

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA**

**FLUXOS E ESTOQUES DE NUTRIENTES, COLONIZAÇÃO POR
MICORRIZAS ARBÚSCULARES E INFLUÊNCIA DAS RAÍZES NA
DECOMPOSIÇÃO DA LITEIRA EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS E
EM VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA NA AMAZÔNIA CENTRAL.**

GUILHERME CASTILHO DA SILVA

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais do convênio INPA/UFAM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências Biológicas, área de concentração em Ecologia.

**MANAUS - AM
2005**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS – UFAM
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS DA AMAZÔNIA - INPA**

**FLUXOS E ESTOQUES DE NUTRIENTES, COLONIZAÇÃO POR
MICORRIZAS ARBUSCULARES E INFLUÊNCIA DAS RAÍZES NA
DECOMPOSIÇÃO DA LITEIRA EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS
E EM VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA NA AMAZÔNIA CENTRAL.**

GUILHERME CASTILHO DA SILVA

ORIENTADORA:

Regina Celi Costa Luizão, Ph.D.

Tese de doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Tropical e Recursos Naturais do convênio INPA/UFAM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Ciências Biológicas, área de concentração em Ecologia.

Fontes Financiadoras: Projeto de Grande Escala Biosfera – Atmosfera (LBA), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e Conselho de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

**MANAUS - AM
2005**

Silva, Guilherme Castilho da

Fluxos e estoques de nutrientes, colonização por micorrizas arbusculares e influência das raízes na decomposição da liteira em sistemas agroflorestais e em vegetação secundária na Amazônia central./ Guilherme Castilho da Silva – Manaus – INPA/UFAM, 2005.

155 f. : il.

Tese (doutorado) – INPA/UFAM.

1. Sistemas agroflorestais 2. Fluxo de nutrientes 3. Micorrizas arbusculares

4. Decomposição da liteira 5. Amazônia. I. Título.

CDD 19. ed. 574.52642

Sinopse:

Estudou-se os fluxos e os estoques de nutrientes, a colonização de micorrizas arbusculares e a taxa de decomposição da liteira de *Theobroma grandiflorum* (cupuaçu) em diferentes formulações de sistemas agroflorestais e em vegetação secundária (capoeira) da Amazônia central, com o objetivo de avaliar a capacidade dos sistemas agroflorestais na recuperação de ambientes abandonados e/ou degradados.

Palavras-chave: fluxos de nutrientes, estoques de nutrientes, micorrizas arbusculares, decomposição da liteira, sistemas agroflorestais, raízes finas, liteira acumulada, sustentabilidade, ciclagem de nutrientes, ecologia, Amazônia.

ÍNDICE

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
CAPÍTULO I.....	6
INTRODUÇÃO GERAL.....	8
O Ecossistema Amazônico.....	8
OBJETIVOS.....	20
CAPÍTULO II.....	21
ÁREA DE ESTUDO.....	21
Localização da Área de Estudo.....	21
Clima e Geomorfologia.....	21
Descrição do Distrito Agropecuário da Suframa.....	23
Histórico de Ocupação da Área.....	24
Sistemas Agroflorestais.....	25
Delineamento dos Sistemas Agroflorestais Implantados no DAS.....	26
CAPÍTULO III.....	31
ESTOQUE E QUALIDADE DA LITEIRA DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS E VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA NA AMAZÔNIA CENTRAL.....	31
INTRODUÇÃO.....	31
OBJETIVO GERAL.....	33
MATERIAIS E MÉTODOS.....	34
Área de Estudo.....	34
Amostragens.....	34
Análises Químicas.....	37
Estoques de Carbono e Nutrientes na Liteira.....	38
Análise dos Dados.....	38
RESULTADOS.....	39
Massa Seca de Liteira.....	39
Qualidade Nutricional da Liteira.....	42
Estoques de Macro e Microelementos na Liteira.....	46
DISCUSSÃO.....	51
Liteira Acumulada.....	51
Qualidade Nutricional da Liteira.....	56
Estoques de Macro e Microelementos na Liteira.....	61
CONCLUSÕES.....	67
CAPÍTULO IV.....	68
BIOMASSA DE RAÍZES E DECOMPOSIÇÃO DA LITEIRA EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS E VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA DA AMAZÔNIA CENTRAL.....	68
INTRODUÇÃO.....	68
OBJETIVO GERAL.....	69
MATERIAIS E MÉTODOS.....	69
A técnica dos Sacos de Malha.....	69
Área de Estudo.....	70

Taxas de Decomposição.....	71
Análises Químicas.....	71
Análise dos Dados.....	72
RESULTADOS	73
Concentrações Iniciais dos Elementos na Liteira	73
Biomassa das Raízes Finas.....	73
Massa Seca de Liteira Residual	75
Taxas de Decomposição.....	77
Concentrações de Macro e Micronutrientes na Liteira Residual.....	77
Porcentagens de Nitrogênio, Carbono e Relação C:N da Liteira Residual	87
DISCUSSÃO	93
Biomassa das Raízes Finas.....	93
Taxa de Decomposição da Liteira.....	94
Porcentagens de Carbono e Nitrogênio e Relação C:N da Liteira Residual	95
Concentrações de Nutrientes na Liteira Residual	96
CONCLUSÕES	100
CAPÍTULO V	101
FLUXO DE NUTRIENTES E COLONIZAÇÃO DE MICORRIZAS ARBUSCULARES NO SOLO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS E VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA DA AMAZÔNIA CENTRAL.....	101
INTRODUÇÃO.....	101
OBJETIVO GERAL.....	107
MATERIAIS E MÉTODOS	107
Área de Estudo.....	107
Amostragem.....	108
Colonização de Micorrizas Arbusculares.....	108
Umidade do Solo.....	109
Acidez Real.....	110
Concentração de Nutrientes no Solo	110
Análise dos Dados.....	112
RESULTADOS	113
Umidade, pH e Nutrientes do Solo	113
Camada Orgânica do Solo (de 0 – 10cm de Profundidade)	116
Camada Mineral do Solo (de 20 – 30 cm de Profundidade)	119
Colonização de Micorrizas Arbusculares.....	121
Camada Orgânica do Solo (de 0 - 10cm de Profundidade).....	122
Camada Mineral do Solo (de 20 - 30cm de Profundidade).....	123
DISCUSSÃO	126
Umidade, pH e Nutrientes do Solo	126
Colonização por Micorrizas Arbusculares	132
CONCLUSÕES	142
CONSIDERAÇÕES FINAIS	143
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	145

Resumo

Todos os ecossistemas naturais são dependentes de uma eficiente ciclagem interna de nutrientes para a manutenção de seu funcionamento. Os desmatamentos, que ocorrem atualmente na floresta amazônica brasileira perturbam a ciclagem de nutrientes e diminuem a fertilidade natural do solo. Quando a fertilidade natural do solo diminui, o ambiente é abandonado e novas áreas de florestas primárias são desmatadas. Ambientes abandonados podem desenvolver uma forma de vegetação secundária denominada por capoeira e, dependendo da intensidade de perturbação podem ocorrer a erosão do solo e, futuramente, a desertificação. Para evitar a perda da fertilidade do solo de ambientes perturbados e/ou abandonados foram desenvolvidas algumas técnicas de manejo ambiental, entre elas a implantação de sistemas agroflorestais (SAFs). O objetivo geral deste estudo foi avaliar a influência do uso dos SAFs e da capoeira na recuperação dos ambientes abandonados. As variáveis avaliadas nestes dois tipos de cobertura vegetal foram: a quantidade e a qualidade de nutrientes na liteira (Capítulo 3), a influência das raízes finas do cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) na decomposição da liteira (Capítulo 4) e o fluxo de nutrientes no solo e a colonização das raízes por fungos micorrízicos formadores de arbúsculos (Capítulo 5). Os SAFs estudados foram implantados em 1991 no campo experimental da EMBRAPA - CPAA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Ocidental), situada no Distrito Agropecuário da SUFRAMA (DAS), ao norte de Manaus, no km 51 da rodovia BR-174 (Manaus - Boa Vista). Três tipos de SAFs foram incluídos no estudo: (1) SAFs baseado em palmeiras; (2) baseado em fruteiras e (3) baseado em pastagens (sistema agrossilvopastoril). As áreas de capoeiras utilizadas neste estudo foram delimitadas próximas aos SAFs. As massas de liteira acumulada sobre o solo foram maiores na capoeira ($5,9 \text{ t ha}^{-1}$) do que nos SAFs. No entanto, os estoques de cálcio ($47,8 \text{ kg ha}^{-1}$), fósforo ($4,4 \text{ kg ha}^{-1}$), magnésio ($7,1 \text{ kg ha}^{-1}$) e manganês ($0,69 \text{ kg ha}^{-1}$) foram maiores na liteira dos SAFs do que na capoeira. As porcentagens de polifenóis na liteira foram maiores no SAF baseado em fruteiras e na capoeira (1,6% em ambos). O pH do solo foi menos ácido (4,5) e as concentrações de fósforo ($68,8 \text{ mg kg}^{-1}$) foram maiores nos SAFs do que na capoeira, principalmente na camada superficial do solo. As taxas de colonização de micorrizas arbusculares nas raízes foram maiores no SAF baseado em pastagens (35,8%), principalmente na camada superficial do solo. As raízes finas do cupuaçu mostraram um efeito positivo na absorção dos nutrientes cálcio, magnésio e manganês da liteira em decomposição quando comparado com a liteira onde as raízes foram excluídas do processo de decomposição. Este estudo concluiu que os SAFs são técnicas de manejo eficientes, visando a recuperação da fertilidade natural dos solos de ambientes abandonados e/ou degradados da floresta amazônica. Contudo, novos estudos são necessários para determinar se SAFs de alta diversidade podem intensificar esta recuperação.

Abstract

All natural ecosystems are dependent on efficient internal nutrients cycling to maintain functionality. Deforestation occurring in the Brazilian Amazonian disturbs the nutrient cycle and diminishes natural soil fertility. When soil fertility diminishes, the land is abandoned and new areas of primary forest are cut. Abandoned sites generally develop a secondary forest vegetation. However, depending on the intensity of use prior to abandonment, soil erosion can occur and possibly desertification. To prevent the loss of the soil fertility of disturbed and/or abandoned landscapes, some management techniques have been developed, including the implantation of agroforestry systems (AFs). The objective of this study was to examine the recovery of soil fertility after intensive use followed by either AFs or secondary forest. Variables examined for these two land cover types include: the quantity and quality of nutrients in the litter (Chapter 3), the influence of fine roots of cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) on litter decomposition rate (Chapter 4), and nutrient flux in the soil and colonization of roots by mycorrhizal fungi (Chapter 5). The AFs studied were implanted in 1991 at the experimental field station of EMBRAPA-CPAA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro de Pesquisa Agroflorestral da Amazônia Ocidental), situated in the SUFRAMA Farming and Ranching District (DAS), north of Manaus, at km 51 of the BR-174 highway. Three types of AFs were included in the study: (1) dominated by palms, (2) dominated by species for wood and fruit production and (3) mixed trees and pasture grasses. The secondary forest areas used in this study were located alongside the AFs. The litter mass stock over the soil was found to be larger under secondary forest (5.9 t ha^{-1}) than in the AFs. However, stocks of calcium (47.8 kg ha^{-1}), total phosphorus (4.4 kg ha^{-1}), magnesium (7.1 kg ha^{-1}) and manganese (0.69 kg ha^{-1}) were larger in the litter of the AFs than in the secondary forests. The percent of polyphenols in the litter was highest in the AFs dominated by fruit trees and in the secondary forest litter (1.6% in both). Soil pH was less acid (4.5) and the soil concentration of phosphorus was higher (68.8 mg kg^{-1}) in the AFs than in the secondary forests, and was restricted mainly to the uppermost layer of the soil. Roots colonized by mycorrhizal fungi were most abundant (35.8%) in the AF with pasture grasses, again mainly in the upper layer of the soil. Fine roots of cupuaçu had a positive effect on the absorptive removal of calcium, magnesium and manganese from the litter, compared with litter from which roots were excluded. This study concluded that AFs are an effective management technique, aiming at the recovery of natural soil fertility of abandoned and/or degraded Amazonian landscapes. Further study is required to determine whether AFs of higher diversity can intensify this recovery.

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO GERAL

O Ecossistema Amazônico

Um ecossistema pode ser definido como a soma de todas as partes bióticas e abióticas de uma paisagem, as quais interagem e determinam o crescimento e decomposição das plantas, a formação do solo e a mudança química da água. O estudo de ecossistemas terrestres pode ser imaginado como o estudo do metabolismo da paisagem ou o estudo do movimento de energia e materiais, incluindo água, químicos, nutrientes e poluentes, dentro, fora e entre os ecossistemas. Os ecossistemas se diferenciam pela forma como eles estocam e movimentam sua energia entre os organismos que nele habitam (Aber & Melillo, 1991).

A bacia amazônica é um ecossistema tropical, geograficamente delimitado pelas bacias hidrográficas dos rios que desembocam no rio Amazonas e na sua foz, na costa leste do Brasil. Ela abrange uma área total de aproximadamente 5,1 milhões de km², que inclui todos os estados brasileiros da região Norte e grande parte das florestas da Bolívia, Colômbia, Guiana, Guiana Francesa, Peru, Suriname e Venezuela. No Brasil está a maior parte da bacia amazônica, aproximadamente 4 milhões de km², a qual foi denominada politicamente como Amazônia Legal, incluindo os estados do Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia, Roraima e parte dos estados do Maranhão, Mato Grosso e Tocantins.

As florestas alagadas e as de terra firme da Amazônia estão entre os ambientes de maior diversidade de espécies do planeta. A alta diversidade da Amazônia pode ser explicada, entre outras formas, pela teoria dos refúgios, a qual supõe-se que durante o Quaternário, em períodos glaciais mais secos e frios, a floresta amazônica foi fragmentada,

formando refúgios em áreas de maior pluviosidade, separados por vegetação não-florestal, como o cerrado (Goulding, 1997).

Embora a floresta Amazônica seja o maior ecossistema de floresta primária contínua do planeta e possua uma alta biodiversidade de espécies, ela é muito sensível a perturbações externas. As concentrações de gás carbônico (CO₂) e de outros gases do efeito estufa na atmosfera do planeta está aumentando na taxa de 3,5Pg por ano (Pg=10¹⁵g ou bilhões de toneladas) e as maiores causas são a queima de combustíveis fósseis e a conversão de florestas tropicais em áreas de produção (Paustian *et al.*, 2000). Atualmente, cerca de 588 mil km² das florestas da Amazônia Legal já foram desmatados e os estados que mais desmataram foram o Pará (200 mil km² desmatados), Mato Grosso (144 mil km²) e Maranhão (104 mil km²) (INPE, 2002). Os desmatamentos na Amazônia são para a implantação de cultivos anuais, incluindo soja mais recentemente, e para a criação de gado (Fearnside, 2003). Como os solos da Amazônia são em sua maioria Oxisolos deficientes em nutrientes essenciais (Jordan & Herrera, 1981; Vitousek, 1984), eles rapidamente perdem a fertilidade natural e novas áreas naturais são desmatadas para a produção, enquanto as antigas são abandonadas. O abandono do solo pode levar à sua degradação, que pode envolver salinização, alagamento, compactação, contaminação por agrotóxicos, declínio na qualidade de sua estrutura, perda da fertilidade e erosão (Gleissman, 2001). Embora todas essas formas de degradação causem problemas severos, a erosão é a mais drástica. Há estimativas que até o ano de 2050 cerca de 5,2% dos solos da Amazônia estarão degradados devido ao abandono (Fearnside, 1995).

No Brasil, a Amazônia central, menos desmatada que suas partes oriental e ocidental, tem sofrido um processo de expansão do desmatamento devido à construção da rodovia BR-174 que faz a ligação entre Manaus, Boa Vista e a Venezuela. Esta rodovia

ocasionou maior migração populacional, aumentando o desenvolvimento da região e, conseqüentemente, gerando também o aumento do índice de desmatamento das florestas primárias. Segundo Laurance *et al.* (2002), a construção de estradas pode gerar um desmatamento muito superior ao estimado anteriormente nos projetos de implantação, porque a estrada traz consigo os colonizadores, o corte da madeira, a caça e a especulação imobiliária.

Para conter o desmatamento sem inviabilizar o desenvolvimento foi realizado na cidade do Rio de Janeiro em 1992 o evento “Encontro da Terra” ou Eco-92, conhecido oficialmente como “Conferência sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento das Nações Unidas” (UNCED). O evento reuniu representantes de 178 países com o objetivo de discutir formas de combinar maior proteção ao meio ambiente com um desenvolvimento econômico mais efetivo em países em desenvolvimento (Primack & Rodrigues, 2001). Foram discutidos e assinados cinco documentos: a Declaração do Rio, a Convenção sobre Mudança Climática, a Convenção sobre Biodiversidade, a Declaração sobre os Princípios de Florestas e a Agenda 21. Destes documentos, a Agenda 21 é uma tentativa inovadora de descrever de forma abrangente as políticas necessárias para um desenvolvimento de meio ambiente limpo e seguro. A Agenda 21 mostra os vínculos entre o meio ambiente e outros assuntos que muitas vezes são considerados separadamente, tais como o bem-estar da infância, pobreza, questões da mulher, transferência de tecnologia e divisão desigual da riqueza. Os planos de ação pretendem resolver problemas de poluição atmosférica, degradação e desertificação da terra, desenvolvimento agrícola e rural, desmatamento, ambientes aquáticos e poluição, tecnológicos, institucionais e financeiros para implementar esses planos de ação (Primack & Rodrigues, 2001).

Para prevenir ou reverter a contínua degradação dos solos, foram desenvolvidas algumas formas de manejo para a reabilitação das áreas abandonadas e/ou degradadas. Entre estas, está o enriquecimento de capoeira, que corresponde ao plantio de espécies vegetais de interesse econômico e ecológico em áreas de vegetação secundária (capoeira) e os policultivos ou sistemas agroflorestais (SAFs), que correspondem ao plantio de espécies vegetais, perenes ou anuais, de interesse econômico e ecológico em pastagens abandonadas (Yared, 1996; Silva, 2000; Peña-Carlos *et al.*, 2002). Os SAFs beneficiam o ambiente pela estocagem de carbono na biomassa vegetal, amenizando o efeito estufa; recuperando a fertilidade natural do solo por produzir matéria orgânica de melhor qualidade e por reduzir os desmatamentos (Fearnside, 1998; Albrecht & Kandji, 2003). Os sistemas agroflorestais consistem em uma alternativa de uso de áreas abandonadas antes que fiquem degradadas (Fearnside, 1998).

Para que os SAFs sejam boas formas de manejo é necessário que eles sejam auto-sustentáveis como as florestas naturais. As florestas naturais são auto-sustentáveis porque a transferência de nutrientes e elementos dentro do ecossistema é tão eficiente que evita as perdas por lixiviação.

O funcionamento do solo de ecossistemas terrestres naturais é dependente da eficiência dos processos biogeoquímicos de decomposição e ciclagem de nutrientes (Odum, 1969). Essa eficiência resulta na produtividade dos ecossistemas, que é representada pela entrada de nutrientes e matéria orgânica no solo através da queda dos componentes vegetais (littera) (Swift *et al.*, 1979; Aber & Melillo, 1980).

Outra fonte importante de matéria orgânica provém da decomposição e da secreção de nutrientes das raízes para o solo (Dahlman & Kucera, 1965; Oades, 1978). Estima-se que cerca de 60% do carbono fixado durante a fotossíntese serão transportados para as

raízes. Destes, 50% serão liberados na forma de CO₂ pela respiração e os outros 50% serão utilizados para o crescimento das raízes ou liberados para o solo, contribuindo para o aumento de matéria orgânica do solo e para a nutrição dos organismos. Nas pastagens e no cerrado, a matéria orgânica liberada pelas raízes pode superar o aporte superficial (Gleissman, 2001).

