as células epidérmicas adjacentes. Quando essa turgescência das células-guarda torna-se maior que a das células epidérmicas, os estômatos abrem e, caso contrário, ocorre o fechamento. O

³ Escrito conforme as normas da revista Acta Amazônica

aumento na turgescência é um processo osmorregulatório, onde a entrada de K^+ nas células-guarda provoca a abertura estomática, ao passo que o fechamento ocorre pela indução do ácido abscísico (ABA) e presença de Ca^{2+} no citoplasma celular, em condições de déficit hídrico (Larcher, 2003).

O déficit hídrico pode afetar o potencial hídrico foliar, as trocas gasosas e ainda vários mecanismos e processos associados ao crescimento vegetal (Rajendrudu & Naidu, 1997; Nogueira et al, 2000; Liberato et al, 2006; Portes et al, 2006). Por outro lado, o suprimento adequado de nutrientes pode favorecer diferentes mecanismos de crescimento das plantas, como no caso do desempenho fotossintético, contribuindo sobremaneira para o estabelecimento das plantas no campo (Marenco et al, 2001; Gonçalves et al, 2005; Silva et al, 2006).

A melhoria nas condições edáficas pode favorecer o melhor desempenho fotossintético e, conseqüentemente, a promoção de parâmetros ligados à tolerância das plantas a ambientes com limitada disponibilidade de recursos, como no caso da eficiência no uso da água (EUA) (Silva et al, 2008). A EUA é uma relação entre a taxa de fotossíntese (A) e a taxa de transpiração (E) e tem sido estudada como importante parâmetro de medida da capacidade das espécies se desenvolverem sobre ambientes com limitação de recursos hídricos (Nogueira et al, 2004; Cernusak et al, 2007).

Neste contexto, o objetivo desse estudo foi investigar as respostas de plantas de *Bertholletia excelsa* com relação ao *status* hídrico e a eficiência no uso da água sob diferentes tratamentos de adubação em área degradada. Diante disso, foi elaborada a hipótese de que a aplicação dos tratamentos de adubação favorecerá mecanismos de assimilação de CO_2 , resultando no incremento da EUA pelas plantas de *Bertholletia excelsa* em área de solo degradado.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi implantado numa área degradada no município de Manaus, AM (60° 01' 07" W e 03° 05' 08" S), que, no início dos anos 80, foi desmatada retirando-se a vegetação original formada por "Floresta Ombrófila Densa de Terra Firme" (Veloso et al, 1991). Além disso, foi removida uma camada de solo até a profundidade de aproximadamente 3 m. A superfície foi então terraplanada e compactada para o início de construções militares. Posteriormente, com a não execução das obras, a área foi abandonada. O clima na área é classificado como "Amw" (Köppen,

1948), com temperatura e pluviosidade média anual de 26,7°C e 2.186 mm, respectivamente (Fish, 1990).

A espécie selecionada para o plantio foi *Bertholletia excelsa* H. B. que é uma espécie florestal de porte arbóreo pertencente à família das Lecythidaceae (Mori, 1992). Além de possuir amplo valor econômico, tem apresentado boas características de crescimento quando em plantios agroflorestais ou povoamentos homogêneos (Yared, 1990; Tonini et al, 2005; Souza et al, 2008; Tonini et al, 2008).

Em março de 2004, o experimento com o objetivo de revegetar a área foi implantado. Para tanto, covas de tamanho 30 x 40 cm foram abertas manualmente, em espaçamento de 1 x 1 m.

Em dezembro de 2007 o plantio foi submetido a diferentes tratamentos de adubação, sendo que: T0 = controle (não recebeu adubação), T1= recebeu adubação de cobertura com material vegetal (galhos + folhas) e T2 = cada planta recebeu adubação química com 150 g de adubo mineral (Ouromag[®] 4% N, 14% P, 7% K, 11,5% Ca, 2,7% Mg, 10,4% S, 0,07% B, 0,59% Zn e 0,15% Cu) e 50 g de calcário dolomítico incorporados num raio de 30 cm da planta.

Os potenciais hídricos foliares na ante manhã (Ψ_{am}), ao meio-dia (Ψ_{md}) e ao entardecer (Ψ_{ent}) foram determinados entre 4:00 e 6:00 h, 11:00 e 13:00 h e entre 17:00 e 18:00 h, respectivamente, ao final do experimento usando uma bomba de pressão (Scholander et al, 1964) conforme descrito por Silva et al (2008).

A área foliar específica (AFE) foi determinada a partir da razão da área foliar pela massa foliar seca a 70°C até massa constante, utilizando-se discos foliares de área conhecida, sendo analisados dez discos foliares por planta (Evans & Poorter, 2001).

As medidas de trocas gasosas foram realizadas no período entre 9:00 e 12:00 horas. As taxas de fotossíntese líquida (A), 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). Os dados pontuais das variáveis mencionadas anteriormente foram obtidos à densidade de fluxo de fótons (PPFD) de 0 e 1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, com a câmara foliar ajustada para concentração de CO_2 , temperatura e vapor de H_2O em torno de $380 \pm 4 \mu\text{mol mol}^{-1}$, $31 \pm 1^\circ\text{C}$ e $21 \pm 1 \text{ mmol mol}^{-1}$, respectivamente.

A eficiência no uso da água (EUA) e a eficiência intrínseca no uso da água (EIUA) foram calculadas por meio das razões EUA ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) =

fotossíntese / transpiração e EIUA ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ mmol}^{-1} \text{ H}_2\text{O}$) = fotossíntese / condutância estomática, respectivamente.

O delineamento experimental utilizado foi o inteiramente casualizado (DIC), sendo três tratamentos (T0, T1 e T2) com dez repetições cada (indivíduos amostrados). Os dados de cada variável foram submetidos à análise de variância por meio do software estatístico Statistica versão 6.0 para Windows (StatSoft Inc., 2003). Para comparação das médias dos tratamentos foi aplicado o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). O software Sigmaplot 8.0 (SPSS Inc., 2002) foi utilizado para plotar os gráficos das medidas de área foliar específica e trocas gasosas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O potencial hídrico foliar na ante manhã (Ψ_{am}) variou entre -0,19 e -0,34 MPa, refletindo o estado de turgidez das plantas nesse período do dia (Figura 1). O Ψ_{am} é geralmente considerado o melhor parâmetro para indicar o *status* hídrico da planta, podendo refletir o potencial de água na região da rizosfera, uma vez que ambos (planta e rizosfera) permanecem em equilíbrio durante a noite (Davis & Mooney, 1986). No entanto, alguns autores não recomendam o uso isolado do Ψ_{am} para inferir sobre o *status* hídrico da planta (Ámeglio et al, 1997; Sato et al, 2006; Resco et al, 2008).

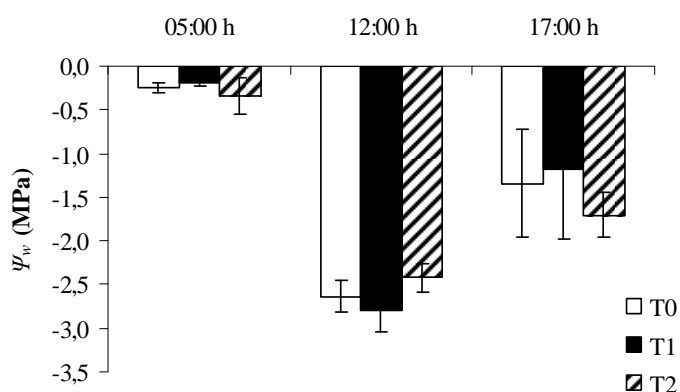


Figura 1 – Potenciais hídricos foliares na ante manhã (05:00 h), ao meio-dia (12:00 h) e ao entardecer (17:00 h) em plantas de *Bertholletia excelsa* em área de solo degradado após as aplicações dos tratamentos de adubação (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química) (n = 10).

Os menores valores (valores mais negativos) de potencial hídrico registrados ao meio dia (Ψ_{md}) e ao entardecer (Ψ_{ent}) refletem uma maior demanda evaporativa nesses períodos quando comparados à ante manhã. Neste sentido, as plantas dos três tratamentos exibiram comportamento semelhante, mostrando que do ponto de vista de manutenção do *status* hídrico das plantas, os tratamentos foram iguais.

No que diz respeito ao parâmetro área foliar específica (AFE), observou-se mudança no padrão desta variável com relação às plantas do tratamento T1. Os valores de AFE variaram entre 78,0 e 91,0 $\text{cm}^2 \text{g}^{-1}$, sendo que os tratamentos T0 e T2 exibiram valores 16 e 15% mais elevados, respectivamente, quando comparados com o tratamento T1 (Figura 2) ($F = 6,27$, $P = 0,0058$). Geralmente, o aumento em área de superfície da folha representa uma estratégia adotada pelas plantas a fim de maximizar a interceptação da radiação solar e a captura de CO_2 , que é especialmente importante em plantas sob condição de baixa disponibilidade de luz, água e nutrientes (Anyia & Herzog, 2004; Santos Júnior et al. 2006; Cai et al, 2008).

A menor área em relação à massa foliar em condições de alta luminosidade é resultado do maior investimento na formação de tecido paliádico mais espesso com reflexo no aumento do número de cloroplastos e na quantidade de enzimas fotossintetizantes, melhorando a capacidade fotossintética por unidade de área foliar. Plantas com menores valores de AFE podem apresentar o dobro da quantidade de rubisco (ribulose 1,5 bisfosfato carboxilase-oxigenase) por unidade de área foliar se comparadas às plantas com maiores valores deste parâmetro (Evans & Poorter, 2001).

No caso da pesquisa em questão, e como se trata de uma área aberta onde ocorre incidência direta de radiação solar, os menores valores de AFE exibidos pelas plantas do tratamento T1 podem significar maior eficiência destas plantas com relação ao processo de assimilação de carbono. A relação entre os valores de A e AFE foi significativa e negativa ($r = -0,73$, $r^2_{adj} = 0,52$, $P < 0,001$) (Figura 3). Santiago & Wright (2007) também mostraram haver relação inversa entre os valores de A expressos em área foliar e as medidas de AFE em diversas espécies tropicais.

O *status* hídrico das plantas influencia diretamente a sua capacidade em assimilar carbono, ambos regulados pela taxa de condutância estomática (Farquhar & Sharkey, 1982). Sob condições de déficit hídrico, as plantas, normalmente, reduzem a taxa fotossintética pela maior resistência estomática criada a fim de reduzir a perda de água pelo processo transpiratório (Bjorkman & Powles, 1984; Yokota et al, 2006).