A partir da entrada da matéria orgânica no solo da floresta, fatores ambientais (bióticos e abióticos) definem a eficiência dos processos de decomposição e ciclagem de nutrientes (Swift *et al.*, 1979). Alguns desses fatores abióticos são o tipo de solo mineral, que no caso específico da Amazônia Central é predominante o Latossolo Amarelo (Ranzini, 1980) e o pH, que é geralmente muito ácido (Chauvel *et al.*, 1987). Além desses, a temperatura do solo, que está na faixa do ótimo microbiológico (25-30 °C), e a umidade do solo, a qual é geralmente alta nos períodos de dezembro a maio e baixa de junho a novembro (Ribeiro & Adis, 1984), também afetam a eficiência dos processos de decomposição e ciclagem de nutrientes.

A influência dos fatores bióticos na decomposição e ciclagem de nutrientes pode ser resumida em dois componentes principais: a atividade dos organismos decompositores da matéria orgânica do solo (Visser, 1985; Coleman, 1985; Wardle & Lavelle, 1997) e a qualidade nutricional do substrato (littera) (Swift *et al.*, 1979; Wardle, 1993). Os organismos decompositores da matéria orgânica do solo são classificados, quanto ao tamanho, em macrofauna (entre 2 e 20mm), mesofauna (entre 200 e 1000µm) e microbiota (entre 1 e 100µm) (Coleman, 1985). Esses organismos possuem funções ecológicas de manutenção do funcionamento do solo. Os organismos da macrofauna incluem os oligoquetos, que vivem no interior do solo, dentro de galerias que eles próprios constroem e, por essa razão, são considerados como engenheiros de ecossistemas (Lavelle *et al.*,

1995). Os organismos da mesofauna do solo vivem tanto na superfície do solo como no seu interior. Pertencem, na sua maioria, ao grupo dos artrópodes. Suas principais funções na decomposição são a quebra e a fragmentação mecânica do substrato. Alguns poucos artrópodes, como os cupins, têm a capacidade de decomposição química da matéria orgânica do solo (Lavelle *et al.*, 1995). Os organismos da microbiota são, principalmente, fungos e bactérias (em sua maioria) e são mais abundantes na camada mais superficial do solo, onde ficam aderidos a partículas de argila, matéria orgânica e grãos de areia, formando colônias ou em simbiose com as raízes das plantas (Coleman, 1985).

A microbiota do solo possui funções importantes na decomposição química do substrato e na disponibilização de nutrientes para o ecossistema (Swift *et al.*, 1979; Visser, 1985; Wardle & Lavelle, 1997). A decomposição química ou catabolismo envolve a transformação de compostos orgânicos complexos em moléculas solúveis simples (CO_2 , NH_4^+ , PO_4^- , etc.) e energia. Essa transformação é conhecida como mineralização, que é a conversão de um elemento da forma orgânica para a inorgânica. Os nutrientes e elementos inorgânicos mineralizados pela decomposição química do substrato podem ser lixiviados do sistema e/ou incorporado ao húmus ou à biota do solo (plantas, fauna e microbiota). A incorporação desses elementos é conhecida como imobilização. Os processos de mineralização e imobilização são dinâmicos e ocorrem simultaneamente no solo.

A matéria orgânica do solo tem sido classificada em frações ativa, lenta e passiva em relação à sua velocidade de decomposição (Parton *et al.*, 1987). A fração ativa ou celular da matéria orgânica do solo é composta pela microbiota do solo e substâncias solúveis, as quais são de rápida ciclagem (0,2 - 1,4 anos). A fração lenta da matéria orgânica corresponde ao material orgânico particulado mais resistente à decomposição (8 - 50 anos). A fração passiva (ou recalcitrante) corresponde à matéria orgânica do solo, que é

de decomposição muito lenta, como é o caso dos ácidos fúlvicos e húmicos (400 - 2200 anos). A velocidade de decomposição é condicionada pelo conteúdo de materiais recalcitrantes, como lignina e polifenóis, e elementos solúveis nessas frações (Parton *et al.*, 1987).

A eficiência dos processos de decomposição e ciclagem de nutrientes também é afetada pela qualidade nutricional do substrato, que pode ser medida, entre outros índices, pela textura aparente e pelo conteúdo de materiais solúveis na liteira (Singh & Dwivedi, 1979; Lowman, 1988; Vanlauwe *et al.*, 1997; Silva, 2000). A liteira com alto índice de materiais solúveis é considerada de melhor qualidade que a de baixo índice (Vanlauwe *et al.*, 1997).

Outro índice de qualidade é a relação C:N da liteira recém-caída (substrato) (Vanlauwe *et al.*, 1997). A microbiota do solo incorpora cerca de 30 - 40% do peso seco da matéria orgânica do substrato para o seu crescimento. Dessa matéria orgânica incorporada, cerca de 60% é liberada para a atmosfera na forma de CO₂. Quando a concentração de nitrogênio no substrato é baixa (relação C:N > 25), a biota do solo imobiliza o nitrogênio do solo para consumir o excesso de carbono do substrato. Quando a concentração de nitrogênio do substrato é alta (relação C:N < 25), a biota do solo disponibiliza o nitrogênio do substrato para o solo e para as plantas (Swift *et al.*, 1979). No entanto, se a disponibilização for maior que a imobilização o nitrogênio mineral pode ser perdido por lixiviação (Jordan, 1985)

A qualidade nutricional do substrato é dependente da diversidade vegetal (Wardle & Lavelle, 1997). Liteiras de diferentes qualidades nutricionais possuem taxas de decomposição distintas, o que favorece a microbiota do solo pela constante entrada de nutrientes em diferentes estádios do processo de decomposição (Wardle *et al.*, 1997).

Assim, a diversidade de substratos pode contribuir para manter a estabilidade dos processos biogeoquímicos da ciclagem de nutrientes do ecossistema (Odum, 1969).

Outro fator biológico responsável pela fertilidade natural do solo é a presença de micorrizas, tanto que segundo Begon *et al.* (1996) “as plantas não têm raízes, elas têm micorrizas”. Micorriza é o nome dado a associação simbiótica mutualista entre plantas e fungos. O termo é derivado do grego “mykorhiza” que significa fungo - raiz. A micorriza é um elo entre as raízes das plantas e a absorção de nutrientes do solo. Os fungos ajudam a planta a absorver água e nutrientes inorgânicos e, em troca, recebem compostos orgânicos produzidos pela planta (Allen, 1991; Art, 2001; Moreira & Siqueira, 2002). As micorrizas funcionam como um atalho para as raízes alcançarem os nutrientes, principalmente o fósforo (Kirschbaum & Paul, 2002). Por muito tempo pensou-se que os fungos eram nocivos às plantas, mas hoje existem estudos mostrando os benefícios ecológicos das micorrizas (Cuenca *et al.*, 1998; Duponnois *et al.* 2000; Lovelock *et al.*, 2004).

A evolução das micorrizas foi essencial para o desenvolvimento das plantas no ambiente terrestre (Allen, 1991; Brundrett, 2002). Os fungos surgiram no planeta Terra há 1,5 bilhão de anos no Período Proterozóico da Era Cambriana (Taylor & Osborn, 1996). Apesar do termo proterozóico significar “depois da vida”, nesse período fungos e algas formavam a comunidade microbiana da superfície terrestre e, provavelmente, ocorreu a primeira associação entre fungos e organismos fotossintetizantes do planeta, conhecida por liquens (Brundrett, 2002).

Há registros de associações micorrízicas entre 570 - 400 milhões de anos, entre os Períodos Proterozóico e Fanerozóico (surgimento das plantas). Neste período as plantas encontraram um ambiente hostil. A matéria orgânica do solo era escassa em nutrientes e água e as raízes ainda não haviam evoluído. Por outro lado, a atmosfera continha altas

concentrações de gás carbônico (CO₂) e a luz não era limitante para a produção. Neste ambiente as plantas tiveram que escolher entre desenvolver meios delas próprias obterem os nutrientes e a água ou alterar as relações com os fungos parasitas que invadiam suas raízes rudimentares. O segundo caminho foi o de menor gasto energético, porque os fungos ocupavam o solo muito antes das plantas e dominavam as técnicas de obtenção de nutrientes e água. Além disso, a relação mutualística com os fungos reduzia os efeitos negativos do parasita (Allen, 1991; Brundrett, 2002).

As raízes das plantas evoluíram como suporte mecânico, para otimizarem a absorção de nutrientes e a formação de micorrizas. Com a evolução, as plantas puderam controlar o desenvolvimento das micorrizas pela regulação do crescimento das raízes e da secreção de carboidratos. Atualmente, a grande maioria dos fungos micorrízicos não pode viver sem seus hospedeiros (Allen, 1991; Redecker *et al.*, 2000; Brundrett, 2002).

Com a evolução das plantas houve uma diferenciação nos tipos de fungos formadores de micorrizas (Brundrett, 2002). Atualmente o Reino Fungi está subdividido em cinco ordens: Ascomicetos, Basidiomicetos, Deuteromicetos, Quitridiomicetos e Zigomicetos. Os ascomicetos são fungos septados (com parede celular de celulose), com exceção das leveduras unicelulares, com reprodução assexuada e sexuada. Formam ectomicorrizas, ectendomicorrizas e micorrizas ericóides. Os basidiomicetos são fungos septados com reprodução assexuada e sexuada, formam cogumelos e englobam a maioria das ectomicorrizas. Os deuteromicetos são septados e considerados fungos imperfeitos porque a reprodução é apenas assexuada. Eles não são simbioses mutualistas e um exemplo comum de fungo deuteromiceto é o gênero *Penicillium*. Os quitridiomicetos são fungos septados com reprodução sexuada. Não são simbioses mutualistas e sim parasitas e sapróbios, tanto em ambiente terrestre quanto aquático. Os zigomicetos são fungos não

septados (sem parede celular) com reprodução assexuada e sexuada, englobam a maioria das micorrizas arbusculares (Allen, 1991; Moreira & Siqueira, 2002).

Com base na morfologia as associações micorrízicas podem ser classificadas em dois tipos principais: micorrizas arbusculares e micorrizas formadoras de manto. As micorrizas arbusculares são as mais comuns e mais antigas. A ordem *Glomales* surgiu no planeta Terra há mais de 400 milhões de anos (Redecker *et al.*, 2000). Estes organismos são considerados primitivos porque têm esporos simples, a reprodução é assexuada e associam-se com várias espécies de plantas. As micorrizas arbusculares colonizam as raízes das plantas de quase todos os gêneros de Gimnospermas e Angiospermas, além de alguns representantes das Briófitas e Pteridófitas. O fungo coloniza a célula do córtex da raiz inter e intracelularmente, formando os arbúsculos que são estruturas intra-radiculares altamente ramificadas e as vesículas que são hifas com dilatações terminais (Allen, 1991; Moreira & Siqueira, 2002). Não há evidências de especificidade hospedeira e não ocorrem alterações morfológicas macroscópicas nas raízes colonizadas por micorrizas arbusculares, sendo a presença da associação detectada apenas através de observações microscópicas de raízes clarificadas e coloridas com corantes especiais (Phillips & Hayman, 1970; Allen, 1991).

Segundo Sieverding (1991) 71% das plantas tropicais são colonizadas por micorrizas arbusculares, as exceções são as Famílias Amarantaceae, Comelinaceae, Juncaceae, Proteaceae, Cyperaceae, 87% das Brassicaceae, 67% das Chenopodiaceae, 37% das Polygonaceae e 4% das Leguminosae. As micorrizas arbusculares fazem parte do Filo Zigomicota e da Ordem Glomales. Recentemente esta ordem foi dividida em duas subordens, a Glomineae e a Gigasporineae. A subordem Glomineae possui as famílias Glomaceae, com o gênero *Glomus*, e Acaulosporaceae, com os gêneros *Acaulospora* e

Entrophospora. A subordem Gigasporineae possui a família Gigasporaceae e os gêneros *Gigaspora* e *Scutellospora* (Allen, 1991; Sieverding, 1991; Moreira & Siqueira, 2002).

As micorrizas formadoras de manto incluem as ectomicorrizas, ectendomicorriza, micorrizas ericóides e orquidóides (Moreira & Siqueira, 2002; Brundrett, 2002). Todas mostram especificidade por hospedeiros e, em alguns casos, a especificidade pode chegar ao nível de espécie (Allen, 1991; Moreira & Siqueira, 2002). As ectomicorrizas surgiram há 100 milhões de anos no Cretáceo, último período da Era Mesozóica, mesmo período que as plantas Angiospermas (Brundrett, 2002). As ectomicorrizas são formadas por hifas septadas de ascomicetos e basidiomicetos, na grande maioria. As hifas das ectomicorrizas penetram intercelularmente no córtex das raízes, com a formação da característica rede de Harting nos espaços intercelulares, substituindo a lamela média e ocorrendo, também, a formação do manto fúngico ao redor das raízes. Esse tipo de micorriza caracteriza-se ainda pelas intensas modificações morfológicas causadas nas raízes colonizadas, sendo típico de árvores de clima temperado como as coníferas (Allen, 1991; Moreira & Siqueira, 2002; Brundrett, 2002). Juntamente com as micorrizas arbusculares, as ectomicorrizas são os tipos de micorrizas de maior frequência na maioria dos ecossistemas e, por isso, os mais importantes (Taylor & Osborn, 1996; Brundrett, 1999; Redecker *et al.*, 2000; Moreira & Siqueira, 2002; Brundrett, 2002).

As ectendomicorrizas também são formadas por fungos ascomicetos e basidiomicetos e apresentam muitas das características das ectomicorrizas. A diferença entre ectomicorrizas e ectendomicorrizas é que a última apresenta rede de Hartig grossa e as hifas penetram no córtex da raiz intracelularmente, especialmente nas partes mais velhas da raiz. As ectendomicorrizas ocorrem principalmente em árvores de clima temperado como as coníferas (Allen, 1991; Moreira & Siqueira, 2002).

Outros tipos de ectendomicorrizas são as micorrizas arbutóides e monotropóides. As micorrizas arbutóides ocorrem nas plantas dos gêneros *Arbutos*, *Arctostaphylos* e *Pyrola* e as monotropóides em *Sarcodes*, *Pteropora* e *Monotropa*, todas pertencentes a família Ericaceae (Allen, 1991; Moreira & Siqueira, 2002). Estes tipos de micorrizas são formadas por hifas septadas de basidiomicetos, mas como os fungos basidiomicetos que formam as micorrizas arbutóides e monotropóides também formam ectomicorrizas em outros hospedeiros é provável que a planta regule o desenvolvimento da colonização micorrízica nestes tipos de micorrizas (Allen, 1991; Moreira & Siqueira, 2002).

As micorrizas ericóides são formadas apenas por fungos da ordem dos ascomicetos. Ocorrem num grupo de plantas bem distribuído no mundo, destacando-se as da família Ericaceae, que cobrem extensas áreas do Hemisfério Norte formando as “Heathlands” (Allen, 1991; Moreira & Siqueira, 2002). No Hemisfério Sul, plantas da família Epacridaceae são as hospedeiras mais comuns dos fungos ericóides. As micorrizas ericóides têm estrutura delicada e bastante uniforme. O fungo é septado, produz hifas enroladas no interior das células e são muito específicos quanto ao hospedeiro (Allen, 1991; Moreira & Siqueira, 2002).

As micorrizas das orquídeas são formadas por fungos basidiomicetos septados que colonizam intracelularmente as raízes, formando enrolados de hifas típicos no interior das células (Allen, 1991; Moreira & Siqueira, 2002). A Orquidaceae é uma família numerosa, que inclui plantas terrestres, epifíticas e lianas como a *Vanilla*. O fungo que coloniza estas plantas é do tipo *Rhizoctonia* (Moreira & Siqueira, 2002; Brundrett, 2002).

Diversos estudos mostram a importância das micorrizas na recuperação de áreas degradadas e nos sistemas agroflorestais (Haselwandter & Bowen, 1996; Cuenca *et al.*, 1998; Caravaca *et al.*, 2002; Cardoso *et al.*, 2003). Plantas não micorrizadas possuem

apenas a área próxima à raiz para obter seus nutrientes essenciais. As hifas das micorrizas aumentam consideravelmente a área de absorção das raízes. As micorrizas absorvem não apenas íons muito móveis no solo como o fosfato (H_3PO_4^-), mas também íons de pouca mobilidade como o potássio (K^+), amônio (NH_4^+), zinco (Zn^{++}), cobre (Cu^{++}), molibdênio (MoO_4^-) e enxofre (SO_4^-). Como as hifas das micorrizas podem se dispersar amplamente no solo, elas podem absorver metais pesados, os quais podem ou ficar estocados na biomassa do fungo ou são transferidos para o tecido vegetal (Haselwandter & Bowen, 1996).

OBJETIVOS

O objetivo geral do estudo foi investigar opções de recuperação da capacidade produtiva das áreas de pastagens abandonadas e quantificar o efeito do manejo das plantas e do solo no estoque de carbono, na concentração de nutrientes, na taxa de colonização de fungos formadores de micorrizas arbusculares, na decomposição e na qualidade da liteira em sistemas agroflorestais e na vegetação secundária (capoeira). O Capítulo III avalia o estoque de nutrientes e a qualidade da liteira dos sistemas agroflorestais e da capoeira. O Capítulo IV avalia o efeito das raízes finas do cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) na decomposição da liteira dos sistemas agroflorestais. O Capítulo V avalia a colonização de fungos formadores de micorrizas arbusculares e o fluxo de nutrientes no solo dos sistemas agroflorestais e da capoeira.

CAPÍTULO II

ÁREA DE ESTUDO

Localização da Área de Estudo

O estudo foi realizado no campo experimental da EMBRAPA - CPAA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Ocidental), situada no Distrito Agropecuário da Suframa (DAS), ao norte de Manaus, no km 51 da rodovia BR-174 (Manaus - Boa Vista) (Figura 2.1). A área está compreendida entre as coordenadas geográficas 2^o31' a 2^o32' de latitude Sul e 60^o01' a 60^o02' de longitude Oeste (Souza, 1995).

Clima e Geomorfologia

A Estação Climatológica da EMBRAPA/CPAA, localizado no quilômetro 30 da rodovia estadual AM-010, realizou medidas de precipitação pluviométrica (mm) e temperatura (°C) entre os anos de 1998 a 2000. Os valores de precipitação e temperatura média estão na Figura 2.2.

De acordo com a classificação de Köppen, o clima da região de estudo encontra-se no grupo climático A, característico de Clima Tropical Chuvoso, tipo *Amw*, que se caracteriza por apresentar uma estação seca de pequena duração. As chuvas, principalmente nas áreas de clima *Amw*, distribuem-se em épocas distintas. Geralmente, a estação chuvosa começa em novembro ou dezembro e segue até maio ou junho e o período seco ocorre nos meses restantes do ano. Em geral, existe um “superávit” hídrico de janeiro a junho e um “déficit” de agosto a dezembro (Fisch *et al.*, 1998).

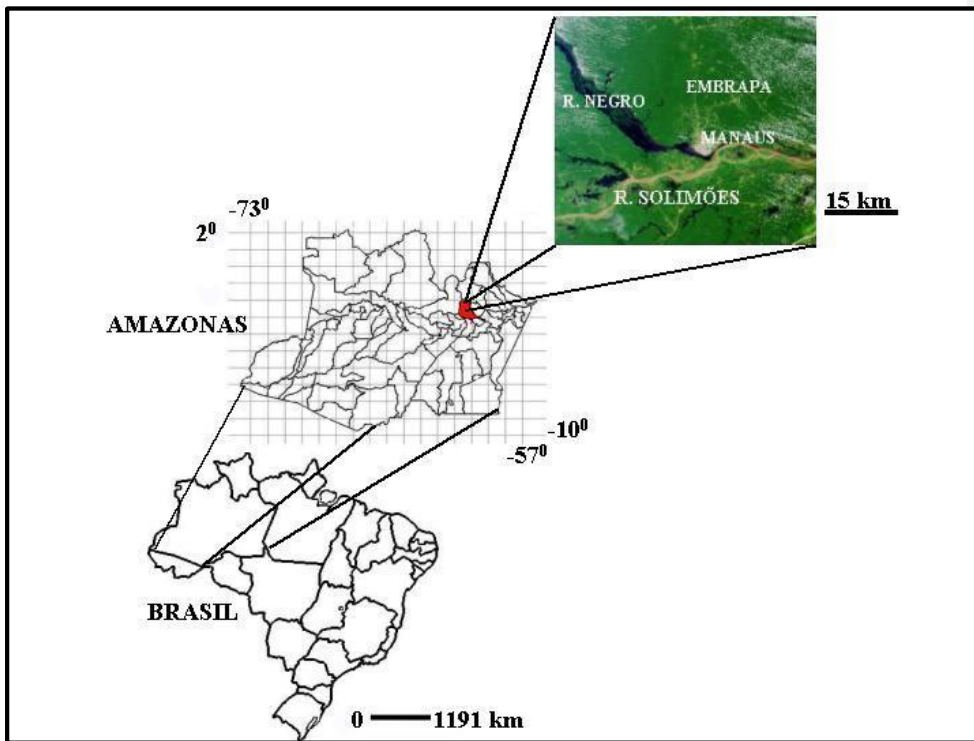


Figura 2.1. Localização da área de estudo.

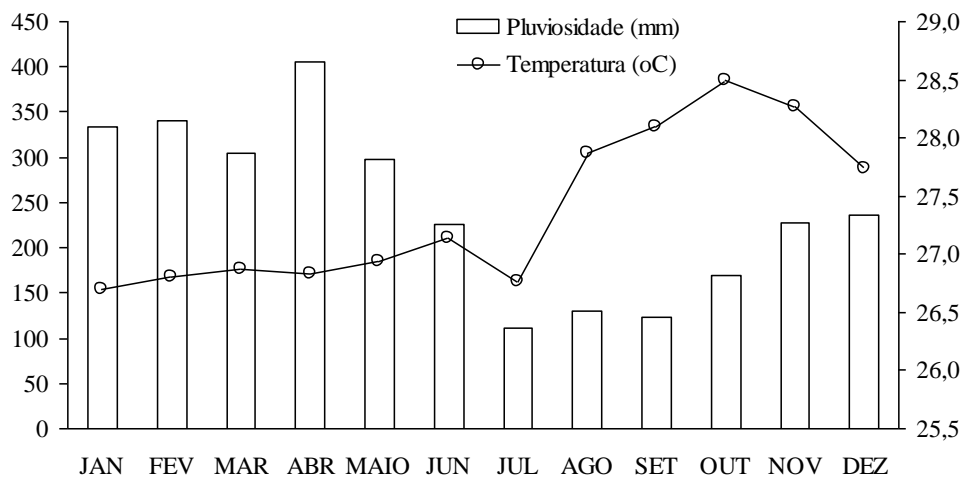


Figura 2.2. Médias mensais de precipitação pluviométrica (mm) e temperatura (°C) ao longo dos anos de 1998 a 2000. Dados fornecidos pela Estação Climatológica da EMBRAPA/CPAA.

A umidade relativa do ar na região raramente é inferior a 70% e aproximando-se frequentemente de 90%. A luminosidade varia de 1.500 a 3.000 horas de radiação solar por ano, com um grau de nebulosidade relativamente alto (Fisch *et al.*, 1998).

O solo da região de estudo é classificado como Latossolo Amarelo Distrófico (Oxissolo), com alto teor de argila (> 60%) (Ranzani, 1980; Silva, 1996). O solo é muito ácido (pH < 4), com baixa fertilidade natural (Chauvel *et al.*, 1987) e deficientes em cálcio, magnésio, nitrogênio e, principalmente fósforo (McKerrow, 1992; Silva, 1996).

Descrição do Distrito Agropecuário da Suframa

A intenção inicial do Art. 1º do Decreto-Lei nº 288 foi incentivar a atuação da Superintendência da Zona Franca de Manaus (Suframa) no setor agropecuário, criando um distrito agropecuário nos moldes de um distrito industrial. Neste caso, foi reservada uma área de floresta natural para ser vendida aos produtores e empresários interessados,

selecionados mediante análise de um projeto técnico apresentado à Suframa pelos proponentes. Segundo este entendimento, foi cedida à Suframa, pelo Governo do Estado do Amazonas, uma área de aproximadamente 600 mil hectares, distante 30km de Manaus, na margem esquerda do Rio Negro, onde foi implantado o Distrito Agropecuário da Suframa - DAS (Santos, 2000).

Ao longo do tempo, constatou-se que a maioria dos projetos não foram bem sucedidos. A implantação de pastagens, por exemplo, foi pouco eficiente e a Suframa acabou repassando boa parte dessas áreas já fragmentadas para várias entidades de assistência técnica, pesquisa e fomento da região. A Embrapa/CPAA – Amazônia Ocidental foi uma das contempladas com essa distribuição de áreas, recebendo um lote de 5 mil hectares (Santos, 2000).

Histórico de Ocupação da Área

A ocupação da área do DAS teve início em 1976, quando foram desmatados 200 hectares da floresta primária pertencentes à EMBRAPA - CPAA para estabelecer pastagens com o capim braquiária. Este processo foi utilizado até 1984. Em 1986, as pastagens foram abandonadas formando uma capoeira composta principalmente por espécies herbáceas (*Borreria verticillata* e *Rolandra fruticosa*), arbustivas e arbóreas dos gêneros *Vismia*, *Solanum*, *Anona* e *Laertia* (McKerrow, 1992). Em setembro de 1991, a capoeira que havia se formado na área abandonada foi derrubada e queimada. Em janeiro de 1992 foram implantados os sistemas agroflorestais com o apoio financeiro da Fundação Rockefeller.

Sistemas Agroflorestais

Durante a implantação dos sistemas agroflorestais em 1992, alguns receberam correção de acidez e fertilidade do solo, com aplicação de calcário, nitrogênio, fósforo e potássio (altos insumos). Outros sistemas receberam apenas uma aplicação de fósforo (baixos insumos).

Os sistemas agroflorestais (SAFs) foram compostos por culturas anuais e perenes com espécies arbóreas frutíferas e madeiráveis. Nos sistemas agrossilvopastoris foram utilizados componentes arbóreos, leguminosas de cobertura e gramíneas para suportar o componente animal. Todos os SAFs possuem cerca viva de *Gliricidia sepium* (Jacq) Walp (118 plantas, com espaçamento de 2m x 2m ao redor de cada SAF), a qual é podada uma vez por ano e seus resíduos são espalhados no solo como adubo orgânico.

Os sistemas agroflorestais foram distribuídos nas seguintes formulações: AS1 (Sistema Agrossilvicultural 1 – altos insumo, SAF baseado em palmeiras), AS2 (Sistema Agrossilvicultural 2 – baixos insumos, SAF baseado em fruteiras e madeiráveis), ASP1 (Sistema Agrossilvopastoril 1 – baixos insumos, SAF baseado em pastagens); ASP2 (Sistema Agrossilvopastoril 2 – altos insumos, SAF baseado em pastagens) e pastagem abandonada (capoeira). As espécies plantadas nos SAFs estão na Tabela 2.1.

Tabela 2.1. Espécies e número de indivíduos plantados nos sistemas agroflorestais.

Espécies	Nome vulgar	Sistemas agroflorestais		
		AS1	AS2	ASP1
<i>Bactris gasipaes</i> Kunth	Pupunha	248*	----	----
<i>Bertholletia excelsa</i> H.B.K.	Castanha	----	24	----
<i>Brachiaria brizantha</i>	Braquiária	----	----	cobertura
<i>Columbrina glandulosa</i> Perkins	Columbrina	40	----	----
<i>Desmodium ovalifolium</i> Wall	Desmódio	----	----	cobertura
<i>Eugenia stipitata</i> McVaugh	Araçá-boi	----	24	----
<i>Euterpe oleraceae</i> Mart	Açaí	180	----	----
<i>Inga eludis</i> Martius	Ingá	----	61	206
<i>Malpighia emarginata</i> L.	Acerola	----	60	----
<i>Musa paradisiaca</i>	Banana	----	26	----
<i>Schizolobium amazonicum</i> Ducke	Paricá	----	----	40
<i>Swietenia macrophylla</i> King.	Mogno	----	12	22
<i>Tectona grandis</i> Nursery	Teca	----	36	----
<i>Theobroma grandiflorum</i> (S) K. Schumg	Cupuaçu	99	26	----

* Sendo 80 indivíduos utilizados na produção de frutos e 168 para a produção de palmito.

Delineamento dos Sistemas Agroflorestais Implantados no DAS

O desenho experimental utilizado foi estabelecido em três blocos casualizados (Figura 2.3) contendo cinco formulações diferentes de sistemas agroflorestais implantados em parcelas de 60m x 50m, com uma área total de 4,5 ha. Destes, apenas três das diferentes formulações; os SAFs baseados em palmeiras (Figura 2.4), em fruteiras (Figura 2.5) e em pastagem (Figura 2.6) foram utilizados neste estudo. O ASP2 foi excluído do estudo por ser floristicamente similar ao ASP1 e por ter sido adicionado fertilizantes químicos na pastagem. A capoeira estudada tem principalmente as espécies *Vismia amazonia*, *V. laterifolia*, *V. cayannensis* e *Laetia procera*. As áreas de capoeira utilizadas neste estudo foram demarcadas fora dos blocos dos sistemas agroflorestais (Figura 2.7), porque as capoeiras dos blocos foram manejadas em tempos diferentes.

Apenas em 1997 (janeiro e março, estação chuvosa) houve a entrada de gado no SAF baseado em pastagens. Nessa época foram colocadas cinco cabeças de gado por um período de sete dias cada vez (E. Wandelli, comunicação pessoal). Do ano de 2001 até 2003 havia na área um rebanho de ovinos.

Estudos recentes realizados nestes SAFs foram os de McCaffrey (2003), sobre a biomassa das plantas; e Gallardo-Ordinolla (2004), sobre a biomassa de raízes; Tapia-Coral (1998) sobre macrofauna da liteira; Santos (2002), sobre o valor econômico dos SAFs; e Cortés-Tarra (2003), sobre a macrofauna da liteira.

Destes estudos, os de McCaffrey (2003), Gallardo-Ordinolla (2004) e o presente estudo fazem parte do projeto LBA – EMBRAPA ND-04 “Estoques de Carbono e Nutrientes, Dinâmica da Água no Solo e Fluxos de Gases Traços em Pastagens Abandonadas e Sistemas Agroflorestais na Amazônia Central.” Este projeto teve como objetivos (1) avaliar as ligações entre a dinâmica dos nutrientes, o estoque de carbono, os fluxos dos gases do efeito estufa e a dinâmica da água no solo nos sistemas antropogênicos na Amazônia central; (2) Contribuir para o desenvolvimento de manejos alternativos ao abandono das pastagens degradadas da região; (3) Fornecer dados relevantes aos políticos e pesquisadores, ajudando-os a avaliar o impacto potencial das mudanças no uso da terra sobre a dinâmica do carbono, dos gases do efeito estufa e dos nutrientes; e (4) Fortalecer a capacidade institucional da Embrapa – CPAA e da Universidade Federal do Amazonas (UFAM).



Figura 2.3. Vista aérea dos SAFs implantados na EMBRAPA-CPAA. SAFs baseados em palmeiras (verde), em fruteiras (rosa) e em pastagens (azul claro e azul escuro) e a capoeira (vermelho). Foto do ano de 2001.



Figura 2.4. Vista do interior do SAF baseado em palmeiras.



Figura 2.5. Vista do interior do SAF baseado em fruteiras.



Figura 2.6. Vista do interior do SAF baseado em pastagens.



Figura 2.7. Vista do interior da capoeira.

CAPÍTULO III

ESTOQUE E QUALIDADE DA LITEIRA DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS E DE VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA NA AMAZÔNIA CENTRAL.

INTRODUÇÃO

A decomposição da matéria orgânica do solo é um processo muito importante na conservação dos nutrientes nos ecossistemas naturais (Swift *et al.*, 1979), principalmente em florestas tropicais deficientes em nutrientes essenciais (Jordan, 1985). O combustível que gera a energia necessária para o processo biológico de decomposição provém da produtividade das plantas (Aber & Melillo, 1980). A produtividade é representada pela queda dos componentes vegetais, tais como troncos, galhos, frutos, sementes e, principalmente, folhas. Todo esse material biológico recebe o nome geral de liteira (Marino *et al.*, 1980). A liteira pode ser classificada em liteira fina, com frações lenhosas de até 2cm de diâmetro, e liteira grossa, com frações lenhosas maiores de 2cm de diâmetro. A liteira fina é uma das principais fontes de nutrientes e elementos para a matéria orgânica do solo (Proctor, 1983).

As concentrações dos nutrientes na liteira são importantes para o funcionamento das plantas e dos organismos decompositores da matéria orgânica do solo (Coelho & Verlengia, 1973; Jordan, 1985; Swift *et al.*, 1979). O estudo das concentrações de nutrientes na liteira das plantas indica o estoque de nutrientes para o solo. Os elementos químicos necessários para o desenvolvimento e crescimento das plantas são chamados de nutrientes essenciais. Os nutrientes essenciais necessários em grandes quantidades são chamados de macronutrientes (C, H, O, N, P e K). Os elementos essenciais necessários em pequenas

quantidades são chamados de nutrientes secundários (Ca, Mg e S) e micronutrientes (B, Cu, Fe, Mn, Mo e Zn) (Juo & Franzluebbers, 2003). Outros autores consideram macronutrientes e nutrientes secundários como sendo a mesma coisa (Aber & Melillo, 1991).

Os nutrientes essenciais estudados neste capítulo foram o potássio (K^+), o cálcio (Ca^{2+}), o magnésio (Mg^{2+}), o fósforo ($H_2PO_4^-$), o ferro (Fe^{+++}), o manganês (Mn^{++}) e o zinco (Zn^{++}). O potássio é o elemento mais abundante nas plantas, no entanto, não é parte integrante da célula vegetal. Dentro da célula vegetal o potássio é encontrado no citoplasma e nos vacúolos celulares. O potássio funciona como catalisador das reações enzimáticas da célula vegetal viva, controla a abertura dos estômatos e o movimento dos íons através da parede celular (Coelho & Verlengia, 1973; Aber & Melillo, 1991; Epstein & Bloom, 2005). As florestas primárias da Amazônia sobre solos deficientes em nutrientes essenciais acumulam potássio e cálcio na biomassa vegetal (Jordan, 1985). O cálcio é o principal constituinte da parede celular da célula vegetal, muito importante para a nutrição das plantas e o mais abundante, depois do potássio. Grande parte do cálcio está localizado nas folhas das plantas, acumulado nas folhas velhas e na liteira. A floresta de terra firme da Amazônia central acumula cerca de 80% de todo o cálcio do ecossistema em sua biomassa (Herrera, 1985). O magnésio é um componente estrutural muito importante da molécula de clorofila. O fósforo se concentra principalmente nas flores e nos frutos das plantas e tem um grande efeito no crescimento das raízes, principalmente as finas (Coelho & Verlengia, 1973). Em ecossistemas tropicais, o fósforo e o potássio são reabsorvidos das folhas para os galhos das plantas antes da abscisão foliar (queda das folhas) (Jordan, 1985).

Os valores da relação carbono e nitrogênio (C:N) e as taxas de polifenóis são formas de avaliar a qualidade nutricional da liteira (Swift *et al.*, 1979; Anderson & Ingran, 1993; Vanlauwe *et al.*, 1997), por influenciarem a concentração de nitrogênio disponível no solo

dos ecossistemas naturais ou manejados (Nair *et al.*, 1999; Aerts *et al.*, 1999; Seneviratne 2000).

OBJETIVO GERAL

Visando fornecer informações sobre a conservação de nutrientes em sistemas agroflorestais da Amazônia central em diferentes fases sazonais, este estudo consiste em estimar a qualidade da liteira estocada sobre o solo de sistemas agroflorestais e vegetação secundária (capoeira) na Amazônia central. Para obter estas informações foram investigadas as seguintes questões:

1. Qual é o estoque de liteira acumulada sobre o solo dos SAFs e da capoeira?
2. Quais são as concentrações de macronutrientes (C, N, P, K e Mg) e micronutrientes (Fe, Mn, Zn) na liteira acumulada dos SAFs e da capoeira?
3. Qual é a taxa de polifenóis na liteira acumulada dos SAFs e da capoeira?

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

Este estudo foi realizado nos sistemas agroflorestais (SAFs) implantados no Centro de Pesquisa Agroflorestal da Amazônia Ocidental implantado pela EMBRAPA no km 51 da rodovia BR-174 que liga Manaus à Boa Vista. Três formulações de SAFs foram utilizadas neste estudo: (1) SAF baseado em palmeiras (agrossilvicultural 1 - AS1), (2) SAF baseado em fruteiras e madeiráveis (agrossilvicultural 2 - AS2) e (3) SAF baseado em pastagens (agrossilvopastoril - ASP1).

Amostragens

Para abranger toda a variabilidade sazonal da região, que influencia a dinâmica da matéria orgânica, foram realizadas quatro amostragens temporais: nas épocas chuvosa (em 17/04/2001, precipitação de 405 mm e temperatura de 27°C) e seca (em 18/09/2001, precipitação de 124 mm e temperatura de 28°C), e nas fases de transição entre as épocas seca e chuvosa (em 19/12/2001, precipitação de 236 mm e temperatura de 28°C) e entre as épocas chuvosa e seca (em 25/06/2002, precipitação de 226 mm e temperatura de 27°C). Para estas amostragens foram traçadas transecções de 50m de comprimento, perpendiculares as linhas de plantações nos SAFs e no sentido norte e sul nas capoeiras.

Nas transecções foram feitas coletas a cada dois metros de distância. Cada grupo de cinco coletas foi misturado, homogeneizado e considerado uma amostra composta, dando um total de cinco amostras compostas.

Em cada transecção foi coletada a liteira acumulada sobre o solo, tanto nos SAF como na capoeira. Para facilitar as análises, a liteira foi coletada com o auxílio de um

quadrado de madeira com 25cm de lado (Figura 3.1), dentro do qual todas as folhas e as outras estruturas vegetais com diâmetro de até 2cm foi recolhido. As amostras foram colocadas em sacos de papel pardo e secas em estufa a 65⁰C por 72 horas. Após este período, a liteira foi limpa manualmente com auxílio de pincéis e separada em dois componentes principais: material foliar e material lenhoso. O material reprodutivo (flores e frutos) foi acrescido ao material lenhoso, por apresentar pouca quantidade. A liteira total foi pesada e o material foliar foi triturado em moinho elétrico para as análises químicas posteriores.



Figura 3.1. Coleta de liteira fina (até 2cm de diâmetro) sobre o solo: (A) antes da coleta e (B) depois da coleta.

Análises Químicas

Todas as análises químicas do componente foliar da liteira foram realizadas no Laboratório Temático de Solo e Plantas e no Laboratório de Nutrição Vegetal do Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA).

Para as análises de cálcio, magnésio, potássio, fósforo, ferro, manganês e zinco foi realizada uma extração com uma solução duplo-ácida composta pelos ácidos nítrico e perclórico ($\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$) em uma proporção de 3:1 (Silva, 1999). A mistura ficou reagindo por um período de 14h e depois foi feita a digestão das amostras em capela, para que todo óxido nitroso (NO_2) e ácido perclórico (HClO_4) fossem consumidos.

Após a digestão a mistura foi transferida para um balão volumétrico e acrescida de água destilada. Esta solução concentrada foi utilizada para a leitura dos microelementos ferro, manganês e zinco. Para ler os macroelementos fósforo, cálcio, magnésio e potássio foi necessário diluir em 20 vezes a solução concentrada. A leitura do fósforo foi realizada em Espectrofotômetro UV visível 1240 da marca Shimadzu, ao comprimento de onda (λ) de 725nm. Os elementos Ca, K, Mg, Fe, Mn, e Zn foram lidos em Absorção Atômica da marca Perkin-Elmer (AA-1475-Varian). A determinação do carbono e nitrogênio totais da liteira foi feita em analisador CHN (CHNOS Vario EL) do Laboratório de Solos da EMBRAPA - CPAA.