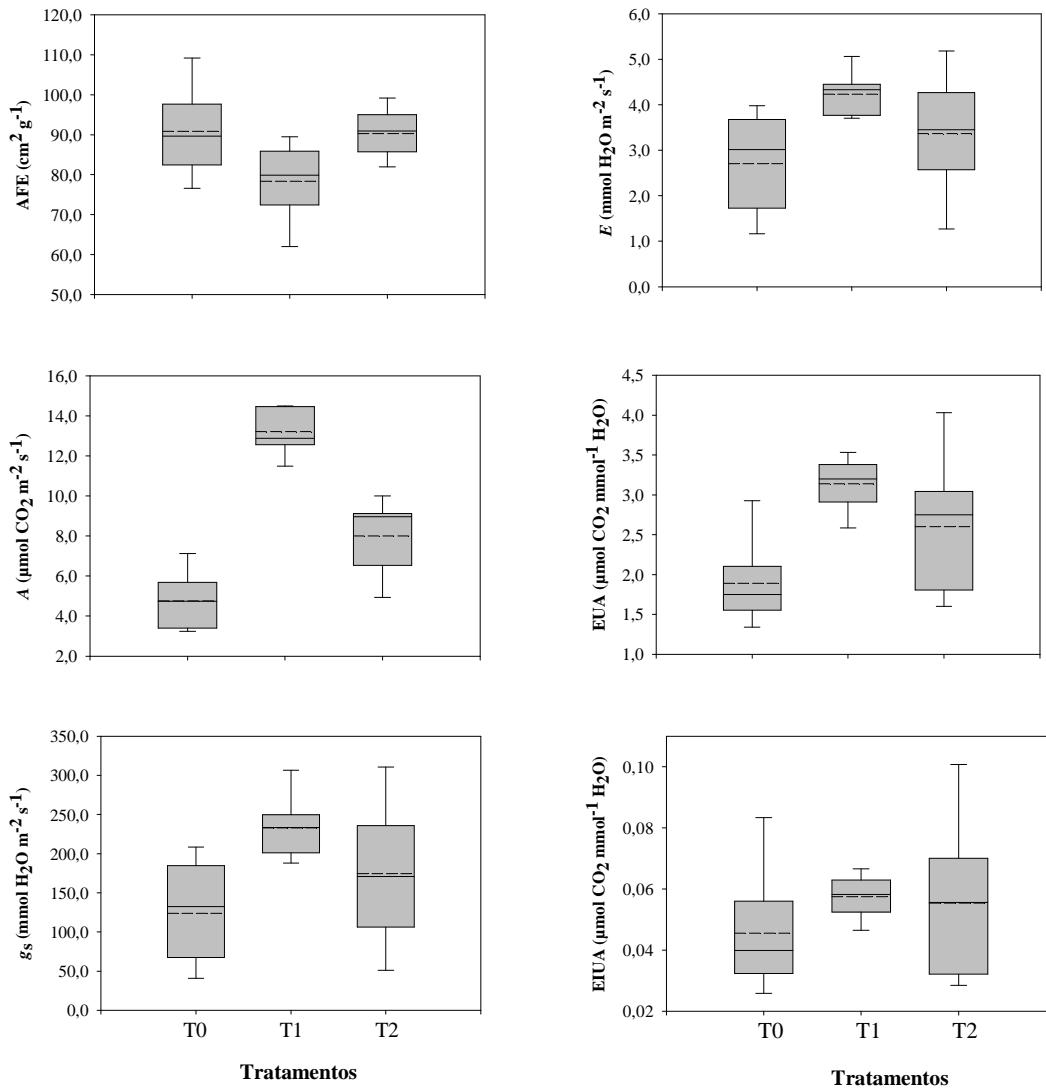


Figura 2 – Área foliar específica e trocas gasosas em plantas de *Bertholletia excelsa* em área de solo degradado submetidas a diferentes adubações (T0 = Controle, T1 = Adubação verde e T2 = Adubação química). AFE = Área foliar específica; A = fotossíntese líquida; g_s = condutância estomática; E = transpiração; EUA = eficiência no uso da água e EIUA = eficiência intrínseca no uso da água (n = 10).

A aplicação dos tratamentos de adubação, especialmente o tratamento T1, resultou em aumentos consideráveis nas taxas fotossintéticas, os quais compensaram as maiores taxas de transpiração refletindo no incremento da eficiência no uso da água (EUA). Estes valores foram 66 e 38% mais elevados nos tratamentos T1 e T2, respectivamente, quando comparados ao tratamento T0 (Figura 2).

No entanto, não foram observadas diferenças no que diz respeito à eficiência intrínseca no uso da água (EIUA) entre os três tratamentos. Maiores valores de A são, normalmente, acompanhados de elevadas taxas de E e g_s para diversas espécies na região tropical (Reich et al, 1999; Nogueira et al, 2004; Santiago & Wright, 2007). A relação significativa e positiva entre as variáveis A e g_s encontrada neste estudo, corrobora com esta afirmativa ($r = 0,74$, $r^2_{adj} = 0,53$, $P < 0,001$) (Figura 3).

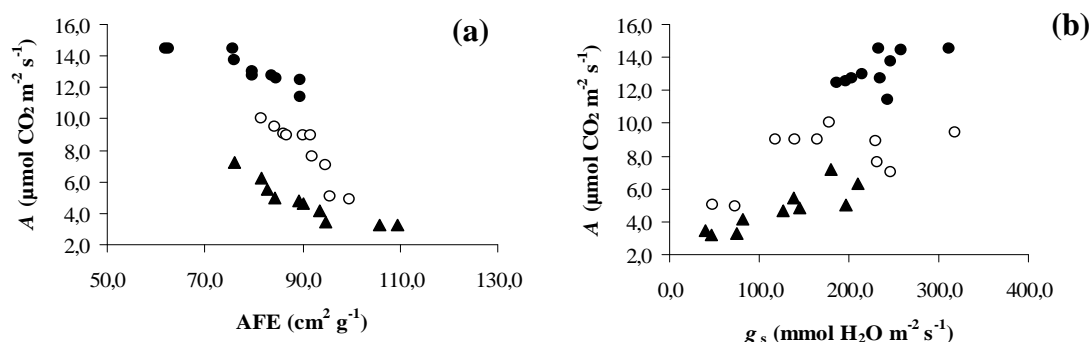


Figura 3 - Relação entre a taxa de assimilação de CO_2 (A) e (a) área foliar específica (AFE); (b) condutância estomática (g_s) para os indivíduos de *Bertholhetia excelsa* em área degradada submetidos a diferentes tipos de adubação. T0 (▲) = Controle; T1 (●) = Adubação verde; T2 (○) Adubação química (n = 30).

A manutenção de elevadas taxas fotossintéticas associadas com menores valores de g_s e E são características de plantas tolerantes a menor disponibilidade de água no solo, que é refletido pela maior EUA e EIUA (Ma et al, 2004). Em ambientes com limitada disponibilidade de recursos (H_2O e nutrientes, principalmente), como é o caso de áreas degradadas, o incremento desses parâmetros é essencial para o pleno estabelecimento das plantas (Liang et al, 2006; Funk & Vitousek, 2007; Li et al, 2008; Silva et al, 2008). Neste sentido, os resultados desse estudo mostraram que os tratamentos de adubação foram eficientes na promoção do parâmetro EUA pelas plantas de *B. excelsa*, com destaque para o tratamento T1, principalmente, em função da elevação na taxa de A desta espécie quando comparada à condição do tratamento controle (T0). Portanto, são visíveis os efeitos benéficos proporcionados pelos tratamentos de adubação em relação à melhoria na utilização dos recursos primários, água, em particular, pelas plantas de *B. excelsa* em área de solo degradado.

CONCLUSÃO GERAL

Os tratamentos de adubação mostraram-se eficazes quanto ao aumento na disponibilidade da maioria dos nutrientes do solo. Com relação ao crescimento verificou-se que apenas o tratamento de adubação verde (T1) resultou no maior incremento das alturas e diâmetros durante o período analisado, sendo estes cerca de 12 vezes superiores ao tratamento controle (T0). As plantas em T1 exibiram altas taxas de assimilação de carbono (177% maior do que T0); maiores valores de eficiência no uso de nutrientes; maiores teores de pigmentos cloroplastídicos foliares e melhor eficiência no uso da água. Como consequência, essas plantas sofreram menos estresse por alta irradiância, o que foi refletido nos maiores valores do índice de desempenho (P.I.), os quais foram cinco vezes mais elevados quando comparados àqueles das plantas do tratamento T0. De maneira geral, registra-se a necessidade da recuperação *a priori* da fertilidade do solo para implantação de plantios florestais como suporte à elaboração e desenvolvimento de programas de restauração de áreas degradadas na Amazônia. Também salienta-se a importância de pesquisas relacionadas à fisiologia das espécies, do nível de estresse e de aspectos nutricionais das plantas em relação aos diferentes tratamentos silviculturais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Introdução Geral⁴

- Arora, A.; Singh, V. P.; Mohan, J. 2001. Effect of nitrogen and water stress on photosynthesis and nitrogen content in wheat. *Biologia Plantarum*, 44(1): 153-155.
- Ashraf, M.; Ahmad, A.; Mcneilly, T. 2001. Growth and photosynthetic characteristics in pearl millet under water stress and different potassium supply. *Photosynthetica*, 39: 389-394.
- Chaudhary, M. I.; Adu-Gyamfi, J. J.; Saneoka, H.; Nguyen, N. T.; Suwa, R.; Kanai, S.; El-Shemy, H. A.; Lightfoot, D. A.; Fujita, K. 2008. The effect of phosphorus deficiency on nutrient uptake, nitrogen fixation and photosynthetic rate in mashbean, mungbean and soybean. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30: 537-544.
- Chauvel, A.; Grimaldi, M.; Tessier, D. 1991. Changes in soil pore-space distribution following deforestation and revegetation: an example from the Central Amazon Basin, Brazil. *Forest Ecology and Management*, 38: 259-271.
- Evans, J. R. 1989. Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves C₃ plants. *Oecologia*, 78: 9-19.
- Eyre, S. R. 1968. *Vegetation and Soils*. 328 pp.
- Fang, S.; Xie, B.; Liu, J. 2008. Soil nutrient availability, poplar growth and biomass production on degraded agricultural soil under fresh grass mulch. *Forest Ecology and Management*, 255: 1802-1809.
- Ford, C. W.; Wilson, J. R. 1981. Changes in levels of solutes during osmotic adjustment to water stress in leaves of four tropical pasture species. *Australian Journal of Plant Physiology*, 8: 77-91.
- Gonçalves, J. F. C.; Santos Júnior, 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: 307-313.
- Graciano, C.; Guiamet, J. J.; Goya, J. F. 2006. Fertilization and water stress interactions in young *Eucalyptus grandis* plants. *Canadian Journal of Forest Research*, 36: 1028-1034.

⁴ Escrito conforme as normas da revista Acta Amazônica

- Grimaldi, M.; Sarrazin, M.; Chauvel, A.; Luizão, F.; Rodriguez, M. R. L. 1992. Efeitos da vegetação e da ação do homem sobre a estrutura dos latossolos argilosos da Amazônia Brasileira. In: First International Symposium on Environmental Studies in Tropical Rain Forests. Rio de Janeiro, p. 25-29.
- Hartemink, A. E.; Veldkamp, T.; Bai, Z. 2008. Land cover change and soil fertility decline in tropical regions. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 32: 195-213.
- Jordan, C. F. 1985. *Nutrient Cycling in Tropical Forest Ecosystems*. 190 pp.
- Makoto, K.; Koike, T. 2007. Effects of nitrogen supply on photosynthetic and anatomical changes in current-year needles of *Pinus koraiensis* seedlings grown under two irradiances. *Photosynthetica*, 45 (1): 99-104.
- McGrath, D. A.; Ken Smith, C.; Gholz, H. L.; Oliveira, F. A. 2001. Effects of land-use change on soil nutrient dynamics in Amazônia. *Ecosystems*, 4: 625-645.
- Nussbaum, R.; Anderson, J.; Spencer, T. 1995. Factors limiting the growth of indigenous tree seedlings planted on degraded rainforest soils in Sabah, Malaysia. *Forest Ecology and Management*, 74: 149-159.
- Parrotta, J. A.; Turnbull, J. W.; Jones, N. 1997. Catalyzing native forest regeneration on degraded tropical lands. *Forest Ecology and Management*, 99: 1-7.
- Raghothama, K. G. 1999. Phosphate acquisition. *Annual Review of Plant Physiology: Plant Molecular Biology*, 50: 665-693.
- 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.
- Vance, C. P.; Uhde-Stone, C.; Allan, D. L. 2003. Phosphorus acquisition and use: critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 157: 423-447.

Capítulo I⁵

⁵ Escrito conforme as normas da revista Plant and Soil

- Albuquerque J A, Bayer, C, Ernani P R, Mafra A L, Fontana E C (2003) Aplicação de calcário e fósforo e estabilidade da estrutura de um solo ácido. *Revista Brasileira de Ciências do Solo* 27:799-806
- Alfaia S S, Muraoka T (1997) Efeito residual de calagem e micronutrientes em latossolo amarelo sob rotação de culturas. *Acta Amazônica* 27:153-162
- Andreotti M, Souza E C A, Cruscio C A C (2001) Componentes morfológicos e produção de matéria seca de milho em função da aplicação de calcário e zinco. *Scientia Agricola* 58:321-327
- Ashraf M, Ahmad A, Mcneilly T (2001) Growth and photosynthetic characteristics in pearl millet under water stress and different potassium supply. *Photosynthetica* 39:389-394
- Baligar V C, Fageria N K, He Z L (2001) Nutrient use efficiency in plants. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32:921-950
- Barbhuiya A R, Arunachalam A, Nath P C, Khan M L, Arunachalam K (2008) Leaf litter decomposition of dominant tree species of Namdapha National Park, Arunachal Pradesh, northeast India. *Journal of Forest Research* 13:25-34
- Blair G (1993) Nutrient efficiency—what do we really mean. *Genetic Aspects of Plant Mineral Nutrition*. pp. 205–213. In: P. J. Randall, E. Delhaize, R. A. Richards, and R. Munns. (eds.), Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands
- Bolan N S, Hedley M J, White R E (1991) Processes of soil acidification during nitrogen cycling with emphasis on legume based pastures. *Plant Soil* 134:53–63
- Bugbee B G (1996) Growth, analyses and yield components. pp. 115-119. In: Salisbury, F. B. (ed.), *Units, Symbols and Terminology for plant physiology*, Oxford University Press.
- Camargos S L, Muraoka T, Fernandes S A P, Salvador J O (2002) Diagnose nutricional em mudas de castanheira-do-Brasil. *Revista Agricultura Tropical* 6:89-107
- Carvalho M C S, van Raij B (1997) Calcium sulphate, phosphogypsum and calcium carbonate in the amelioration of acid subsoils for root growth. *Plant Soil* 192:37-48
- Chapin F S (1991) Integrated Responses of Plants to Stress. *BioScience* 41:29-36
- Chauvel A, Grimaldi M, Tessier D (1991) Changes in soil pore-space distribution following deforestation and revegetation: an example from the Central Amazon Basin, Brazil. *Forest Ecology and Management* 38:259–271