Para a extração dos polifenóis totais foi utilizado o método de Folin-Denis (Anderson & Ingran, 1993), que consiste na extração total dos compostos polifenólicos, incluindo taninos hidrolizáveis e condensados, com uma solução de metanol a 50%. A leitura dos polifenóis foi realizada em Espectrofotômetro UV visível 1240 da marca Shimadzu ao comprimento de onda (λ) de 760 nm.

Estoques de Carbono e Nutrientes na Liteira

Os estoques de carbono orgânico e nutrientes foram determinados pela multiplicação da massa de liteira acumulada sobre o solo pela concentração de cada nutriente.

Análise dos Dados

Inicialmente foi aplicado o teste Lilliefors para verificar a normalidade dos dados. Os dados que não mostraram distribuição normal foram transformados em logaritmo e/ou logaritmo neperiano. Após a constatação da normalidade dos dados foi aplicada uma análise de variância de 2 fatores (ANOVA two-way) para verificar o efeito dos SAFs e da sazonalidade (variáveis independentes) sobre a massa seca de liteira, a taxa de polifenóis e os estoques de macro e micronutrientes da liteira (variáveis dependentes). Na constatação de algum efeito foi aplicado o teste de “Tukey”, que fez uma comparação entre os SAFs e a capoeira.

RESULTADOS

Os registros da Estação Meteorológica da EMBRAPA/CPAA mostraram que no mês de abril de 2001, quando foram feitas as amostragens da época chuvosa, a precipitação pluviométrica foi alta (405 mm) e a temperatura média baixa (27°C). Em setembro de 2001, quando foram realizadas as amostragens da época seca, a precipitação foi baixa (124 mm) e a temperatura média alta (28°C). Em dezembro de 2001, quando foram feitas as amostragens da fase de transição entre as épocas seca e chuvosa, a precipitação pluviométrica foi intermediária (226mm) e a temperatura média baixa (27°C) e em junho de 2002, quando foram feitas as amostragens da fase de transição entre as épocas chuvosa e seca, a precipitação pluviométrica também foi intermediária (236mm) e a temperatura média alta (28°C).

Massa Seca de Liteira

As massas de liteira acumulada anualmente sobre o solo dos sistemas estudados foram maiores na capoeira do que nos SAFs (Tabela 3.1). Entre os SAFs, o sistema baseado em pastagens registrou os menores acúmulos de liteira sobre solo. Os componentes da liteira acumulada sobre o solo (material foliar e lenhoso) também variaram entre os sistemas. As massas do material foliar foram maiores na capoeira e menores no SAF baseado em pastagens. As massas do material lenhoso (galhos, flores e frutos) foram maiores na capoeira e no SAF baseado em palmeiras do que nos outros SAFs.

Em cada uma das fases sazonais estudadas (estações seca e chuvosa e as fases de transições entre as épocas seca e chuvosa e entre chuvosa e seca) foram observadas variações nas massas totais de liteira acumulada sobre o solo e nos seus componentes

(Tabela 3.2). As massas totais da liteira acumulada na capoeira foram visivelmente maiores nas épocas seca e chuvosa do que nas outras fases sazonais estudadas (Figura 3.2).

A capoeira acumulou as maiores massas de liteira sobre o solo durante todas as fases sazonais estudadas (Tabela 3.2). A massa do material foliar foi maior na capoeira durante as épocas chuvosa e seca. A massa do material lenhoso foi maior na capoeira apenas na fase de transição entre as épocas chuvosa e seca.

Entre os SAFs, as massas totais de liteira acumulada sobre o solo foram sempre maiores nos SAFs baseado em palmeiras e baseado em fruteiras do que no baseado em pastagens, com exceção da época chuvosa quando não mostraram diferenças significativas. As massas do material foliar foram maiores nos SAFs baseado em palmeiras e baseado em fruteiras durante a época seca e na fase de transição entre as épocas chuvosa e seca. As massas do material lenhoso foram maiores nos SAFs baseado em palmeiras e baseado em fruteiras durante a fase de transição entre as épocas seca e chuvosa.

Tabela 3.1. Média anual da massa de liteira acumulada sobre o solo ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) nos SAFs baseados em palmeiras, em fruteiras e em pastagens e na capoeira. Os valores são médias \pm desvios-padrões de quatro coletas em cada uma das três réplicas de cada sistema. Letras diferentes na mesma linha correspondem a variação significativa ao nível de $p < 0,05$.

Liteira	Sistemas agroflorestais			Capoeira	ANOVA	
	Palmeiras	Fruteiras	Pastagens		F	P
Material foliar	2,3 a ± 1	2,8 a $\pm 1,1$	1,2 b $\pm 0,7$	4,4 c $\pm 1,4$	30,5	0,0001
Material lenhoso	0,9 ab $\pm 0,8$	0,7 a $\pm 0,5$	0,5 a $\pm 0,8$	1,5 b $\pm 0,9$	7,9	0,0001
Liteira total	3,3 a $\pm 1,1$	3,6 a $\pm 1,2$	1,7 b $\pm 1,2$	5,9 c $\pm 1,7$	37,2	0,0001

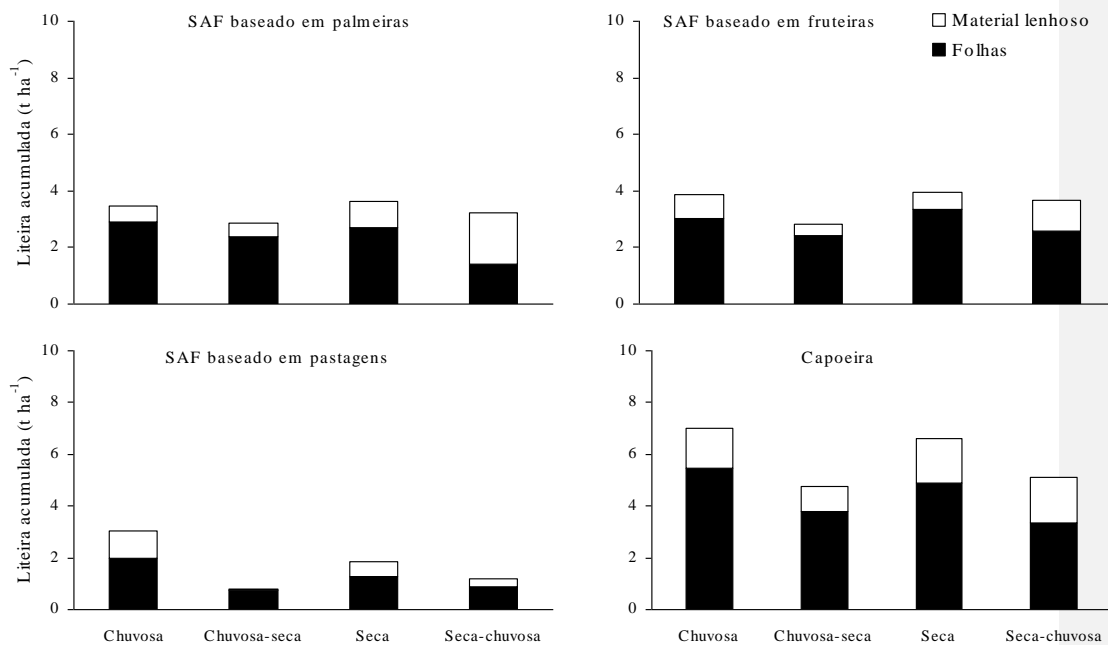


Figura 3.2. Massas de littera acumulada sobre o solo durante as quatro fases sazonais estudadas (estações seca e chuvosa e as fases de transições entre as épocas seca e chuvosa e entre chuvosa e seca) nos SAFs baseados em palmeiras, em fruteiras e em pastagens e na capoeira (N = 12).

Tabela 3.2. Massas de liteira acumulada sobre o solo (Mg ha^{-1}) nos SAFs baseados em palmeiras, em fruteiras e em pastagens e na capoeira durante as épocas sazonais estudadas. Os valores são médias \pm desvios padrões de quatro amostras compostas em cada uma das três réplicas de cada sistema. Letras diferentes na mesma linha correspondem a variação significativa ao nível de $p < 0,05$.

Nutrientes	Época	Sistemas agroflorestais			Capoeira	ANOVA	
		Palmeiras	Fruteiras	Pastagens		F	P
Material foliar	Chuvosa	2,9 a	3 a	2 a	5,5 b	20	0,0001
		$\pm 0,4$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	± 1		
Material lenhoso		0,5 a	0,9 ab	1,1 ab	1,5 b	4,2	0,030
		$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,4$	$\pm 0,7$		
Liteira total		3,5 a	3,9 a	3,1 a	7 b	43,1	0,0001
		$\pm 0,3$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,8$		
Material foliar	Chuvosa-seca	2,4 a	2,4 a	0,7 b	3,8 a	12,5	0,001
		$\pm 0,7$	$\pm 1,1$	$\pm 0,1$	$\pm 0,6$		
Material lenhoso		0,5 a	0,4 ab	0,1 b	1 c	19,5	0,0001
		$\pm 0,1$	$\pm 0,3$	$\pm 0,02$	$\pm 0,2$		
Liteira total		2,9 a	2,8 a	0,8 b	4,8 c	17,4	0,0001
		$\pm 0,7$	$\pm 1,3$	$\pm 0,1$	$\pm 0,5$		
Material foliar	Seca	2,7 a	3,3 a	1,3 b	4,9 c	38,7	0,0001
		$\pm 0,5$	$\pm 0,6$	$\pm 0,4$	$\pm 0,4$		
Material lenhoso		0,9 ab	0,6 a	0,5 a	1,7 b	5,8	0,011
		$\pm 0,3$	$\pm 0,2$	$\pm 0,8$	$\pm 0,2$		
Liteira total		3,6 a	3,9 a	1,8 b	6,6 c	49	0,0001
		$\pm 0,6$	$\pm 0,5$	$\pm 0,5$	$\pm 0,6$		
Material foliar	Seca-chuvosa	1,4 ac	2,6 ab	0,9 c	3,3 b	15,1	0,0001
		$\pm 0,5$	$\pm 0,3$	$\pm 0,2$	± 1		
Material lenhoso		1,8 a	1,1 ab	0,3 b	1,8 a	12,5	0,001
		$\pm 0,7$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,4$		
Liteira total		3,2 a	3,7 a	1,2 b	5,1 c	26,6	0,0001
		$\pm 0,5$	$\pm 0,4$	$\pm 0,1$	$\pm 1,1$		

Qualidade Nutricional da Liteira

As análises químicas sobre a qualidade da liteira foram realizadas apenas no material foliar. Entre os SAFs e a capoeira, a concentração de carbono na liteira acumulada sobre o solo foram maiores na capoeira do que nos outros sistemas (Tabela 3.3). As concentrações de nitrogênio foram maiores na liteira do SAF baseado em pastagens. Os

valores da relação C:N foram menores no SAF baseado em pastagens. As taxas de polifenóis foram maiores no SAF baseado em fruteiras e na capoeira do que nos SAFs baseado em pastagens e baseado em palmeiras.

Tabela 3.3. Concentrações de carbono e nitrogênio (g kg^{-1}), valores da relação C:N e taxas de polifenóis (%) na liteira acumulada sobre o solo nos SAFs baseados em palmeiras, em fruteiras e em pastagens e na capoeira. Os valores são médias \pm desvios padrões de quatro amostras compostas em cada uma das três réplicas de cada sistema. Letras diferentes na mesma linha correspondem a variação significativa ao nível de $p < 0,05$.

Elementos	Sistemas agroflorestais			Capoeira	ANOVA	
	Palmeiras	Fruteiras	Pastagens		F	P
Carbono	418,1 a $\pm 19,4$	429,3 ab $\pm 31,7$	412 a $\pm 23,8$	448,2 b $\pm 19,9$	4,1	0,012
Nitrogênio	13,6 a $\pm 1,3$	15,8 ab $\pm 2,5$	17,7 b ± 2	13,9 a $\pm 1,5$	7,2	0,0001
C:N	32 a ± 6	29 ab ± 8	24 b ± 5	33 a ± 6	5,8	0,002
Polifenóis	1 a $\pm 0,4$	1,6 b $\pm 1,2$	0,8 a $\pm 0,4$	1,6 b $\pm 0,4$	5,8	0,002

Entre as fases sazonais, as concentrações de carbono na liteira acumulada sobre o solo foram maiores na capoeira durante as épocas chuvosa seca (Tabela 3.4). Na fase de transição entre as épocas seca e chuvosa as concentrações de carbono foram maiores na capoeira e no SAF baseado em fruteiras.

As concentrações de nitrogênio na liteira acumulada sobre o solo foram maiores no SAF baseado em pastagens durante quase todas as fases sazonais estudadas, com exceção da fase de transição entre as épocas chuvosa e seca quando o SAF baseado em pastagens mostrou os menores concentrações de nitrogênio na liteira.

Os valores da relação C:N da liteira acumulada sobre o solo foram quase sempre maiores na capoeira, com exceção da fase de transição entre as épocas seca e chuvosa

quando não houveram diferenças significativas. Entre os SAFs, os valores de relação C:N foram menores no SAF baseado em fruteiras durante a época chuvosa e no SAF baseado em pastagens durante a época seca e na fase de transição entre as épocas chuvosa e seca.

As taxas de polifenóis na liteira acumulada sobre o solo foram maiores na capoeira durante todas as fases sazonais estudadas. Entre os SAFs, o baseado em fruteiras mostrou as maiores taxas de polifenóis em todas as fases sazonais estudadas.

Tabela 3.4. Concentrações de carbono e nitrogênio (g kg^{-1}), valores da relação C:N e taxas de polifenóis (%) na liteira acumulada sobre o solo nos SAFs baseados em palmeiras, em fruteiras e em pastagens e na capoeira durante as épocas de estudo. Os valores são médias \pm desvios padrões de quatro amostras compostas em cada uma das três réplicas de cada sistema. Letras diferentes na mesma linha correspondem a variação significativa ao nível de $p < 0,05$.

Elementos	Época	Sistemas agroflorestais			Capoeira	ANOVA	
		Palmeiras	Fruteiras	Pastagem		F	P
Carbono	Chuvosa	406,2 ab	408,7 ab	382,6 a	440,3 b	4,6	0,023
		$\pm 14,6$	$\pm 7,3$	$\pm 25,5$	$\pm 9,9$		
Nitrogênio		15,2 ab	19 a	16,7 ab	13,6 b	5,9	0,01
		$\pm 1,1$	$\pm 2,6$	$\pm 0,3$	$\pm 1,5$		
C:N		27 a	22 b	23 a	33 c	23	0,0001
		$\pm 2,9$	$\pm 1,7$	$\pm 0,3$	$\pm 0,8$		
Polifenóis		0,4 a	0,8 b	0,4 a	1 b	17,4	0,001
		$\pm 0,2$	$\pm 0,4$	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$		
Carbono	Chuvosa-seca	408,9	395,8	407	429,1	2,7	n. s.
		$\pm 2,9$	$\pm 24,2$	$\pm 11,3$	$\pm 1,9$		
Nitrogênio		14,3 a	16,3 a	20,3 b	14,3 a	26,9	0,0001
		$\pm 1,5$	$\pm 1,2$	$\pm 1,2$	$\pm 0,9$		
C:N		29 a	25 b	20 c	30 a	52,1	0,0001
		$\pm 0,9$	$\pm 0,7$	$\pm 0,8$	$\pm 1,7$		
Polifenóis		0,8 a	1,4 b	1 a	1,6 b	28	0,0001
		$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,2$		
Carbono	Seca	447,2 ab	457,3 a	439,6 b	475,7 c	18,8	0,0001
		$\pm 12,9$	$\pm 21,8$	$\pm 12,6$	$\pm 7,6$		
Nitrogênio		12,2 a	13,3 ab	15,6 b	12 a	7,2	0,005
		$\pm 0,5$	$\pm 4,3$	$\pm 2,9$	$\pm 1,4$		
C:N		37 a	37 a	29 b	40 a	9	0,002
		± 4	$\pm 3,4$	$\pm 0,7$	$\pm 1,8$		
Polifenóis		1,4 a	2,4 b	1,2 a	1,8 ab	6,4	0,008
		$\pm 0,4$	$\pm 0,6$	$\pm 0,2$	$\pm 0,4$		
Carbono	Seca-chuvosa	410,2 ac	455,4 ab	418,8 c	448 b	12,5	0,002
		$\pm 33,5$	± 35	$\pm 25,9$	$\pm 16,7$		
Nitrogênio		12,8 a	14,6 ab	18,2 a	15,6 b	2,9	0,002
		$\pm 3,6$	$\pm 1,5$	$\pm 2,3$	$\pm 0,3$		
C:N		33	32	24	29	2,3	n. s.
		$\pm 0,7$	$\pm 0,6$	± 3	$\pm 3,5$		
Polifenóis		1,2 ab	2 b	0,8 a	1,6 ab	5	0,030
		$\pm 0,2$	$\pm 0,2$	$\pm 0,1$	$\pm 0,1$		

Estoques de Macro e Microelementos na Liteira

Os estoques de macro e micronutrientes correspondem a massa total de nutrientes contida na liteira acumulada sobre o solo em uma unidade de área. Neste estudo a unidade de área utilizada foi o hectare (ha).

Considerando que o material foliar contribui com a maior parte da liteira acumulada sobre o solo e constitui o componente com decomposição mais rápida, este estudo trata apenas dos estoques de macro e microelementos deste componente.

Os macroelementos estudados na liteira acumulada sobre o solo nos SAFs e na capoeira foram o cálcio, o fósforo, o magnésio e o potássio (Tabela 3.5). A análise de variância (ANOVA) seguida do teste Tukey, que comparou as médias entre os sistemas, mostrou que os estoques de macroelementos na liteira foram menores nos SAFs do que na capoeira, com exceção do potássio que não mostrou diferenças significativas. Entre os SAFs não houve diferenças significativas no estoque de macronutrientes.

Tabela 3.5. Estoques de macronutrientes ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) na liteira acumulada sobre o solo nos SAFs baseados em palmeiras, em fruteiras e em pastagens e na capoeira. Os valores são médias \pm desvios padrões de quatro amostras compostas em cada uma das três réplicas de cada sistema. Letras diferentes na mesma linha correspondem a variação significativa ao nível de $p < 0,05$.

Nutrientes	Sistemas agroflorestais			Capoeira	ANOVA	
	Palmeiras	Fruteiras	Pastagens		F	P
Fósforo	3,6 a $\pm 1,5$	4,4 a $\pm 2,3$	4,4 a $\pm 1,7$	1,6 b $\pm 0,8$	9,7	0,0001
Potássio	1,8 $\pm 2,1$	4,8 $\pm 5,3$	3 $\pm 1,4$	3,8 $\pm 7,8$	1,3	n. s.
Cálcio	44 a $\pm 8,9$	47,8 a $\pm 11,5$	42,5 a $\pm 12,1$	25,1 b $\pm 6,8$	17,5	0,0001
Magnésio	7,1 a $\pm 1,2$	6,5 a $\pm 1,1$	6 a $\pm 1,7$	4,4 b $\pm 1,2$	13	0,0001

Entre as fases sazonais estudadas, os estoques de fósforo na liteira acumulada sobre o solo foram menores na capoeira em todas as fases sazonais estudadas. Entre os SAFs, os estoques de fósforo foram maiores no SAF baseado em fruteiras durante a época chuvosa e no SAF baseado em pastagens durante a fase de transição entre as épocas seca e chuvosa (Tabela 3.6).

Os estoques de potássio na liteira acumulada sobre o solo foram maiores na capoeira durante a época chuvosa e menores também na capoeira, mas durante as fases de transição. Entre os SAFs, os estoques de potássio foram maiores no SAF baseado em fruteiras durante a época chuvosa.

Os estoques de cálcio na liteira acumulada sobre o solo foram menores na capoeira do que nos SAFs, principalmente durante as fases sazonais de transição. Entre os SAFs, os estoques de cálcio foram maiores no SAF baseado em pastagens durante a fase de transição entre as épocas seca e chuvosa.