- Dau H, Haumann M (2007) Eight steps preceding O–O bond formation in oxygenic photosynthesis-A basic reaction cycle of the Photosystem II manganese complex. *Biochimica et Biophysica Acta* 1767:472–483
- Delucia E H, Heckathorn S A, Day T A (1992) Effects of soil temperature on growth, biomass allocation and resource acquisition of *Andropogon gerardii* Vitman. *New Phytologist* 120:543-549
- EMBRAPA (1997) Manual de Métodos de Análises de Solo. Centro Nacional de Pesquisas de Solos – CNPS. Rio de Janeiro. 212p
- EMBRAPA (1999) Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. Brasília. 370p
- Eyre S R (1968) *Vegetation and Soils*. 328 pp
- Fageria N K, Baligar V C, Li Y C (2008) The Role of Nutrient Efficient Plants in Improving Crop Yields in the Twenty First Century. *Journal of Plant Nutrition* 31:1121-1157
- Feng Y, Li X (2007) The combined effects of soil moisture and irradiance on growth, biomass allocation, morphology and photosynthesis in *Amomum villosum*. *Agroforest Systems* 71:89–98
- Fisch G (1990) Climatic Aspect of the Amazonian tropical Forest. *Acta Amazônica* 20:39–48
- Gonçalves J F C, Vieira G, Marengo R A, Ferraz J B S, Santos Júnior U M, Barros F C F (2005) Nutritional status and specific leaf area of mahogany and tonka bean under two light environments. *Acta Amazônica* 35:23-27
- Grimaldi M, Sarrazin M, Chauvel A, Luizão F, Rodriguez M R L (1992) Efeitos da vegetação e da ação do homem sobre a estrutura dos latossolos argilosos da Amazônia Brasileira. In: First International Symposium on Environmental Studies in Tropical Rain Forests 25–29
- Hayashida-Oliver Y, Boot R G A, Poorter L (2001) Influencia de La disponibilidad de agua y luz en El crecimiento y la morfologia de plantines de *Swietenia macrophylla*, *Cedrela odorata* y *Bertholletia excelsa*. *Ecologia en Bolivia* 35:51-60
- Haynes R J (1982) Effects of liming on phosphate availability in acid soils. *Plant Soil* 68:289-308
- Hoyt P B, Turner R C (1975) Effects of organic materials added to very acid soils on pH, aluminum, exchangeable NH₄, and crop yields. *Soil Science* 119:227–237
- Instituto Nacional de Pesquisa Espacial – INPE (2008) Home page: <http://www.inpe.br>

- Jordan C F (1985) Nutrient Cycling in Tropical Forest Ecosystems. 190 pp
- Koerselman W., Meuleman, A F M (1996) The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrients limitation. *Journal of Applied Ecology* 33, 1441–1450.
- Köppen W (1948) *Climatologia: um estudo de los climas de la tierra*. Fondo de Cultura Econômica, México
- Litton C M, Raich J W, Ryan M G R (2007) Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology* 13:2089–2109
- Marenco R A, Gonçalves J F C, Vieira G (2001) Photosynthesis and leaf nutrient contents in *Ochroma pyramidale* (Bombacaceae). *Photosynthetica* 39:539–543
- Marenco R A, Vieira G, Gonçalves J F C (2003) Leaf micronutrient concentrations and potential photosynthesis in *Ochroma pyramidale* established in a degraded land. *Acta Amazonica* 33:23–31
- Matzner E, Khanna P K, Meiwes K J, Ulrich B (1985) Effects of fertilization and liming on the chemical soil conditions and element distribution in forest soils. *Plant Soil* 87:405-415
- Mauchly J W (1940) Significance test for sphericity of a normal n-variate distribution. *Annals of Mathematical Statistics* 11:204-209
- Mesquita R C G, Ickes K, Ganade G, Williamson G B (2001) Alternative successional pathways in the Amazon Basin. *Journal of Ecology* 89:528-537
- Miyazawa M, Pavan M A, Muraoka T, Carmo C A F S, Mello W J (1999) Análise química de tecidos vegetais. In: Silva, F.C. (Ed.), *Manual de Análise Química de Solos, Plantas e Fertilizantes*. EMBRAPA, Brasília, Brasil, pp. 172–223
- Monaco L M, Mesquita R C G, Williamson G B (2003) Banco de sementes de uma floresta secundária amazônica dominada por *Vismia*. *Acta Amazônica* 33:41–52
- Morgan J M (1984) Osmoregulation and water stress in higher plants. *Annual Review of Plant Physiology* 35:299-319
- Mori S A (1992) The Brazil nut industry - past, present, and future. In: Plotkin, M. & Famolare, L. (Eds.). *Sustainable Harvest and Marketing of Rain Forest Products*, Island Press, Washington, D.C., p. 241 – 251
- Nepstad D C, Uhl C, Pereira CA, Silva JMC (1996) A comparative study of tree establishment in abandoned pasture and mature forest of eastern Amazonia. *Oikos* 76:25-39
- Noble AD, Randall PJ (1999) Alkalinity effects of different tree litters incubated in an acid soil of N.S.W., Australia. *Agroforest Systems* 46:147–160

- Noble A D, Zenneck I, Randall P J (1996) Leaf litter ash alkalinity and neutralisation of soil acidity. *Plant Soil* 179:293–302
- Nunes F N, Novais R F, Silva I R, Gebrim F O, José J F B (2004) Fluxo difusivo de ferro em solos sob influência de doses de fósforo e de níveis de acidez e umidade. *Revista Brasileira de Ciências do Solo* 28:423-429
- Pérez-Harguindeguy N, Diaz S, Cornelissen J H C, Vendramini F, Cabido M, Castellanos A (2000) Chemistry and toughness predict leaf litter decomposition rates over a wide spectrum of functional types and taxa in central Argentina. *Plant Soil* 218:21–30
- Poorter H, Remkes C, Lambers H (1990) Carbon and nitrogen economy of 24 wild species differing in relative growth rate. *Plant Physiology* 94:621-627
- Raymond J, Blankenship R E (2008) The origin of the oxygen-evolving complex. *Coordination Chemistry Reviews* 252:377–383
- Rosolem C A, Foloni J S S, Oliveira R H (2003) Dinâmica do nitrogênio no solo em razão da calagem e adubação nitrogenada, com palha na superfície. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 38:301-309
- Santos Júnior (2008) Fisiologia e indicadores de estresse em árvores crescendo em ambientes alagados pela Hidroelétrica de Balbina na Amazônia central. Tese de doutorado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia
- 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
- Sauer K, Yachandra V K (2004) The water-oxidation complex in photosynthesis. *Biochimica et Biophysica Acta* 1655:140– 148
- Silva N M, Ferraz C A M, Rodrigues Filho F S O (1980) Emprego de calcário e de superfosfato simples na cultura do algodoeiro em solo argiloso ácido. *Bragantia* 39:39-50
- Silva C E M, Gonçalves J F C, Feldpausch T R (2008) Water-use efficiency of tree species following calcium and phosphorus application on an abandoned pasture, central Amazonia, Brazil. *Environmental and Experimental Botany* 64:189-195
- 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 Amazônica* 36:503–512

- Souza C R, Lima R M B, Azevedo C P, Rossi L M B (2008) Desempenho de espécies florestais para uso múltiplo na Amazônia. *Scientia Forestalis* 36:7-14
- StatSoft Inc. (2003) Statistica (data analysis software system), version 6.0
- Tang C, Yu Q (1999) Impact of chemical composition of legume residues and initial soil pH on pH change of a soil after residue incorporation. *Plant Soil* 215:29–38
- Tonini H, Arco-Verde M F, Sá S P P (2005) Dendrometria de espécies nativas em plantios homogêneos no Estado de Roraima – Andiroba (*Carampa guianensis* Aubl), Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), Ipê-roxo (*Tabebuia avellaneda* Lorentz ex Griseb) e Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.). *Acta Amazônica*. 35:353–362
- 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* 18:151-158
- Valeri S V, Corradini L, Aguiar I B, Souza E C A, Banzatto D A (1985) Efeitos do fósforo e calcário dolomítico no desenvolvimento inicial de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden plantado em um regossolo. *IPEF* 29:55-60
- Veloso H P, Rangel Filho A L R, Lima J C A (1991) Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal. IBGE, Rio de Janeiro
- Vitti G C, Ferreira A C (1997) Síntese de análises químicas em tecido vegetal. ESALQ – Departamento de Ciência do Solo
- Vrettos J S, Daniel A S, Gary W B (2001) Quantifying the ion selectivity of the Ca^{+2} site in photosystem II: Evidence for direct involvement of Ca^{+2} in O_2 formation. *Biochemistry* 40:7937-7945
- Xiong Y, Xia H, Li Z, Cai X, Fu S (2008) Impacts of litter and understory removal on soil properties in a subtropical *Acacia mangium* plantation in China. *Plant Soil* 304:179–188
- Yadavi V, Malanson G (2007) Progress in soil organic matter research: litter decomposition, modelling, monitoring and sequestration. *Progress in Physical Geography* 31:131–154
- Yared J A G (1990) Silvicultura de algumas espécies nativas da Amazônia. In: Congresso Florestal Brasileiro. 119–122 p

Capítulo II⁶

- Argenta, G., Silva, P.R.F., Bertoloni, C.G.: Clorofila na folha como indicador do nível de nitrogênio em cereais. - *Ciência Rural* **31**: 715-722, 2001.
- Engel, V.L., Poggiani, F.: Estudo da concentração de clorofila nas folhas e seu espectro de absorção de luz em função do sombreamento em mudas de quatro espécies florestais nativas. – *Brazilian Journal of Plant Physiology* **3**: 39-45, 1991.
- Evans, J.R.: Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves C₃ plants. – *Oecologia* **78**: 9-19, 1989.
- Fisch, G.: Climatic Aspect of the Amazonian tropical Forest. - *Acta Amazônica* **20**: 39–48, 1990.
- Fritschi, F.B., Ray, J. D.: Soybean leaf nitrogen, chlorophyll content, and chlorophyll *a/b* ratio. – *Photosynthetica* **45**: 92-98, 2007.
- Gebrekirstos, A., Teketay, D., Fetene, M., Mitlohner, R.: Adaptation of five co-occurring tree and shrub species to water stress and its implication in restoration of degraded lands. - *Forest Ecology and Management* **229**: 259–267, 2006.
- Gonçalves, J.F.C., Barreto, D.C.S., Santos Júnior, U.M., Fernandes, A.V., Sampaio, P.T.B., Buckeridge, M.S.: Growth, photosynthesis and stress indicators in young rosewood plants (*Aniba rosaeodora* Ducke) under different light intensities. - *Brazilian Journal of Plant Physiology* **17**: 325–334, 2005.
- Gonçalves, J.F.C., Marengo, R.A., Vieira, G.: Concentration of photosynthetic pigments and chlorophyll fluorescence of mahogany and tonka bean under two light environments. - *Brazilian Journal of Plant Physiology* **13**: 149–157, 2001.
- Gonçalves, J.F.C., Santos Júnior, U.M.: 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**: 307–313, 2005.
- Gonçalves, J.F.C., Santos Júnior, U.M., Nina Júnior, A.R., Chevreuil, L.R.: Energetic flux and performance index in copaíba (*Copaifera multijuga* Hayne) and mahogany (*Swietenia macrophylla* King) seedlings grown under two irradiance environments. - *Brazilian Journal of Plant Physiology* **19**: 171–184, 2007.

⁶ Escrito conforme as normas da revista *Photosynthetica*

- Gonçalves, J.F.C., Vieira, G., Marengo, R.A., Ferraz, J.B.S., Santos Júnior, U.M., Barros, F.C.F.: Nutritional status and specific leaf area of mahogany and tonka bean under two light environments. - *Acta Amazônica* **35**: 23-27, 2005.
- Hendry, G.A.F., Price, A.H.: Stress indicators: chlorophylls and carotenoids. In: Hendry, G.A.F., Grime, J.P. (Eds). - *Methods in Comparative Plant Ecology*: 148-152, 1993.
- Jiao, S., Emmanuel, H., Guikema, J.A.: High light stress inducing photoinhibition and protein degradation of photosystem I in *Brassica rapa*. - *Plant Science* **167**: 733–741, 2004.
- Kirkby, E.A., Römheld, V.: Micronutrientes na fisiologia de plantas: funções, absorção e mobilidade. - *International Plant Nutrition Institute* **118**: 24 p, 2007.
- Köppen, W.: *Climatologia: um estudo de los climas de la tierra*. - Fondo de Cultura Económica, México, 1948.
- Larcher, W.: *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups*. 4th Ed. – Springer-Verlag, Berlin 2003.
- Lichtenthaler, H.K., Wellburn, A.R.: Determination of total carotenoids and chlorophyll *a* and *b* of leaf extracts in different solvents. - *Biochemical Society Transactions*: 591-603, 1983.
- Liu, P., Yang, Y.S., Xu, G., Hao, C.: Physiological response of rare endangered seven-son-flower (*Heptacodium miconioides*) to light stress under habitat fragmentation. - *Environmental and Experimental Botany* **57**: 32–40, 2006.
- Makoto, K., Koike, T.: Effects of nitrogen supply on photosynthetic and anatomical changes in current-year needles of *Pinus koraiensis* seedlings grown under two irradiances. – *Photosynthetica* **45**: 99-104, 2007.
- Marengo, R.A., Gonçalves, J.F.C., Vieira, G.: Photosynthesis and leaf nutrient contents in *Ochroma pyramidale* (Bombacaceae). - *Photosynthetica* **39**: 539–543, 2001.
- Mauromicale, G., Ierna, A., Marchese, M.: Chlorophyll fluorescence and chlorophyll content in field-grown potato as affected by nitrogen supply, genotype, and plant age. – *Photosynthetica* **44**: 76-82, 2006.
- Morais, R. R.: *Ecofisiologia de espécies arbóreas crescidas sob condições de plantios na Amazônia Central*. - Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia/Universidade Federal do Amazonas, Manaus (AM): 158 p., 2003.