Os estoques de magnésio na liteira acumulada sobre o solo foram menores na capoeira em todas as fases sazonais estudadas. Entre os SAFs, os estoques de magnésio foram menores no SAF baseado em pastagem durante as épocas chuvosa e seca, e no SAF baseado em fruteiras durante a fase de transição entre as épocas seca e chuvosa.

Tabela 3.6. Estoques de macronutrientes (kg ha⁻¹) na liteira acumulada sobre o solo nos SAFs baseados em palmeiras, em fruteiras e em pastagens e na capoeira durante as épocas de estudo. Os valores são médias ± desvios padrões de quatro amostras compostas de cada uma das três réplicas de cada sistema. Letras diferentes na mesma linha correspondem a variação significativa ao nível de p<0,05.

Nutrientes	Época	Sistemas agroflorestais			Capoeira	ANOVA	
		Palmeiras	Fruteiras	Pastagens		F	P
Fósforo	Chuvosa	4,3 a	6,3 b	4,8 a	2,1 c	28,6	0,0001
		± 0,7	± 0,5	± 0,7	± 0,1		
Potássio		0,9 a	5,3 b	2,2 ab	1,2 c	20,1	0,0001
		± 0,3	± 2	± 0,4	± 4,6		
Cálcio	Chuvosa-seca	39,2 ab	50,7 a	31 b	25,7 b	10,5	0,001
		± 6,5	± 8,8	± 3,5	± 2,2		
Magnésio		6,1 a	6,5 a	4,1 b	4,6 b	84	0,0001
		± 0,2	± 0,3	± 0,1	± 0,2		
Fósforo	Seca	4,1 a	5 ab	5,3 b	1,7 c	42,2	0,0001
		± 0,5	± 0,7	± 0,3	± 0,2		
Potássio		1,4 ab	6,8 a	4,1 a	1 b	6,3	0,017
		± 0,5	± 5,6	± 0,3	± 0,2		
Cálcio	Seca-chuvosa	41,3 a	52,3 a	42 a	24,3 b	16,4	0,0001
		± 4,7	± 6,6	± 4,3	± 3,7		
Magnésio		6,9 a	6,3 ab	6,6 a	4,4 b	5,8	0,011
		± 0,5	± 1,2	± 0,6	± 0,7		
Fósforo	Seca	4,3 a	4,1 a	3,8 a	1,9 b	20,3	0,0001
		± 0,4	± 0,7	± 0,1	± 0,2		
Potássio		3,4 ab	3,9 a	3,1 ab	1,3 b	4,9	0,019
		± 0,6	± 1,5	± 0,7	± 0,4		
Cálcio	Seca	49 ab	44,2 a	44,8 b	26,6 ab	4,3	0,045
		± 2,7	± 2,7	± 2,6	± 2,6		
Magnésio		7,4 a	6,7 a	5,7 b	4,2 c	55,7	0,0001
		± 0,2	± 0,5	± 0,3	± 0,3		
Fósforo	Seca-chuvosa	1,8 a	2,1 a	3,7 b	0,7 c	25,8	0,0001
		± 0,2	± 0,6	± 0,5	± 0,2		
Potássio		1,6 ab	3,1 a	2,7 a	0,5 b	6,5	0,007
		± 0,5	± 1,5	± 0,3	± 0,1		
Cálcio	Seca-chuvosa	46,5 a	43,9 a	52 b	24 c	104,3	0,0001
		± 0,5	± 2,2	± 2,4	± 2,5		
Magnésio		8 a	6,2 b	7,6 a	4,6 c	60,8	0,0001
		± 0,1	± 0,3	± 0,3	± 0,5		

Os microelementos estudados na liteira acumulada sobre o solo nos SAFs e na capoeira foram o ferro, o zinco e o manganês. Entre os SAFs e a capoeira, os estoques de ferro foram menores no SAF baseado em palmeiras. Os estoques de manganês foram menores na capoeira. Os estoques de zinco foram menores no SAF baseado em fruteiras (Tabela 3.7).

Tabela 3.7. Estoques de micronutrientes ($\text{kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) na liteira acumulada sobre o solo nos SAFs baseados em palmeiras, em fruteiras e em pastagens e na capoeira. Os valores são médias \pm desvios padrões de quatro amostras compostas em cada uma das três réplicas de cada sistema. Letras diferentes na mesma linha correspondem a variação significativa ao nível de $p < 0,05$.

Nutrientes	Sistemas agroflorestais			Capoeira	ANOVA	
	Palmeiras	Fruteiras	Pastagens		F	P
Ferro	1,45 a $\pm 1,11$	2,26 ab $\pm 1,91$	2,68 b $\pm 1,39$	1,67 ab $\pm 1,13$	3,5	0,022
Manganês	0,61 a $\pm 0,26$	0,69 a $\pm 0,24$	0,65 a $\pm 0,17$	0,42 b $\pm 0,13$	14,3	0,0001
Zinco	0,12 a $\pm 0,09$	0,07 b $\pm 0,04$	0,13 a $\pm 0,04$	0,11 ab $\pm 0,03$	6,1	0,001

Entre as fases sazonais estudadas, os estoques de ferro na liteira acumulada sobre o solo foram maiores no SAF baseado em pastagens durante a época seca e na fase de transição entre as épocas seca e chuvosa (Tabela 3.8). Os estoques de ferro não mostraram diferenças significativas na época chuvosa.

Os estoques de manganês na liteira acumulada sobre o solo foram menores na capoeira durante as fases sazonais de transição. Nas épocas chuvosa e seca não houveram diferenças significativas nos estoques de manganês na liteira acumulada sobre o solo.

Os estoques de zinco na liteira acumulada sobre o solo foram menores no SAF baseado em fruteiras durante a época chuvosa e na fase de transição entre as épocas

chuvosa e seca. Os estoques de zinco da liteira acumulada sobre o solo não mostraram diferenças significativas durante a época seca e na fase de transição entre as épocas seca e chuvosa.

Tabela 3.8. Estoques de micronutrientes (g ha^{-1}) na liteira acumulada sobre o solo nos SAFs baseados em palmeiras, em fruteiras e em pastagens e na capoeira durante as épocas de estudo. Os valores são médias \pm desvios padrões de quatro amostras compostas em cada uma das três réplicas de cada sistema. Letras diferentes na mesma linha correspondem a variação significativa ao nível de $p < 0,05$.

Nutrientes	Época	Sistemas agroflorestais			Capoeira	ANOVA	
		Palmeiras	Fruteiras	Pastagens		F	P
Ferro	Chuvosa	1497,9 \pm 732,6	2734,9 \pm 1206,8	3246,4 \pm 893	1820,8 \pm 260,3	2,7	n. s.
Manganês		601 \pm 235,9	743,8 \pm 198,5	646,9 \pm 129,4	432,3 \pm 80,6	2,5	n. s.
Zinco		140 ab \pm 32,8	91,1 a \pm 24,8	160,4 b \pm 15,1	130,7 ab \pm 6,8	5,1	0,016
Ferro	Chuvosa-seca	1672,4 a \pm 653,1	3795,8 b \pm 1156,2	2703,1ab \pm 468,6	2782,3 ab \pm 592,2	3,9	0,038
Manganês		597,9 ab \pm 151,7	747,4 a \pm 89,5	653,6 ab \pm 91,2	461,5 b \pm 58,9	4	0,034
Zinco		123,4 a \pm 18,4	71,9 b \pm 8	120,8 a \pm 23,1	93,8 ab \pm 10,3	6,9	0,006
Ferro	Seca	1850 ab \pm 193,5	1430,2 a \pm 443,2	2467,2 b \pm 303,5	1469,3 a \pm 446,1	5,3	0,015
Manganês		659,9 \pm 130,9	696,4 \pm 186,2	587,5 \pm 48,4	407,8 \pm 98,4	3,1	n. s.
Zinco		84,4 \pm 19,8	81,8 \pm 31,7	118,8 \pm 14,2	105,2 \pm 24,6	2,4	n. s.
Ferro	Seca-chuvosa	777,1 a \pm 36,8	1067,2 a \pm 623,3	2310,4 b \pm 484,8	621,9 a \pm 103,6	11,1	0,001
Manganês		578,6 ab \pm 62,4	568,2 a \pm 32,1	716,7 b \pm 37,9	363,5 c \pm 81,6	19,5	0,0001
Zinco		131,8 \pm 68,5	51,6 \pm 18,3	117,2 \pm 5	105,2 \pm 15,4	3,1	n. s.

DISCUSSÃO

Liteira Acumulada

As massas totais da liteira fina acumulada anualmente sobre o solo foram maiores na capoeira ($5,9 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), principalmente nas épocas chuvosa e seca. Em capoeiras de diferentes idades, localizadas na mesma área que o presente estudo (EMBRAPA/CPAA – DAS), Feldspausch *et al.* (2004) observaram que as capoeiras mais antigas (12-14 anos) estocam mais de $128,1 \text{ Mg ha}^{-1}$ de biomassa aérea, o que corresponde a 25 a 50% do acumulado em florestas primárias da região e a 150 a 400% do acumulado na biomassa aérea dos SAFs da EMBRAPA/CPAA – DAS (McCaffery, 2003). Esta biomassa aérea formada em capoeiras antigas podem estar contribuindo com a maior produção de liteira, a qual fica acumulada sobre o solo.

O SAF baseado em pastagem acumulou as menores massas de liteira ($1,7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), principalmente na fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca e entre as épocas seca e chuvosa. Este SAF tem duas espécies forrageiras que cobrem quase que totalmente o solo, a gramínea *Brachiaria brizantha* e a leguminosa *Desmodium ovalifolium*, além de poucas árvores perenes. Com esta composição de espécies, o acúmulo de liteira sobre o solo foi menor, visto que as gramíneas e as leguminosas produzem liteiras de rápida decomposição (Swift *et al.*, 1979).

Os SAFs baseados em palmeiras e em fruteiras, os quais são dominados por espécies perenes, acumularam valores intermediários de massa de liteira sobre o solo ($3,3$ e $3,6 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, respectivamente). As espécies perenes destes SAFs acumularam mais liteira sobre o solo do que as do SAF baseado em pastagens.

Estudos sobre o acúmulo de liteira realizados há sete anos nos mesmos SAFs utilizados no presente estudo, mostraram que as maiores massas de liteira foram observadas na capoeira, tanto na época seca ($7,8 \text{ Mg ha}^{-1}$) quanto na chuvosa ($4,8 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Tapia-Coral, 1998). No estudo de Tapia-Coral (1998), o SAF baseado em fruteiras mostrou as maiores massas de liteira ($5,6 \text{ Mg ha}^{-1}$) durante a época seca. O presente estudo mostrou valores de massas de liteira próximos ao observado por Tapia-Coral (1998) e durante a época seca as maiores massas de liteira também foram observadas na capoeira, mas entre os SAFs foram observados as maiores massa de liteira acumulada sobre o solo nos SAFs baseado em fruteiras e baseado em palmeiras, o que demonstra a recuperação e a manutenção do ambiente pelo desenvolvimento da camada de liteira sobre o solo dos SAFs com muitas plantas lenhosas em sua formulação.

Há vários estudos estimando o acúmulo de liteira sobre o solo das florestas amazônicas naturais, manejadas e perturbadas, tanto do Estado do Amazonas (Luizão, 1994; Luizão, 1995; Luizão *et al.*, 2004; Tapia-Coral, 1998; Martius *et al.*, 2004), como no de Rondônia (Dresch, 2003) e na Amazônia peruana (Tapia-Coral, 2004).

Na Estação Experimental da EMBRAPA/CPAA, localizada a 30km da cidade de Manaus, Martius *et al.* (2004) analisaram o acúmulo de liteira sobre o solo da floresta primária manejada (corte seletivo), capoeira de 8 anos e SAFs baseado em plantas madeiráveis. Martius *et al.* (2004) observaram maiores massas de liteira fina na capoeira ($22 - 26,6 \text{ Mg ha}^{-1}\text{ano}^{-1}$), seguida pelos SAFs ($14,2 - 16 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) e pela floresta primária ($10,9 - 12,7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$), sem diferenças significativas entre os dois últimos. Como no presente estudo, Martius *et al.* (2004) também observaram as maiores massas de liteira acumulada sobre o solo nos meses mais úmidos (época chuvosa) e mais secos (época seca).

Na Reserva Biológica de Campina, localizada a 60 km de Manaus, Luizão (1995) analisou o acúmulo de liteira sobre o solo e encontrou $6,5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de liteira fina na floresta primária de terra firme. As maiores massas de liteira acumulada foram observadas na época seca e no início da época chuvosa (meses mais secos).

Na Reserva de Cuieiras, localizada a 60 km de Manaus, Luizão *et al.*, (2004) analisaram o acúmulo de liteira sobre o solo de diferentes ambientes da floresta primária de terra firme (platô, declive e baixio) e mostraram que as massas de liteira fina ao longo da topossequência foram similares, variando de $5,4$ a $6,3 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

No município de Nova Califórnia, em Rondônia, onde foi conduzido o projeto RECA (Reflorestamento Econômico Consorciado e Adensado), Dresch (2003) estimou a massa de liteira acumulada sobre o solo de SAFs de 12 anos e floresta primária e encontrou massas de liteira fina similares entre os ambientes, com variações entre $9,3$ a $10,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ e as maiores massas de liteira foram observadas durante a época seca, com variações entre $12,7$ e $14,9 \text{ Mg ha}^{-1}$.

No “Centro de Investigaciones de Jenaro Herrera” do “Instituto de Investigaciones de la Amazonía Peruana”, Tapia-Coral (2004) analisou o acúmulo de liteira sobre o solo da floresta primária, capoeira de 16 anos e plantações florestais (SAFs) de *Cedrelinga catenaeformis* e *Simarouba amara* e encontrou as maiores massas de liteira fina acumulada sobre o solo da capoeira, durante a época seca ($8,7 \text{ Mg ha}^{-1}$) e as menores massas na plantação florestal de *C. catenaeformis* ($4,1 \text{ Mg ha}^{-1}$), durante a época chuvosa.

No presente estudo, as massas de liteira acumulada sobre o solo nos SAFs baseados em palmeiras e em fruteiras e na capoeira foram menores do que as massas de liteira de florestas primárias de Manaus (Luizão, 1995; Luizão *et al.*, 2004; Martius *et al.*, 2004), de Rondônia (Dresch, 2003) e da Amazônia peruana (Tapia-Coral, 2004), em SAFs de

Rondônia (Dresch, 2004), da Amazônia peruana (Tapia-Coral, 2004) e de capoeiras com 16 anos na Amazônia peruana (Tapia-Coral, 2004). Apenas Tapia-Coral (1988) registrou massas de liteira acumulada sobre o solo em SAFs e na capoeira próximas ao encontradas no presente estudo.

Além das diferenças regionais entre os diferentes estudos, também houve muita variação na forma de amostragem da liteira acumulada sobre solo. No presente estudo foram realizadas coletas trimestrais de amostras compostas de liteira, para diminuir as variações espaciais, e foi utilizado um quadrado de madeira de 25cm de lado para auxiliar as retiradas de liteira. Diferentemente, outros estudos realizaram coletas mensais de amostras simples de liteira com auxílio de uma sonda metálica de 21cm de diâmetro (Martius *et al.*, 2004), coletas semestrais de amostras simples com auxílio de um quadrado de madeira de 25cm de lado (Tapia-Coral, 2004), coletas semestrais de amostras compostas com auxílio de um quadrado de madeira de 15cm de lado (Tapia-Coral, 1998), coletas quadrimestrais de amostras simples com auxílio de coletores grandes (quadrado de madeira com 50cm de lado) (Luizão, 1995) e coletas trimestrais de amostras compostas com auxílio de um quadrado de madeira de 25cm de lado (Dresch, 2003).

No presente estudo, a liteira foi separada em material foliar (folhas) e lenhoso (galhos finos, frutos, flores e sementes). O material lenhoso da liteira fina acumulada sobre o solo mostrou uma menor contribuição na massa total da liteira, sendo cerca de 25 a 29% do total da massa de liteira fina. A capoeira mostrou as maiores massas de material lenhoso e foliar (1,5 e 4,4 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente).

Apenas o SAF baseado em palmeiras apresentou massa do material lenhoso similar a capoeira. A massa do material foliar foi maior na época chuvosa enquanto a do material

lenhoso na fase de transição entre as épocas seca e chuvosa. Entretanto, as maiores massas de liteira total foram observadas nas épocas chuvosa e na seca.

Martius *et al.* (2004) estimaram que na capoeira a massa do material lenhoso (flores, galhos e sementes) da liteira acumulada sobre o solo foi maior que a do material foliar, cerca de 54% da massa de liteira fina total correspondia ao material lenhoso. Já nos SAFs cerca de 63% da massa de liteira correspondia ao material lenhoso (Martius *et al.*, 2004). Segundo os autores a massa do material foliar da liteira acumulada sobre o solo foi decomposta mais rapidamente que a do material lenhoso (Martius *et al.*, 2004).

Na floresta de terra firme próxima a Manaus, Luizão (1995) também observou maior massa do material lenhoso ($3,7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) (galhos finos, flores e frutos), enquanto Dresch (2004), em Rondônia, não observou diferenças quanto a massa dos componentes da liteira (material foliar e lenhoso). Na Amazônia peruana, Tapia-Coral (2004) encontrou maior massa do material foliar ($5,7 \text{ Mg ha}^{-1}$) na floresta primária durante a época chuvosa e na capoeira ($7,2 \text{ Mg ha}^{-1}$) na época seca.

Geralmente, as capoeiras formadas na Amazônia produzem maiores massas de liteira que a floresta primária, mas as produções primárias líquidas de ambas são similares (Jordan, 1985) porque a floresta primária acumula maiores biomassas nas partes aéreas (troncos e galhos grossos) do que as capoeiras com idades entre 5 e 20 anos (Salomão *et al.*, 1998). A liteira produzida por florestas primárias da Amazônia é facilmente consumida pelos organismos decompositores e a liteira da capoeira fica mais tempo acumulada na camada de liteira sobre o solo. A maior dominância de *Vismia sp.* pode estar contribuindo com o acúmulo de liteira sobre o solo da capoeira, porque a liteira da *Vismia sp.* tem textura grossa e é de lenta decomposição devido as maiores concentrações de materiais

recalcitrantes (polifenóis) e as menores concentrações de materiais solúveis (Turner, 1994; Pérez-Harguindeguy *et al.*, 2000; Silva, 2000).

Qualidade Nutricional da Liteira

Segundo Rothe & Binkley (2001) os sistemas com maiores diversidade vegetal têm a camada de liteira acumulada sobre o solo composta por uma mistura de folhas de diferentes espécies que favorecem o maior fluxo de nutrientes para o ambiente, devido aos diferentes tempos de decomposição dos diversos tipos de liteira. Estes efeitos positivos são considerados sinérgicos, ou seja, quanto maior for a diversidade de espécies maior será a disponibilização de nutrientes para o solo (Wardle, 2002). Por outro lado, muitas vezes a mistura heterogênea das liteiras pode gerar efeitos antagônicos ou nulos na disponibilização de nutrientes no solo, quando comparados a monocultura (Hector *et al.*, 2000; Wardle, 2002). Há casos em que a perda de massa não corresponde com a disponibilidade de nutrientes (Rothe & Binkley, 2001), uma consequência da qualidade nutricional da liteira (Swift *et al.*, 1979; Vanlauwe *et al.*, 1997).

As concentrações de carbono na liteira acumulada sobre o solo foram maiores na capoeira do que nos SAFs, com exceção do SAF baseado em fruteiras que mostrou concentrações de carbono similares as da capoeira. A capoeira dominada por *Vismia* sp. tem folhas de textura muito grossa e de difícil decomposição. O SAF baseado em fruteiras não mostrou diferenças quanto as concentrações de carbono na liteira porque é constituído por muitas espécies vegetais, de várias texturas e qualidades nutricionais.