- Morais, R.R., Gonçalves, J.F.C., Santos Júnior, U.M., Dunisch, O., Santos, A.L.W.: Chloroplastid pigment contents and chlorophyll a fluorescence in amazonian tropical three species. - *Revista Árvore* **31**: 955–966, 2007.
- Mori, S.A.: The Brazil nut industry - past, present, and future. In: Plotkin, M. & Famolare, L. (Eds.). *Sustainable Harvest and Marketing of Rain Forest Products*, Island Press, Washington, D.C., p. 241 – 251, 1992.
- Mori, S.A., Prance, G.T.: Taxonomy, Ecology, and Economic Botany of the Brazil nut (*Bertholletia excelsa* Humb. and Bonpl.: Lecythidaceae). - *Advances Economic Botany* **8**: 130-50, 1990.
- Pezzopane, J.E.M., Reis, G.G., Reis, M.G.F., Higuchi, P., Polli, H.Q.: Aspectos ecofisiológicos de algumas espécies arbóreas em uma floresta estacional semidecidual secundária. - *Revista Brasileira de Agrometeorologia* **10**: 273–281, 2002.
- Prance, G.T., Mori, S.A.: Lecythidaceae--Part I. The Actinomorphic-Flowered New World Lecythidaceae (*Asteranthos*, *Gustavia*, *Grias*, *Allantoma*, and *Cariniana*). - *Flora Neotropical Monography* **21**: 1-270, 1979.
- Puerta, R.: Regeneração arbórea em pastagens abandonadas na região de Manaus em função da distância da floresta contínua. - *Scientia Forestalis* **62**: 32-19, 2002.
- Salomão, R.P., Henriques, J.C.C., Matos, A.H., Rosa, N.A., Castilho, A.F.: Castanheira-do-Brasil recuperando áreas degradadas e provendo alimento e renda para as comunidades amazônicas. – *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi* **1**:65-78, 2006.
- Santos Júnior, U.M., Gonçalves, J.F.C., Feldpausch, T.R.: 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, 2006.
- Schelemmer, M.R., Shanaham, J.F., Francis, D.D., Schepers, J.S.: Remotely measuring chlorophyll content in corn leaves with differing nitrogen levels and relative water content. - *Agronomy Journal* **97**: 106-112, 2005.
- Silva, C.E.M., Gonçalves, J.F.C., Feudpausch, T.R.: Water-use efficiency of trees species following calcium and phosphorus application on an abandoned pasture, central Amazonia, Brazil. – *Environmental and Experimental Botany* **64**:189-195, 2008.

- Silva, C.E.M., Gonçalves, J.F.C., Feldpausch, T.R., Luizão, F.J., Morais, R.R., Ribeiro, G.O.: Eficiência no uso dos nutrientes por espécies pioneiras crescidas em pastagens degradadas na Amazônia Central. - *Acta Amazônica* **36**:503–512, 2006.
- Souza, C.R., Lima, R.M.B., Azevedo, C.P., Rossi, L.M.B.: Desempenho de espécies florestais para uso múltiplo na Amazônia. – *Scientia Forestalis* **36**: 7-14, 2008.
- SPSS Inc.: Sigmaplot software, version 8.0, 2002.
- StatSoft Inc.: Statistica (data analysis software system), version 6.0, 2003.
- Strasser, R.J., Srivastava, A., Tsimilli-Michael, M.: Screening the vitality and photosynthetic activity of plants by fluorescence transient. In: Behl, R.K., Punia, M.S., Lather, B.P.S. (Eds). - *Crop Improvement for Food Security*: 79-126, 1999.
- Tonini, H., Oliveira Junior, M.M.C., Schwengber, D.: Crescimento de espécies nativas da Amazônia submetidas ao plantio no estado de Roraima. – *Ciência Florestal* **18**: 151-158, 2008.
- Veloso, H.P., Rangel Filho, A.L.R., Lima, J.C.A.: Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal. IBGE, Rio de Janeiro, 1991.

Capítulo III⁷

- Achard, F.; Eva, H. D.; Stibig, H.; Mayaux, P.; Gallego, J.; Richards, T.; Malingreau, J. 2002. Determination of Deforestation Rates of the World's Humid Tropical Forests. *Science*, 297: 999-1002.
- Améglio, T.; Archer, P.; Cohen, M.; Valancogne, C.; Daudet F.; Dayau, S.; Cruiziat, P. 1999. Significance and limits in the use of predawn leaf water potential for tree irrigation. *Plant & Soil*, 207: 155–167.
- Anyia, A. O.; Herzog, H. 2004. Water-use efficiency, leaf area and leaf gas exchange of cowpeas under mid-season drought. *European Journal of Agronomy*, 20: 327–339.
- Bjorkman, O.; Powles, S. B. 1984. Water stress and photoinhibition of photosynthesis. *Planta*, 161: 490-504.
- Buckley, T. N. 2005. The control of stomata by water balance. *New Phytologist*, 168: 275-292.
- Cai, Z. Q.; Poorter, L.; Han, Q.; Bongers, F. 2008. Effects of light and nutrients on seedlings of tropical *Bauhinia* lianas and trees. *Tree Physiology*, 28: 1277–1285.

⁷ Escrito conforme as normas da revista *Acta Amazônica*

- Cernusak, L. A.; Aranda, J.; Marshall, J. D.; Winter, K. 2007. Large variation in whole-plant water-use efficiency among tropical tree species. *New Phytologist*, 173: 294-305.
- Davis, S. D.; Mooney, H. A. 1986. Water use patterns of four co-occurring chaparral shrubs. *Oecologia*, 70:172-177.
- Diniz, M. C. M. M. 1999. Desenvolvimento e rebrota da cunhã (*Clitoria ternatea* L.) sob estresse hídrico, em associação com fungos micorrízicos - *Bradyrhizobium*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife (PE). 156 p.
- Evans, J. R.; Pooter, 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 & Environment*, 24(8): 755 - 767.
- Farquhar, G. D.; Sharkey, T. D. 1982. Stomatal conductance and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology*, 33: 317 – 345.
- Fisch, G. 1990. Climatic aspect of the Amazonian tropical forest. *Acta Amazônica*, 20: 39–48.
- Funk, J. L.; Vitousek, P. M. 2007. Resource-use efficiency and plant invasion in low-resource systems. *Nature*, 446: 1079-1081.
- Gonçalves, J. F. C.; Vieira, G.; Marengo, R. A.; Ferraz, J. B. S.; Santos Júnior, U. M.; Barros, F. C. F. 2005. Nutritional status and specific leaf area of mahogany and tonka bean under two light environments. *Acta Amazônica*, 35(1): 23-27.
- Hsiao, T. C. 1973. Plant responses to water stress. *Annual Review of Plant Physiology*, 24: 519-570.
- Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia (IMAZON). 2007. Home Page: <http://www.imazon.org.br>.
- Köppen, W. 1948. Climatologia: um estúdio de los climas de la tierra. *Fondo de Cultura Económica*, México.
- Larcher, W. 2003. *Physiological Plant Ecology: Ecophysiology and Stress Physiology of Functional Groups*. Springer. 513 p.
- Laurance, W. F.; Albernaz, A. K. M.; Fearnside, P. M.; Vasconcelos, H. L.; Ferreira, L. V. 2004. Deforestation in Amazonia. *Science*, 304: 1109.
- Li, F.; Bao, W.; Wu, N.; You, C. 2008. Growth, biomass partitioning, and water-use efficiency of a leguminous shrub (*Bauhinia faberi* var. *microphylla*) in response to various water availabilities. *New Forests*, 36: 53-65.