Dresch (2003) encontrou maiores concentrações de carbono na liteira acumulada sobre o solo do SAF baseado em pastagem enriquecida com cálcio, sem, no entanto, evidências de influência sazonal significativa em seu estudo. No presente estudo, as

concentrações de carbono na liteira foram maiores durante a época seca, devido a difícil decomposição do material seco, pois a hidratação e a hidrólise são processos físicos que facilitam a decomposição química da liteira, viabilizando a atividade e o crescimento microbiano (Swift *et al.*, 1979).

Martius *et al.* (2004) não observaram diferenças nas concentrações de carbono na liteira acumulada na floresta primária, capoeira e SAFs, com valores próximos aos observados nos SAFs do presente estudo.

Na floresta amazônica peruana, Tapia-Coral (2004) observou que as concentrações de carbono na liteira acumulada foram maiores do que no presente estudo. Tapia-Coral (2004) observou que as concentrações de carbono na liteira na floresta primária (41,5%) e no SAF com plantação de *Cederelíngia catenaeformis* (40,3%) foram maiores que a encontrada na capoeira (39,4%), durante a época chuvosa.

No presente estudo, as concentrações de nitrogênio na liteira acumulada foram maiores no SAF baseado em pastagem e em fruteiras, principalmente na época chuvosa e na fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca. O SAF baseado em pastagem é composto por leguminosas e gramíneas, as quais fixam nitrogênio com maior eficiência (Swift *et al.*, 1979). O SAF baseado em fruteiras tem maior diversidade de liteiras, o que pode influenciar a disponibilização do nitrogênio. As concentrações de nitrogênio na liteira acumulada foram menores na capoeira durante a época seca, quando a biomassa dos organismos decompositores foi menor (Tapia-Coral, 2004).

As concentrações de nitrogênio na liteira acumulada foram menores no presente estudo do que no estudo de Tapia-Coral (2004), mas em ambos estudos as concentrações de nitrogênio na liteira foram significativamente menores na capoeira do que nos SAFs.

Martius *et al.* (2004) observaram que as concentrações de nitrogênio na liteira acumulada sobre o solo foram menores na capoeira do que na floresta primária e nos SAFs, indicando uma lenta decomposição da liteira na capoeira. Estes valores foram próximos ao encontrado no presente estudo.

Dresch (2003) observou maiores concentrações de nitrogênio na liteira acumulada sobre o solo na floresta primária do que nos SAFs. Na floresta primária estudada por Dresch (2003) havia uma grande abundância de espécies leguminosas arbóreas fixadoras de nitrogênio, principalmente do gênero *Inga* sp. No geral, as menores concentrações de nitrogênio na liteira acumulada sobre o solo foram observadas na época seca (Dresch, 2003).

Os valores da relação carbono e nitrogênio (C:N) indicam a velocidade da mineralização (disponibilização) do nitrogênio da liteira (Swift *et al.*, 1979; Vanlauwe *et al.*, 1997; Rothe & Binkley, 2001).

No presente estudo o SAF baseado em pastagem mostrou as menores massas de liteira acumulada sobre o solo e os menores valores de relação C:N, principalmente na fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca. Os outros SAFs e a capoeira mostraram massas de liteira e valores de relação C:N da liteira similares. Entre as fases sazonais, os valores da relação C:N de todos os sistemas foram maiores na época seca e menores na época chuvosa.

Dresch (2003) encontrou valores de relação C:N da liteira acumulada sobre o solo nos SAFs em Rondônia variando de 35 a 45. Talvez por isso, a massa de liteira acumulada sobre o solo medida por Dresch (2003) foi maior que a do presente estudo. Tapia-Coral (2004) não observou diferenças nos valores de relação C:N da liteira entre a floresta

primária, a capoeira e os SAFs estudados na Amazônia peruana (C:N próxima de 20 em todos os sistemas).

Martius *et al.* (2004) observaram valores de relação C:N da liteira acumulada (variando entre 31 a 33) próximos ao encontrado no presente estudo sem, no entanto, observar diferenças significativas nos valores de C:N entre os SAFs, a capoeira e a floresta primária.

A taxa de polifenóis, associada as concentrações de carbono e nitrogênio e aos valores da relação C:N, é outro índice de qualidade nutricional da liteira (Swift *et al.*, 1979; Vanlauwe *et al.*, 1997). Os polifenóis estão presentes em pequenas concentrações nas folhas, mas tem um efeito extremamente negativo sobre a decomposição e mineralização do nitrogênio da matéria orgânica do solo (Nair *et al.*, 1999), principalmente em ecossistemas onde o nitrogênio é limitante (Seneviratne, 2000) como na Amazônia central. As moléculas de polifenóis formam complexos com proteínas e outras moléculas, dando origem aos taninos condensados (proantocianidinas) que influenciam a disponibilização do nitrogênio da liteira (Nair *et al.*, 1999; Aerts *et al.*, 1999). Os taninos são compostos secundários sintetizados pelas plantas para protegê-las contra a herbivoria por animais e insetos; as doenças causadas por fungos, bactérias e vírus; o estresse ambiental e também os raios ultra-violeta (Pel, 1998). Alguns taninos condensados são solúveis, enquanto outros são insolúveis e funcionam como a lignina, formando a parede celular da célula vegetal e tornando as proteínas vegetais física e quimicamente inacessíveis aos organismos decompositores (Nair *et al.*, 1999).

Segundo Mafongoya *et al.* (1998) é comum em ecossistemas tropicais as taxas de polifenóis da liteira de SAFs estarem abaixo de 5%, mas podem ocorrer valores maiores. No presente estudo as taxas de polifenóis foram maiores durante a época seca no SAF

baseado em fruteiras e na capoeira, e menores durante a época chuvosa nos SAFs baseado em palmeiras e baseado em pastagem, no entanto os valores nunca foram maiores que 5%.

Tapia-Coral (2004) encontrou maiores taxas de polifenóis da liteira (6,9 – 30,5%) do que o presente estudo. Em seu estudo, as taxas de polifenóis da liteira durante a época chuvosa foram menores no SAF com plantação de *Cederelinga catenaeformis* (6,9%) do que na capoeira (14,8%) (Tapia-Coral, 2004). Talvez por este motivo a massa de liteira acumulada observada por Tapia-Coral (2004) foi maior do que a do presente estudo.

Segundo Jordan (1985) as liteiras de menor qualidade nutricional produzidas pelas florestas tropicais primárias da Amazônia são eficientes na conservação dos nutrientes na matéria orgânica do solo antes que eles sejam lixiviados pelas águas das chuvas, consumidos por herbívoros e/ou mineralizados pela atividade dos organismos decompositores. Além disso, em ambientes de menor fertilidade natural ocorrem competições entre as plantas e os organismos decompositores da matéria orgânica do solo por nutrientes disponíveis no solo (Moorhead *et al.*, 1998). Liteiras com maiores taxas de polifenóis podem diminuir esta competição.

Os estudos de McCaffery (2003) sobre o estoque de carbono na biomassa aérea dos SAFs mostraram que a maior biomassa foi observada na capoeira (111,9 M ha⁻¹) e entre os SAFs a maior biomassa foi no baseado em palmeiras (82 M ha⁻¹). No entanto, a capoeira tem menores estoques de nutrientes (N, P, K e Mg) na biomassa do que os SAFs. O presente estudo mostrou maiores massas de liteira na capoeira e entre os SAFs, embora não significativo, as maiores massas de liteira foram observadas no SAF baseado em fruteiras.

Estoques de Macro e Microelementos na Liteira

Estudos realizados nos SAFs há sete anos (Tapia-Coral, 1998) mostraram maiores estoques de cálcio, magnésio e potássio na liteira acumulada do que o presente estudo. Somente os estoques de fósforo foram similares. Estes resultados mostram que em estágios sucessionais mais avançados a conservação de nutrientes na biomassa é maior, pois a perda via liteira é menor (Jordan, 1985).

Comparando os valores dos estoques de cálcio, magnésio e potássio na liteira sobre o solo do presente estudo com o trabalho de Dresch (2003) foi observado que os estoques de cálcio do estudo de Dresch (2003) foram menores do que os observados no presente estudo, principalmente no SAF baseado em fruteiras durante a época chuvosa; os estoques de magnésio foram maiores, principalmente no SAF baseado em pastagem enriquecida com cálcio durante o início da época seca; e os estoques de potássio também foram maiores, principalmente na floresta primária durante o final da época seca. Os estoques de cálcio, magnésio e potássio na liteira acumulada sobre o solo do estudo Dresch (2003) podem estar relacionadas as diferenças ambientais entre as florestas amazônicas central e ocidental. O clima da região de Rondônia é classificado como *Aw* na classificação de Köppen (clima tropical chuvoso com precipitação inferior a 2000 mm por ano), enquanto o da região do estudo é *Amw* (tropical chuvoso com precipitação superior a 2000 mm por ano). O solo de Rondônia é classificado como Cambissolo Vermelho-Amarelo Álico (Boulet, 2000) e o solo da região do presente estudo é classificado como Latossolo Amarelo Distrófico (Ranzini, 1980). Estas características ambientais tem grande influência na disponibilização de nutrientes da matéria orgânica para o solo e seus organismos.

Tapia-Coral (2004) encontrou os maiores estoques de cálcio na liteira acumulada na plantação florestal de *Simarouba amara* (41,4 kg ha⁻¹) e na capoeira (38,7 kg ha⁻¹), principalmente na época seca. Os estoques de magnésio na liteira acumulada foram maiores na plantação florestal de *Cedrelinga catenaeformis* (15,9 kg ha⁻¹), na floresta primária (13,9 kg ha⁻¹) e na capoeira (12,8 kg ha⁻¹), principalmente durante a época seca. Os estoques de potássio foram maiores na liteira da floresta primária (54,3 kg ha⁻¹) e nas plantações florestais de *Cedrelinga catenaeformis* (18,1 kg ha⁻¹) e de *Simarouba amara* (17,3 kg ha⁻¹), principalmente na época chuvosa. Comparando com o presente estudo, os estoques de cálcio observadas por Tapia-Coral (2004) foram similares, os estoques de magnésio foram o dobro e os de potássio nas plantações florestais foram dez vezes maiores ao observado no presente estudo.

O fósforo é um elemento muito importante para as plantas. Na maioria dos solos tropicais o crescimento das plantas é limitado pela disponibilidade de um ou mais nutrientes, sendo o fósforo considerado o elemento mais limitante nos solos ácidos e sua falta pode limitar a produtividade primária em muitos ecossistemas (Vitousek *et al.*, 1994; Epstein & Bloom, 2005).

No presente estudo, os estoques de fósforo na liteira acumulada sobre o solo foram menores na capoeira, principalmente durante a fase sazonal de transição entre as épocas seca e chuvosa e maiores nos SAFs, principalmente durante a época chuvosa e na fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca. Os estoques de fósforo na liteira acumulada sobre o solo dos SAFs da Amazônia peruana (Tapia-Coral, 2004) foram similares ao observado no presente estudo e os menores estoques de fósforo também foram observados na capoeira (0,18 g kg⁻¹). Estes resultados demonstram a capacidade da liteira dos SAFs em recuperar os estoques de fósforo para o ambiente antes degradado.

Em Rondônia, Dresch (2003) encontrou menores estoques de fósforo na liteira acumulada sobre o solo do que o presente estudo. No estudo de Dresch (2003) os estoques de fósforo foram maiores na floresta primária durante o final da época seca. Em contraste ao encontrado no presente estudo e no de Tapia-Coral (2004), Dresch (2003) mediu os menores estoques de fósforo na época chuvosa, o que pode estar relacionado ao menor número de espécies e maior espaçamento entre as plantas nos SAFs estudados por Dresch (2003). Uma outra explicação para as maiores concentrações do fósforo na liteira acumulada nos SAFs no presente estudo pode estar na adição ao solo de adubo orgânico proveniente da poda de *Gliricidia sepium* e *Inga eludis*, ambas espécies leguminosas ricas em nitrogênio e fósforo.

Em floresta primária de terra firme, Luizão (1995) encontrou maiores estoques de fósforo na liteira acumulada sobre o solo do que o presente estudo. A área do presente estudo sofreu várias perturbações antrópicas no passado, causadas pelas atividades de corte e queima. Kauffman *et al.* (1995) estimaram que a floresta amazônica brasileira perde cerca de 32% do fósforo durante as atividades de corte e queima. Segundo Ewel *et al.* (1981), a floresta primária da Costa Rica perde cerca de 80% do fósforo durante as atividades de corte e queima.

Além dos macronutrientes, os micronutrientes ferro, manganês e zinco são componentes essenciais para as plantas e para os organismos decompositores da matéria orgânica do solo (Swift *et al.*, 1979). Nas plantas, os micronutrientes funcionam como catalisadores do processo de fotossíntese (Fe, Mn e Zn) e como componentes de vários sistemas enzimáticos que regulam diversas atividades do metabolismo (Fe e Mn). Nos organismos decompositores, o ferro, o manganês e o zinco estão estocados nos seus tecidos corporais (Swift *et al.*, 1979).

No presente estudo, os estoques de manganês na liteira acumulada sobre o solo foram maiores nos SAFs do que na capoeira, principalmente na fase sazonal de transição entre as épocas seca e chuvosa. Os estoques de ferro na liteira foram menores no SAF baseado em palmeiras do que nos demais SAFs e na capoeira. Os estoques de zinco foram menores no SAF baseado em fruteiras, durante a fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca.

O manganês é um dos micronutrientes do solo mais abundante e as concentrações adequadas de manganês para as plantas é de 50 mg kg^{-1} (Coelho & Verlengia, 1979; Epstein & Bloom, 2005), muito abaixo do observado no presente estudo. Segundo Epstein & Bloom (2005) o manganês é um constituinte da enzima superóxido dismutase que protege as plantas dos efeitos tóxicos dos radicais livres liberados pela oxidação da água em gás oxigênio (O_2) durante a fase escura da fotossíntese. Os índices de pH do solo são determinantes nas concentrações de manganês no solo. No solo o manganês está em solução nas formas divalente (Mn^{2+}), trivalente (Mn^{3+}) e tetravalente (Mn^{4+}). As plantas utilizam o manganês divalente, o qual está presente em menores concentrações nos solos com baixos índices de pH (Coelho & Verlengia, 1979; Epstein & Bloom, 2005). Estudos sobre os efeitos do manganês no crescimento das micorrizas arbusculares mostraram que dependendo do tipo de substrato e das concentrações de manganês (superiores a $0,05\text{mM}$ ou $27,5 \text{ mg kg}^{-1}$), as micorrizas arbusculares podem ser inibidas (Malcová *et al.*, 2002). Estudos em casa de vegetação com espécies gramíneas utilizadas para recuperação de áreas degradadas nos EUA (Paschke *et al.*, 2005) mostraram que a toxidez causada pelo excesso de manganês tem efeito negativo no desenvolvimento das raízes.

Nos SAFs baseado em palmeiras e em pastagens as concentrações de zinco estiveram acima do considerado tóxico para os solos tropicais (20 mg kg^{-1}) (Epstein &

Bloom, 2005). As liteiras de decomposição lenta, acumulam os elementos ferro e zinco (Luizão & Schubart, 1987). Os menores estoques de ferro na liteira acumulada sobre o solo do SAF baseado em palmeiras e os menores estoques de zinco no SAF baseado em fruteiras podem estar relacionada a uma taxa de decomposição da matéria orgânica do solo mais eficiente nestes SAFs.

A capoeira mostrou os menores estoques de cálcio, fósforo, magnésio, manganês e potássio na liteira acumulada sobre o solo. Barros *et al.* (2003) que estudaram a comunidade de macrofauna nos solos dos mesmos SAFs e capoeiras do presente estudo, os solos dos SAFs têm maiores biomassas de macrofauna do que a capoeira, o que contribui, entre outros, para acelerar a decomposição, a mineralização e a ciclagem dos nutrientes da liteira. Outra razão para o menor estoque de nutrientes na liteira da capoeira pode estar relacionada a baixa diversidade de espécies e a baixa qualidade nutricional da liteira de *Vismia* sp., espécie dominante na capoeira (Swift *et al.*, 1979; Wardle & Lavelle, 1997).

Quanto ao valor econômico dos SAFs estudados, Santos *et al.* (2002) concluíram que a rentabilidade anual por hectare dos componentes perenes dos SAFs foi de R\$ 5.189,00 para o SAF baseado em pastagens, R\$ 6.363,00 para o baseado em palmeiras e R\$ 10.127,00 para o baseado em fruteiras. Comparando com a massa de liteira acumulada sobre o solo do presente estudo foi possível observar que o SAF baseado em pastagens, que tem o menor valor econômico é o sistema com as menores massas de liteira acumulada. Já o SAF baseado em fruteiras, que tem o maior valor econômico, e o baseado em palmeiras têm as maiores massa de liteira acumulada. As principais diferenças na liteira dos SAFs baseado em palmeiras e em fruteiras são as taxas de polifenóis e os estoques de potássio e zinco na liteira. Assim, o valor econômico do SAF baseado em palmeiras pode ser aumentado, quando for implementado neste SAF formas de manejo da matéria orgânica do

solo que aumentem os estoques de potássio e as taxas de polifenóis e diminuam os estoques de zinco na liteira.

Analisando os índices da qualidade de liteira utilizado no presente estudo, pode ser observado que os SAFs mostraram maiores estoques de nitrogênio (SAF baseado em fruteiras e em pastagem), menores estoques de carbono (SAFs baseado em palmeiras e em pastagem), menores valores de relação C:N (SAF baseado em pastagem) e menores taxas de polifenóis (SAFs baseado em palmeiras e em pastagem), demonstrando que o manejo de ambientes degradados contribui para restituir a fertilidade natural do solo.

No entanto, a capoeira também mostrou seu valor ecológico e econômico ao acumular as maiores massas de liteira sobre o solo, o que contribui com a recuperação da fertilidade natural do solo. Assim, em projetos futuros a espécie *Vismia* sp. poderia ser utilizada como um componente agroflorestal em SAFs, por produzir maiores massas de liteira e por registrar os maiores valores de relação C:N e taxa de polifenóis, o que favorece a mineralização de nutrientes essenciais em diferentes estágios da decomposição da matéria orgânica do solo.

CONCLUSÕES

O estoque de liteira acumulada sobre o solo na capoeira foi maior do que nos SAFs, mas a liteira da capoeira é pobre nos elementos cálcio, fósforo, magnésio, manganês, nitrogênio e potássio e a taxa de polifenóis da liteira da capoeira é alta.

O SAF baseado em pastagem estocou as menores massas de liteira sobre o solo e a taxa de polifenóis da liteira foi muito baixa, enquanto a concentração de nitrogênio foi alta. Esses fatores podem conduzir a uma perda de nutrientes do ambiente, porque a decomposição da liteira é muito rápida e os nutrientes dissolvidos (mineralizados) podem ser facilmente lixiviados e perdidos do sistema.

O SAF baseado em fruteiras produziu a mesma quantidade de liteira que o SAF baseado em palmeiras e ambos sistemas mostraram os mesmos índices de qualidade nutricional da liteira, mas eles diferiram significativamente quanto as concentrações de potássio (maiores no SAF com fruteiras) e de zinco (maiores no SAF com palmeiras).

Devido a baixa qualidade nutricional da liteira da espécie *Vismia* sp. ela poderia ser incluída em projetos de manejo agroflorestal, por favorecer a conservação de nutrientes.

CAPÍTULO IV

BIOMASSA DE RAÍZES E DECOMPOSIÇÃO DA LITEIRA EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS E EM VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA DA AMAZÔNIA CENTRAL

INTRODUÇÃO

A conservação de nutrientes em florestas tropicais sobre solos pobres e intemperizados é muito importante para a manutenção da produtividade do ecossistema (Jordan, 1985; Cuevas & Medina, 1988; Luizão, 1994). Um dos mecanismos que influencia a conservação de nutrientes em florestas tropicais é o desenvolvimento de uma camada de raízes finas densa e superficial que filtra e retém parte dos elementos disponibilizados pela matéria orgânica do solo, diminuindo as perdas por lixiviação (Stark & Jordan, 1978; Jordan, 1985; Cuevas & Medina, 1988; Luizão, 1994).