- Liang, Z.; Yang, J.; Shao, H.; Hana, R. 2006. Investigation on water consumption characteristics and water use efficiency of poplar under soil water deficits on the Loess Plateau. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 53: 23-28.
- Liberato, M. A. R.; Gonçalves, J. F. C.; Chevreuil, L. R.; Nina Júnior, A. R.; Fernandes, A. V.; Santos Júnior, U. M. 2006. Leaf water potential, gas exchange and chlorophyll a fluorescence in acariquara seedlings (*Minquartia grianensis* Aubl.) under water stress and recovery. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(2): 315-323.
- Ma, C. C.; Gao, Y. B.; Guo, H. Y.; Wang, J. L. 2004. Photosynthesis, transpiration and water use efficiency of *Caragana microphylla*, *C. intermedia* and *C. korshinskii*. *Photosynthetica*, 42 (1): 65-70.
- Marengo, R. A.; Gonçalves, J. F. C.; Vieira, G. 2001. Photosynthesis and leaf nutrient contents in *Ochroma pyramidale* (Bombacaceae). *Photosynthetica*, 39(4): 539-543.
- Mori, S. A. 1992. The Brazil nut industry - past, present, and future. In: Plotkin, M.; Famolare, L. (eds.). *Sustainable Harvest and Marketing of Rain Forest Products*, pp. 241-251. Island Press, Washington, D.C.
- Nogueira, A.; Martinez, C. A.; Ferreira, L. L.; Prado, C. H. B. A. 2004. Photosynthesis and water use efficiency in twenty tropical tree species of differing succession status in a Brazilian reforestation. *Photosynthetica*, 42(3): 351-356.
- Nogueira, R. J. M. C.; Moraes, J. A. P. V.; Burity, H. A. 2000. Curso diário e sazonal das trocas gasosas e do potencial hídrico foliar em aceroleiras. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35(7): 1331-1342.
- Portes, M. T.; Alves, T. H.; Souza, G. M. 2006. Water deficit affects photosynthetic induction in *Bauhinia forficata* Link (Fabaceae) and *Esenbeckia leiocarpa* Engl. (Rutaceae) growing in understory and gap conditions. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 18(4): 491-502.
- Puerta, R. 2002. Regeneração arbórea em pastagens abandonadas na região de Manaus em função da distância da floresta contínua. *Scientia Florestalis*, 62: 32-39.
- Rajendrudu, G. & Naidu, C. V. 1997. Effects of water stress on leaf growth and photosynthetic and transpiration rates of *Tectona grandis*. *Biologia Plantarum*, 40(2): 229-234.
- Reich, P. B.; Ellsworth, D. S.; Walters, M. B.; Vose, J. M.; Gresham, C.; Voun, J. C.; Bowman, W. D. 1999. Generality of leaf trait relationships: A test across six biomes. *Ecology*, 80(6): 1955-1969.

- Resco, V.; Ignace, D. D., Sun, W.; Huxman, T. E.; Weltzin, J. F.; Williams, D. G. 2008. Chlorophyll fluorescence, predawn water potential and photosynthesis in precipitation pulse-driven ecosystems – implications for ecological studies. *Functional Ecology*, 22: 479–483.
- Rossi, A.; Rufato, L.; Giacobbo, C. L.; Costa, V. B.; Vitti, M. R.; Mendez, M. E. G.; Fachinello, J. C. 2007. Diferentes manejos da cobertura vegetal de aveia preta em pomar no sul do brasil. *Bragantia*, 66(3): 457-463.
- Santiago, L. S.; Wright, S. J. 2007. Leaf functional traits of tropical forest plants in relation to growth form. *Functional Ecology* 21: 19-27.
- 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.
- Sato, T.; Abdalla, O. S.; Oweis, T. Y.; Sakuratani, T. 2006. The validity of predawn leaf water potential as an irrigation-timing indicator for field-grown wheat in northern Syria. *Agricultural Water Management*, 82: 223–236.
- Scholander, P. F.; Hammel, H. T.; Hemmingsen, E. A.; Bradstreet, E. D. 1964. Hydrostatic pressure and osmotic potential in leaves of mangroves and some other plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 52 (1): 119-125.
- Silva, C. E. M.; Gonçalves, J. F. C.; Feldpausch, T. R. 2008. Water-use efficiency of tree species following calcium and phosphorus application on an abandoned pasture, central Amazonia, Brazil. *Environmental and Experimental Botany*, 64: 189-195.
- 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 Amazônica*, 36(4): 503-512.
- Souza, C. R.; Lima, R. M. B.; Azevedo, C. P.; Rossi, L. M. B. 2008. Desempenho de espécies florestais para uso múltiplo na Amazônia. *Scientia Forestalis*, 36:7-14.
- SPSS Inc. 2002. Sigmaplot software, version 8.0.
- StatSoft Inc. 2003. Statistica (data analysis software system), version 6.0.
- Tonini, H.; Arco-Verde, M. F.; Sá, S. P. P. 2005. Dendrometria de espécies nativas em plantios homogêneos no Estado de Roraima – Andiroba (*Carampa guianensis* Aubl), Castanha-do-Brasil (*Bertholletia excelsa* Bonpl.), Ipê-roxo (*Tabebuia*

avellanadae Lorentz ex Griseb) e Jatobá (*Hymenaea courbaril* L.). *Acta Amazônica*, 35: 353–362

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: 151-158.

Veloso, H. P.; Rangel Filho, A. L. R.; Lima, J. C. A. 1991. Classificação da vegetação brasileira adaptada a um sistema universal. IBGE, Rio de Janeiro.

Yared, J. A. G. 1990. Silvicultura de algumas espécies nativas da Amazônia. In: Congresso Florestal Brasileiro. 119–122 p

Yokota, A.; Takahara, K.; Akashi, K. 2006. Water stress. In: Madhava Rao, K. V.; Raghavendra, A. S.; Janardhan Reddy, K. (Eds.). *Physiology and Molecular Biology of Stress Tolerance in Plants*. Springer, Netherlands. p. 15–39.