As raízes saudáveis liberam no solo compostos orgânicos solúveis, como açúcares, aminoácidos e ácidos orgânicos, os quais atraem populações microbianas, beneficiando a decomposição da liteira e a conservação de nutrientes no ecossistema (Moreira & Siqueira, 2000).

Na floresta amazônica (Cuevas & Medina, 1988; Luizão 1994), as raízes finas têm influência na absorção de cálcio e magnésio em ambientes com solo de baixa fertilidade natural, no entanto, não foram observadas influências das raízes finas na perda de massa da matéria orgânica em decomposição.

OBJETIVO GERAL

Avaliar a contribuição das raízes finas na decomposição, liberação e conservação de nutrientes em sistemas agroflorestais (SAFs) e em vegetação secundária (capoeira) da Amazônia central.

Para obter estas informações foram investigadas as seguintes questões:

1. Qual é a taxa de decomposição da liteira de *Theobroma grandiflorum* (S) K. Schumg (cupuaçu) em SAFs e em capoeira de mesma idade?
2. Qual a influência das raízes finas de *Theobroma grandiflorum* e *Vismia* sp. na perda de massa, na disponibilização e na absorção de nutrientes da liteira em SAFs e em capoeira de mesma idade?

MATERIAIS E MÉTODOS

A técnica dos Sacos de Malha

A técnica do saco de malha (“*litter bags*”) (Melillo *et al.*, 1982), foi utilizada para o estudo da influência das raízes finas na decomposição da liteira e na liberação de nutrientes. A técnica consiste em depositar a liteira, de peso e concentração inicial de nutrientes conhecidos, dentro de sacos de malha. Estes sacos foram colocados sobre o solo para acompanhar, por um período de tempo pré-estabelecido, a decomposição da liteira retida nele. Em intervalos pré-estabelecidos, os sacos de malha foram retirados do campo e na liteira residual em seu interior foram analisadas a massa seca e a concentração de nutrientes.

Área de Estudo

O estudo foi realizado em capoeiras e SAFs estabelecidos em 1991 na Estação Experimental da EMBRAPA-CPAA, em Manaus. Cada SAF tem três réplicas e a capoeira tem duas réplicas independentes. Os SAFs estudados foram o sistema agroflorestal 1 (AS1) baseado em palmeiras e o sistema agroflorestal 2 (AS2) que é baseado em fruteiras (Santos, 2000). Estes SAFs foram escolhidos porque ambos possuem o cupuaçu em suas formulações.

Na estação chuvosa (05/04/2001) foi implantado o experimento de decomposição com duração de 412 dias. A liteira foi confinada em sacos de malha (“*litter bags*”) de 1mm de malha, dimensões de 28cm x 19cm e com furos de 10mm de diâmetro para permitir a entrada dos organismos decompositores. No interior de cada saco de malha foi depositada uma massa seca de cerca de 5g de liteira recém-caída do cupuaçu (*Theobroma grandiflorum* (S) K. Schumg). Os sacos de malha foram colocados sobre o solo a 40cm de distância do caule dos cupuaçuzeiros nos SAFs e da *Vismia* sp na capoeira. Em cada SAF e na capoeira três plantas foram sorteadas para receberem cinco pares de sacos de malha cada uma. Periodicamente um saco de malha de cada par foi levantado do solo e invertido, impedindo a penetração das raízes finas, enquanto o outro foi mantido intocado no solo. Aos 63 (em 06/06/2001), 120 (em 20/08/2001), 211 (em 31/10/2001), 358 (em 27/03/2002) e 412 (em 20/06/2002) dias da implantação do experimento um par de sacos de malha de cada planta em cada sistema foram cuidadosamente retirados do campo e a liteira residual e as raízes finas em seu interior foram coletadas. O prazo de 412 dias do experimento foi o necessário para que cerca de 50% da massa seca da liteira de cupuaçu depositada no interior do saco de malha fosse decomposta. No laboratório, a liteira residual e as raízes

finas foram cuidadosamente limpas com pincéis, secas em estufa a 64⁰C por 72h, pesadas e reservadas para as análises posteriores.

Taxas de Decomposição

As taxas de decomposição foram calculadas considerando a decomposição da liteira do cupuaçu como uma função exponencial. A equação utilizada para o cálculo da constante de decomposição foi $P_F = P_I e^{-kt}$ (Olson, 1963), onde P_F representa o peso final da liteira residual; P_I , o peso inicial da liteira em decomposição; k , a constante instantânea de decomposição e t , o tempo de decomposição. O índice de meia-vida foi calculado a partir da equação $t_{1/2} = 0,693 \div k$, onde $t_{1/2}$ representa a meia-vida (Paul & Clark, 1996).

Análises Químicas

As análises químicas na liteira foram realizadas no Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA), Laboratório Temático de Solo e Planta (preparação de amostras) e Laboratório de Nutrição Vegetal (digestão ácida das amostras e leitura das absorbâncias dos macro e micronutrientes). Na EMBRAPA – CPAA, Laboratório de Solos foram feitas as análises de carbono e nitrogênio da liteira.

Para as análises de cálcio, magnésio, potássio, fósforo, ferro, manganês e zinco foram realizadas extrações com solução duplo-ácida composta pelos ácidos nítrico e perclórico ($\text{HNO}_3 + \text{HClO}_4$) em uma proporção de 3:1 (Silva, 1999). A mistura ficou reagindo por um período de 14h e depois foi feita a digestão das amostras em capela, até que todo óxido nitroso (NO_2) e o ácido perclórico (HClO_4) das amostras fossem consumidos. Após a digestão, a mistura foi transferida para um balão volumétrico e acrescida de água destilada. Esta solução concentrada foi utilizada para medir as

concentrações dos microelementos ferro, manganês e zinco. Para medir as concentrações dos macroelementos fósforo, cálcio, magnésio e potássio foi necessário diluir a solução concentrada em 20 vezes. As leituras de fósforo foram realizadas em Espectrofotômetro UV visível 1240 da marca Shimadzu, ao comprimento de onda (λ) de 725nm. Os elementos Ca, K, Mg, Fe, Mn, e Zn foram lidos em Absorção Atômica da marca Perkin-Elmer (AA-1475-Varian). Para a determinação do carbono e nitrogênio totais da liteira foi utilizado um analisador CHN (CHNOS Vario EL).

Análise dos Dados

Os dados foram analisados utilizando a análise de variância de dois fatores (ANOVA two-way). As variáveis independentes foram os sistemas (SAFs e capoeira) e a presença de raízes. As variáveis dependentes foram a massa seca de liteira residual e de raízes finas, as concentrações de macro (Ca, K, Mg e P) e microelementos (Fe, Mn e Zn) e as concentrações de carbono, nitrogênio e a relação carbono:nitrogênio (C:N) da liteira residual. Quando constatado algum efeito foi aplicado o teste de “Tukey”, o qual fez uma comparação entre os SAFs e a capoeira. Também foram aplicadas regressões lineares simples para observar a relação da decomposição da liteira e o crescimento das raízes finas com a concentração residual de nutrientes na liteira. Os gráficos que representam estes resultados possuem barras que correspondem ao erro padrão da amostra, que foi calculado utilizando a seguinte equação: Erro padrão = raiz quadrada do desvio padrão dividido pelo número de observações (Magnusson & Mourão, 2003).

RESULTADOS

Concentrações Iniciais dos Elementos na Liteira

As concentrações iniciais dos elementos estocados na liteira recém-caída do cupuaçu utilizada neste estudo estão na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Relação C:N e concentrações iniciais dos micro e macronutrientes da liteira recém-caída do cupuaçu. Os valores são médias e desvios-padrões (n = 3).

C	N	C:N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Zn
44,8	0,8	57	0,2	0,5	10	3,3	26,3	298,3	19,3
± 4,4	± 0,04	± 5,2	± 0,01	± 0,06	± 0,13	± 0,05	± 3,2	± 4,7	± 1,5

Biomassa das Raízes Finas

O crescimento das raízes finas nos sacos de malha perturbados foi negligível. Nos SAFs, as raízes finas cresceram dentro dos sacos de malha deixado em contínuo contato com a liteira e o solo ao longo do estudo foram colonizadas por ectomicorrizas (Figura 4.1c). A massa seca das raízes finas que cresceu no interior dos sacos de malha nos SAFs baseado em palmeiras e em fruteiras foi cerca de 10 vezes maior do que na capoeira ($F = 5,8$; $p = 0,006$) (Figura 4.2). No SAF baseado em palmeiras e na capoeira as massas das raízes finas aumentaram continuamente a partir da segunda coleta, durante a época seca (aos 120 dias após a implantação do experimento). No SAF baseado em fruteiras, embora a massa seca de raízes finas também aumentasse a partir da segunda coleta, ela parou de se desenvolver a partir da quarta coleta (aos 358 dias), durante a época chuvosa.

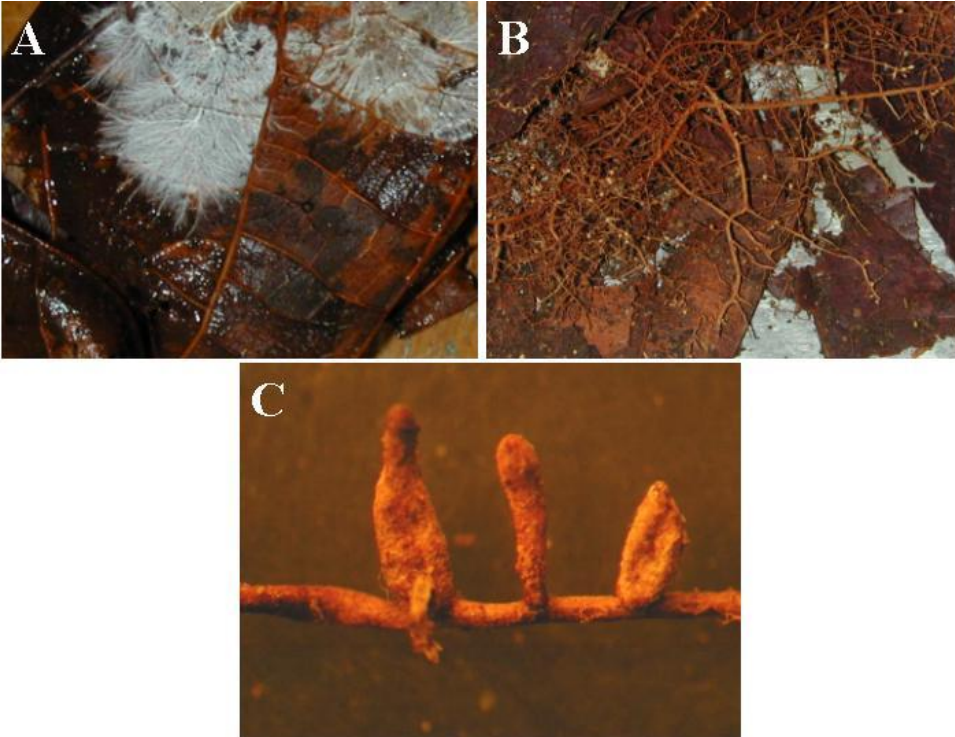


Figura 4.1. Fotos da liteira e das raízes do cupuaçu em diferentes estágios de decomposição. (A) Liteira apresentando colonização inicial por micélio de fungo (podridão branca) na primeira coleta, aos 63 dias de implantação do experimento no campo; (B) raízes finas do cupuaçu que penetraram no saco de malha na quarta coleta, aos 358 dias; (C) raiz do cupuaçu apresentando colonização por fungos ectomicorrízicos.

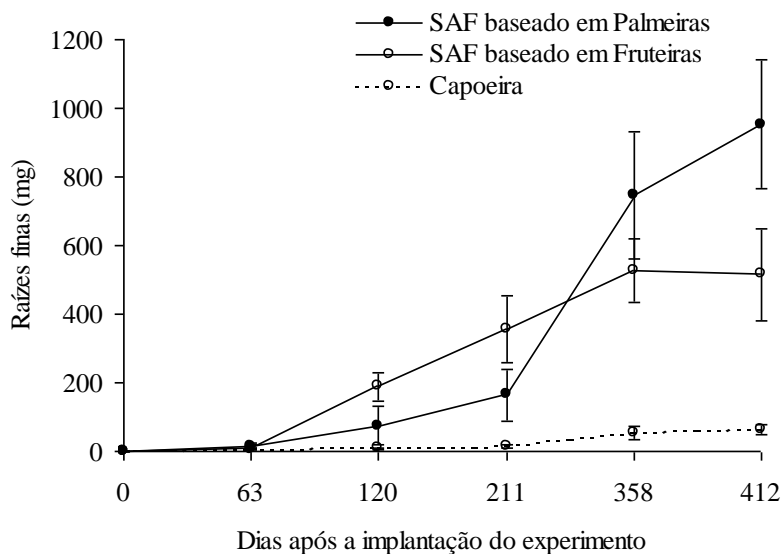


Figura 4.2. Massa seca (mg) das raízes finas que cresceram dentro dos sacos de malha que ficaram em contato direto com o solo e a liteira. Cada ponto representa a média de três sacos de malha retirados em três réplicas dos SAFs e em duas réplicas da capoeira em cada coleta. As barras verticais correspondem ao erro padrão da média.

Massa Seca de Liteira Residual

A massa seca da liteira residual do cupuaçu diminuiu ao longo do período de decomposição em todos os sistemas estudados (Figura 4.3). A capoeira mostrou maior perda de liteira residual, mas não diferiu estatisticamente dos SAFs. Após quase um ano (na quarta coleta) foi observado a influência das raízes finas na decomposição da liteira residual no SAF baseado em palmeiras, mas os valores não foram diferentes estatisticamente.

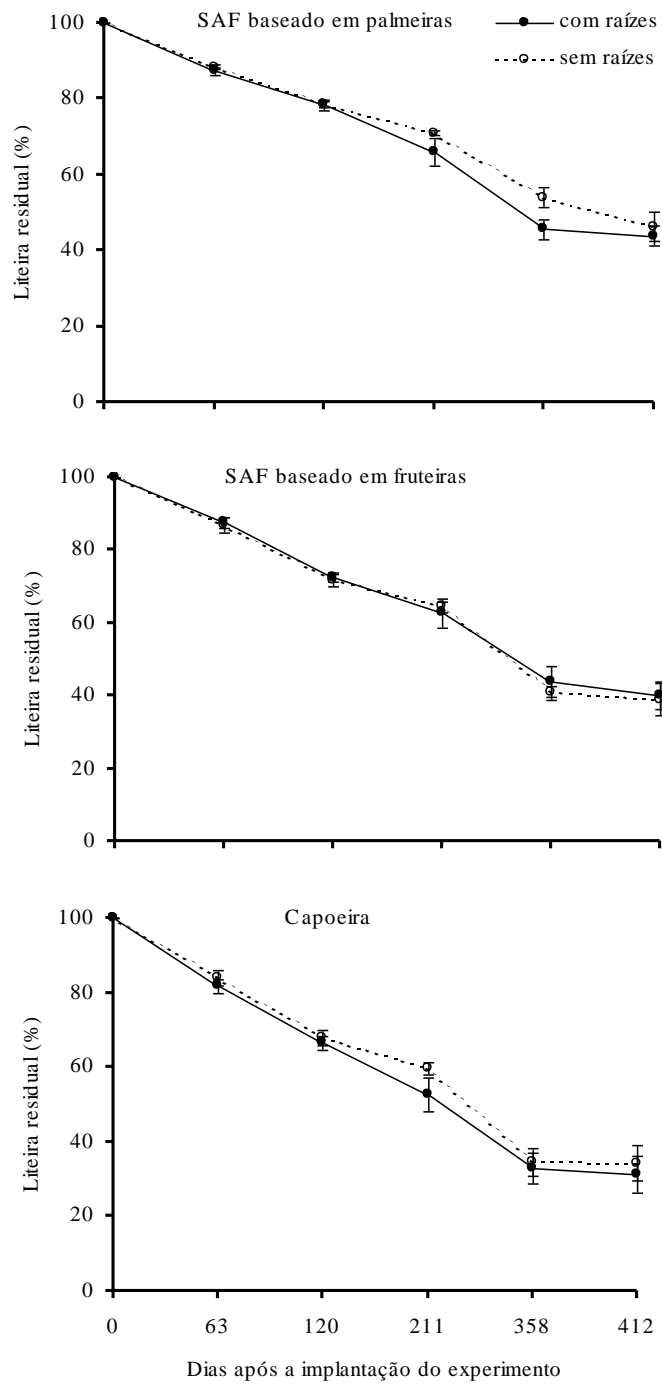


Figura 4.3. Littera residual do cupuaçu nos sacos de malha com e sem presença de raízes. Cada ponto representa a média de três sacos de malha retirados em três réplicas dos SAFs e em duas réplicas da capoeira em cada coleta. As barras correspondem ao erro padrão.

Taxas de Decomposição

No presente estudo, a capoeira mostrou a maior taxa de decomposição, que correspondeu a uma perda mais rápida do material em decomposição. No entanto não foram observadas diferenças significativas entre as taxas de decomposição na capoeira e nos SAFs (Tabela 4.2).

Tabela 4.2. Taxas de decomposição (k) e meia-vida da liteira residual do cupuaçu nos sistemas estudados.

Taxa de decomposição	SAF baseado em palmeiras	SAF baseado em fruteiras	Capoeira
k (dia ⁻¹)	0,002	0,002	0,003
k (ano ⁻¹)	0,77	0,86	1,17
Meia-Vida (dias)	330	293	216

Concentrações de Macro e Micronutrientes na Liteira Residual

A liteira residual do SAF baseado em palmeiras mostrou as maiores concentrações de magnésio na terceira coleta (aos 211 dias após a implantação do experimento) ($F = 4,5$; $p = 0,032$), durante a época seca. A liteira residual do SAF baseado em fruteiras mostrou as maiores concentrações de ferro, fósforo e manganês na segunda coleta ($F = 11,5$; $p = 0,001$, $F = 6,7$; $p = 0,01$, e $F = 8,2$; $p = 0,005$, respectivamente), durante a época seca; potássio na terceira coleta (aos 211 dias) ($F = 5,2$; $p = 0,021$), durante a época seca; ferro e fósforo na quarta coleta (aos 358 dias) ($F = 9,1$; $p = 0,003$ e $F = 9$; $p = 0,004$), durante a época chuvosa; e fósforo na quinta coleta (aos 412 dias) ($F = 9,2$; $p = 0,003$), durante a época chuvosa. A liteira residual da capoeira mostrou as maiores concentrações de zinco na

primeira coleta ($F = 13,4$; $p = 0,001$), durante a época chuvosa e manganês na segunda coleta ($F = 8,2$; $p = 0,005$), durante a época seca.

Ao longo do período de estudo foi observado que nos sacos de malha onde foi permitido o crescimento das raízes finas houve variação significativa nas concentrações de cálcio ($F = 4,7$; $p = 0,015$), ferro ($F = 3,8$; $p = 0,031$), fósforo ($F = 4,5$; $p = 0,018$) e zinco ($F = 7,4$; $p = 0,002$). Por outro lado, nos sacos de malha onde foi impedido o crescimento das raízes houve variação significativa nas concentrações de ferro ($F = 7$; $p = 0,003$), fósforo ($F = 4,7$; $p = 0,015$) e magnésio ($F = 3,5$; $p = 0,041$). Aparentemente, as concentrações de ferro e de fósforo variaram independentemente da presença das raízes, enquanto as concentrações de cálcio e de zinco variaram em função da presença das raízes finas.

Ao longo do período de decomposição os elementos ferro, fósforo e zinco acumularam na liteira residual, o magnésio foi disponibilizado e os elementos cálcio, potássio e manganês inicialmente acumularam na liteira residual e depois foram disponibilizados, tanto nos SAFs baseados em palmeiras (Figura 4.4) e em fruteiras (Figura 4.5) quanto na capoeira (Figura 4.6).

SAF baseado em palmeiras

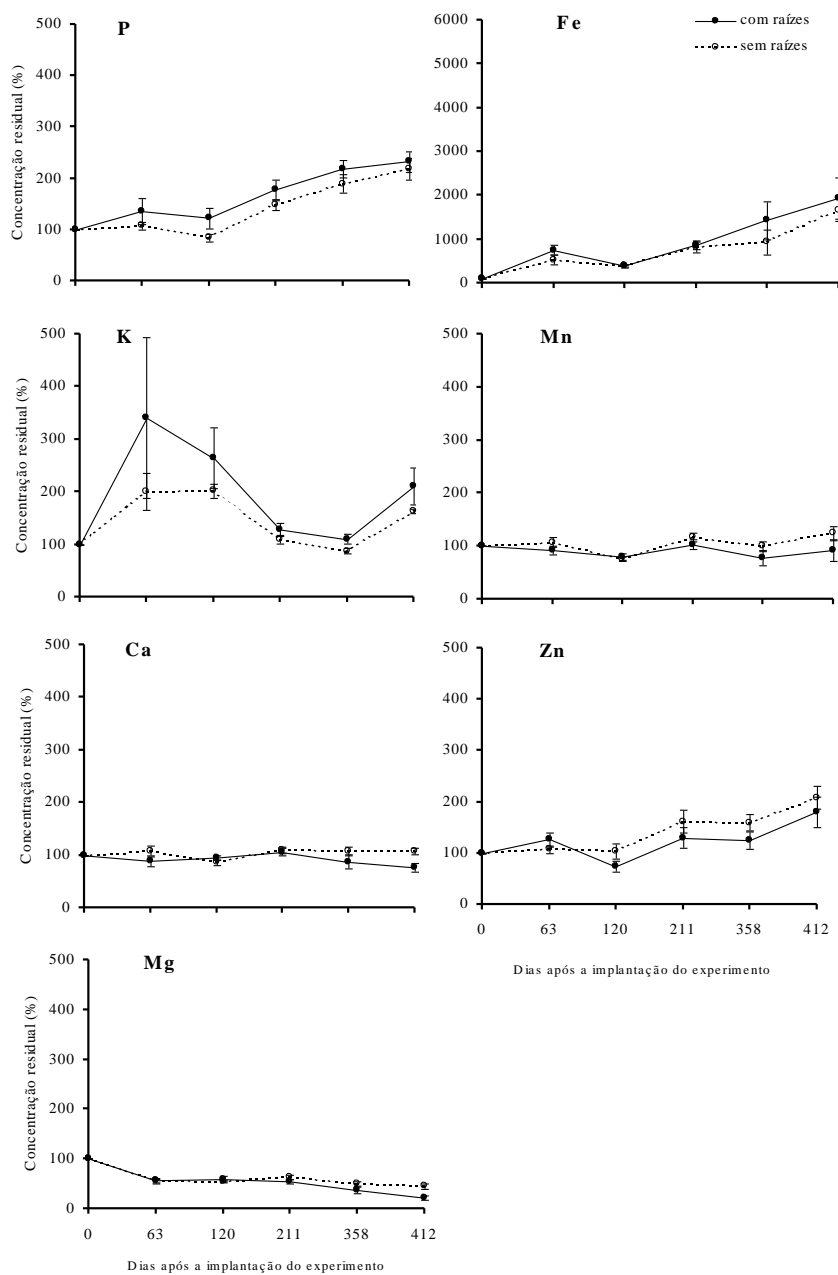


Figura 4.4. Concentração residual de nutrientes na liteira dos sacos de malha com e sem raízes finas do SAF baseado em palmeiras. Cada ponto representa a média de três sacos de malha retirados em três réplicas em cada coleta. As barras correspondem ao erro padrão.

SAF baseado em fruteiras

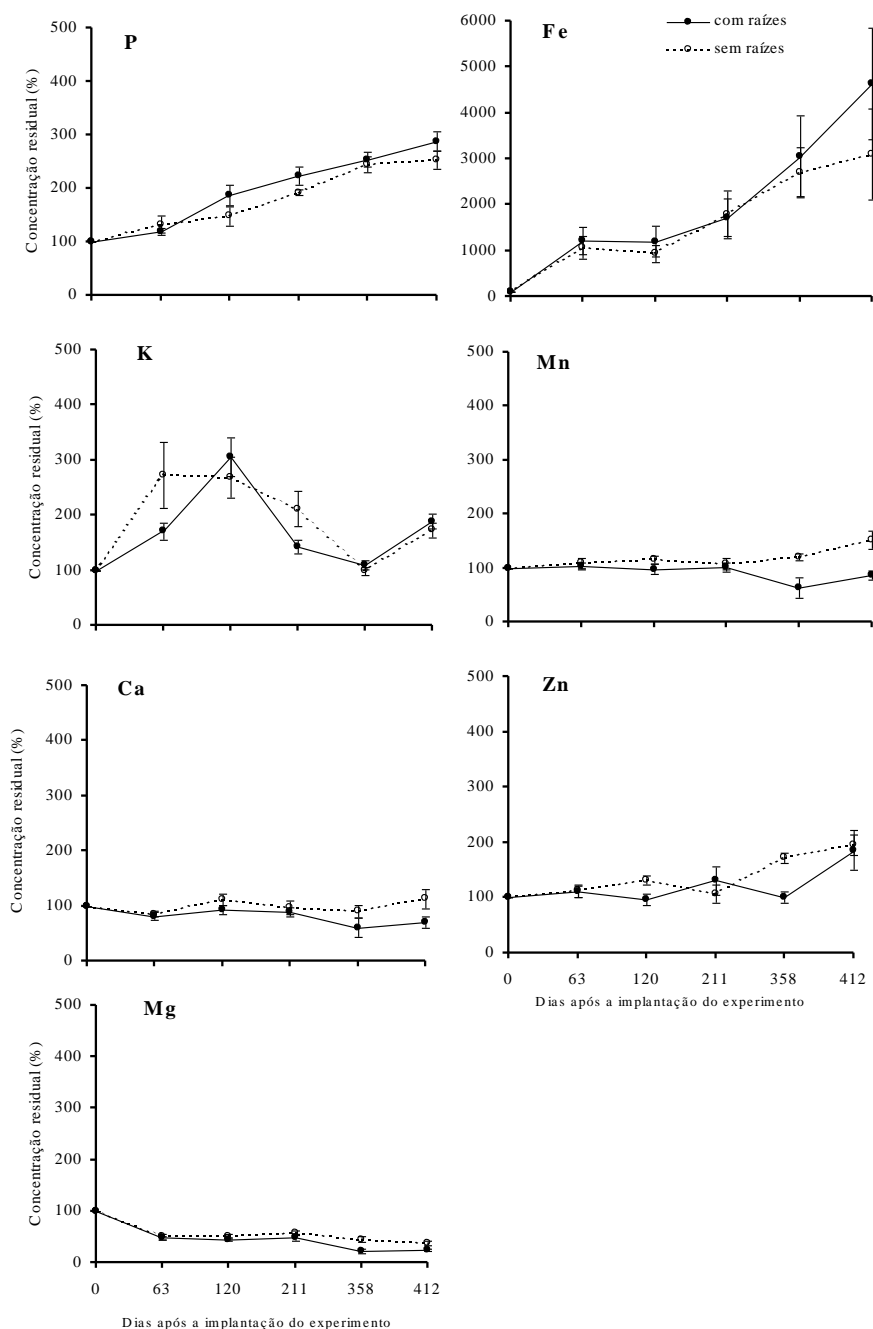


Figura 4.5. Concentração residual de nutrientes na liteira dos sacos de malha com e sem raízes finas no SAF baseado em fruteiras. Cada ponto representa a média de três sacos de malha retirados em três réplicas em cada coleta. As barras correspondem ao erro padrão.

Capoeira

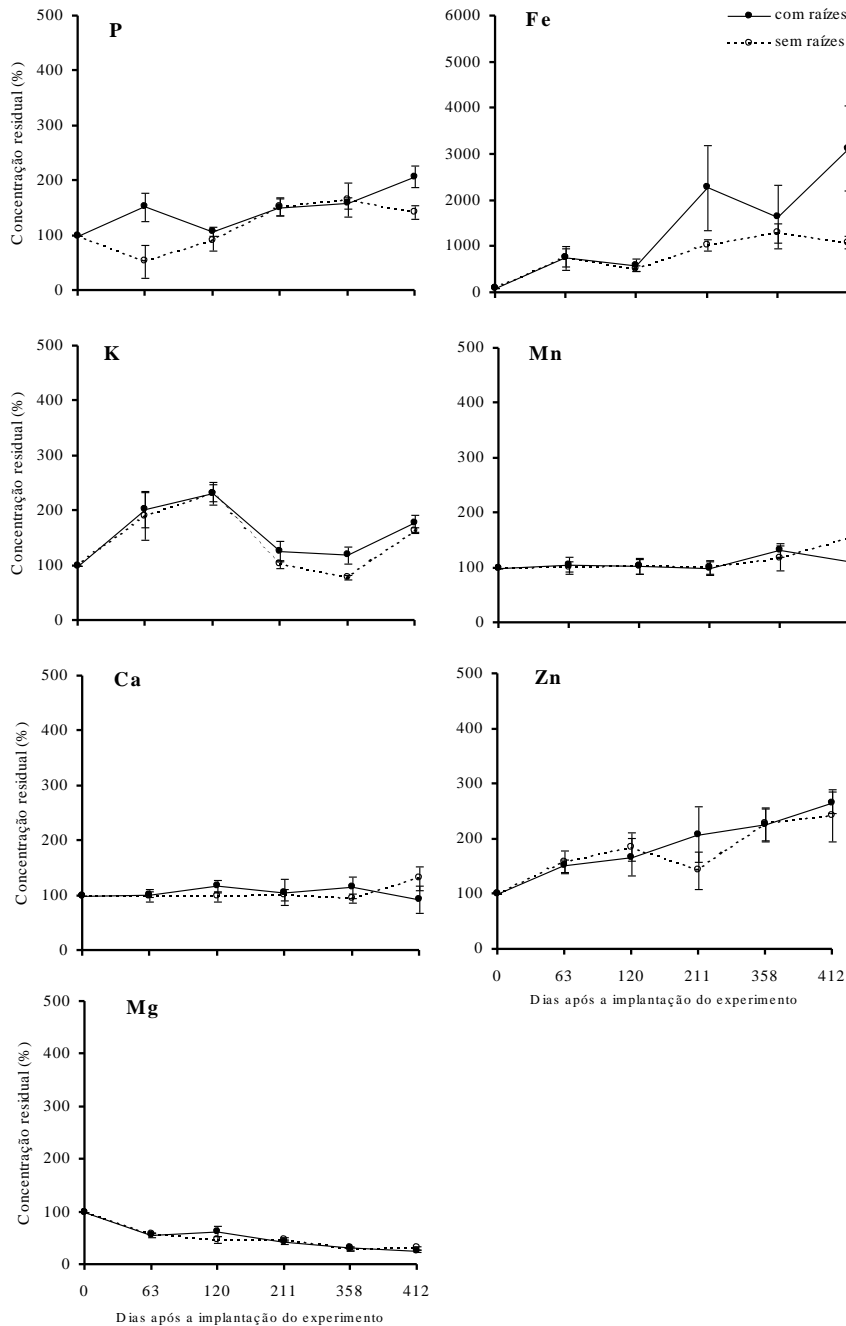


Figura 4.6. Concentração residual de nutrientes na liteira dos sacos de malha com e sem raízes finas na capoeira. Cada ponto representa a média de três sacos de malha retirados em duas réplicas em cada coleta. As barras correspondem ao erro padrão.

As análises de regressão linear entre as concentrações de nutrientes e a porcentagem de liteira residual dos sacos de malha onde houve penetração de raízes finas mostraram que a concentração de magnésio da liteira diminuiu significativamente ao longo do estudo nos SAFs baseados em palmeiras ($r^2 = 0,64$; $p = 0,001$) e em fruteiras ($r^2 = 0,54$; $p = 0,002$) e na capoeira ($r^2 = 0,75$; $p = 0,001$) (Figura 4.7). Nos sacos de malha onde não houve penetração de raízes, apenas na capoeira foi observada uma relação entre as concentrações de magnésio e a porcentagem de liteira residual ($r^2 = 0,75$; $p = 0,001$).

No SAF baseado em palmeiras os elementos que acumularam na liteira residual dos sacos de malha onde houve penetração de raízes finas foram o ferro ($r^2 = 0,50$; $p = 0,003$) e o fósforo ($r^2 = 0,67$; $p = 0,001$) (Figura 4.8). No SAF baseado em fruteiras apenas o ferro acumulou na liteira residual ($r^2 = 0,55$; $p = 0,002$) (Figura 4.9). No SAF baseado em palmeiras também foram observados os acúmulos de ferro ($r^2 = 0,57$; $p = 0,001$) e fósforo ($r^2 = 0,73$; $p = 0,00$) na liteira residual dos sacos de malha onde não houve penetração de raízes finas.

As concentrações dos elementos cálcio ($F = 7,6$; $p = 0,01$), magnésio ($F = 6,5$; $p = 0,017$) e manganês ($F = 16$; $p = 0,001$) da liteira residual do SAF baseado em fruteiras foram influenciados pela presença das raízes finas. O cálcio e o manganês acumularam, enquanto o magnésio foi absorvido da liteira residual pelas raízes finas.

Durante a quarta coleta (aos 358 dias) foi observado no SAF baseado em palmeiras uma diferença na concentração de magnésio entre os sacos de malha com raízes e sem raízes. Na quinta coleta (aos 412 dias) esta diferença entre os sacos de malha foi observada em todos os sistemas. O mesmo foi observado para o cálcio no SAF baseado em palmeiras durante a quinta coleta. No entanto, todas estas diferenças não foram significativas.

A análise de regressão linear entre a massa seca de raízes finas e a concentração do magnésio na liteira residual mostrou que as raízes finas utilizaram o magnésio para o crescimento da biomassa radicular no SAF baseado em palmeiras ($r^2 = 0,71$; $p = 0,001$) e na capoeira ($r^2 = 0,67$; $p = 0,001$) (Figura 4.10).

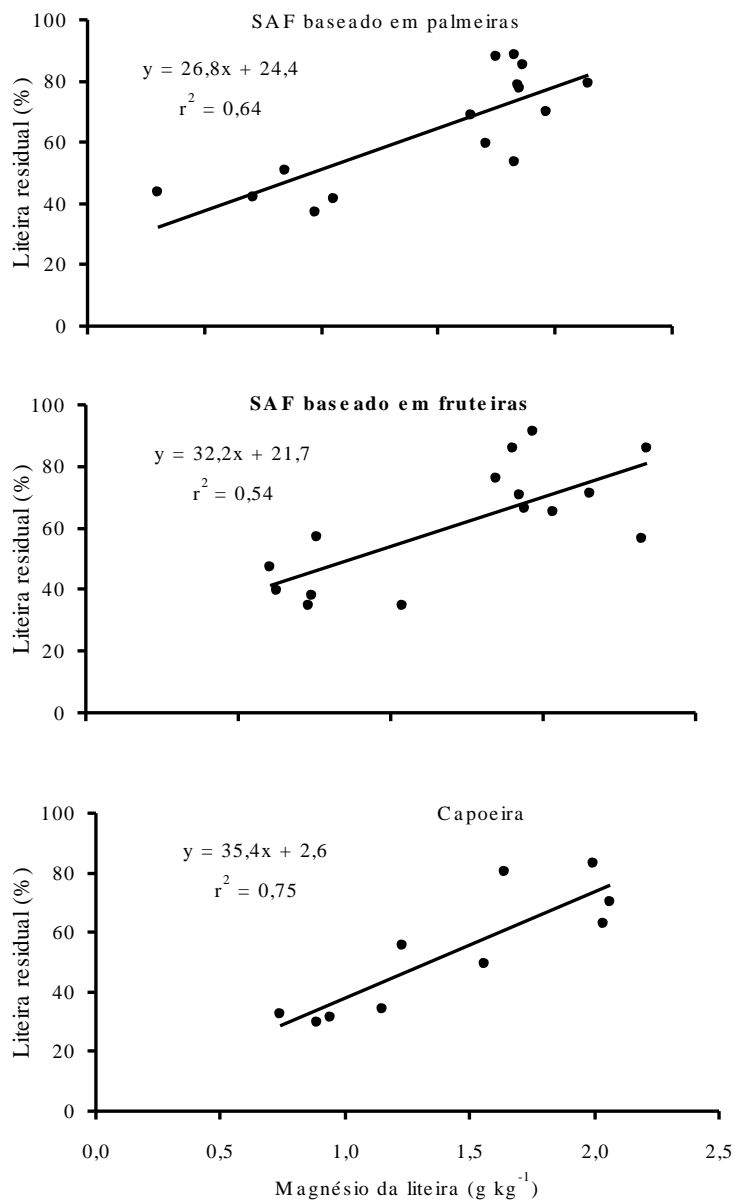


Figura 4.7. Regressões lineares entre a porcentagem de liteira residual e a concentração de magnésio nos SAFs (n = 15) e na capoeira (n = 10).

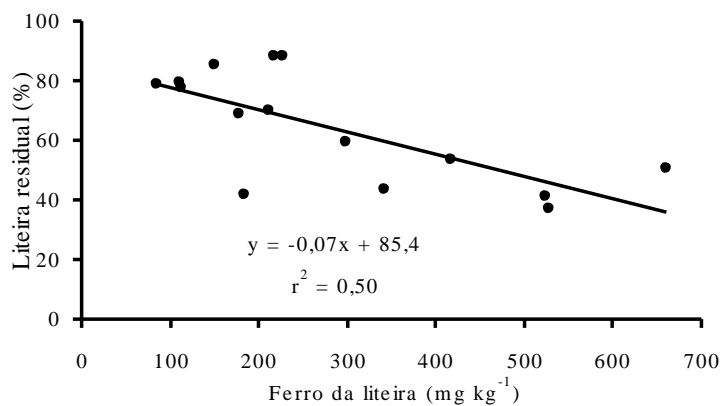
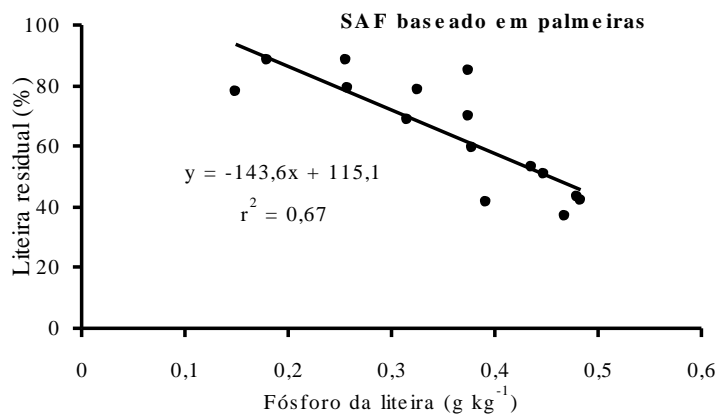


Figura 4.8. Regressões lineares entre as porcentagens de liteira residual e as concentrações de fósforo e de ferro nos SAFs baseado em palmeiras (n = 15).

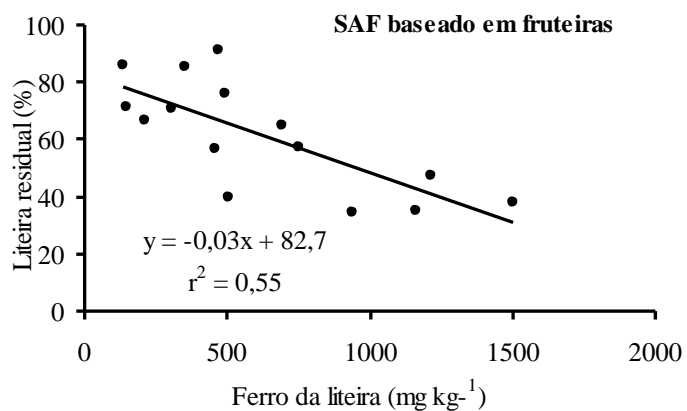


Figura 4.9. Regressões lineares entre as porcentagens de liteira residual e as concentrações de ferro no SAFs baseado em fruteiras (n = 15).

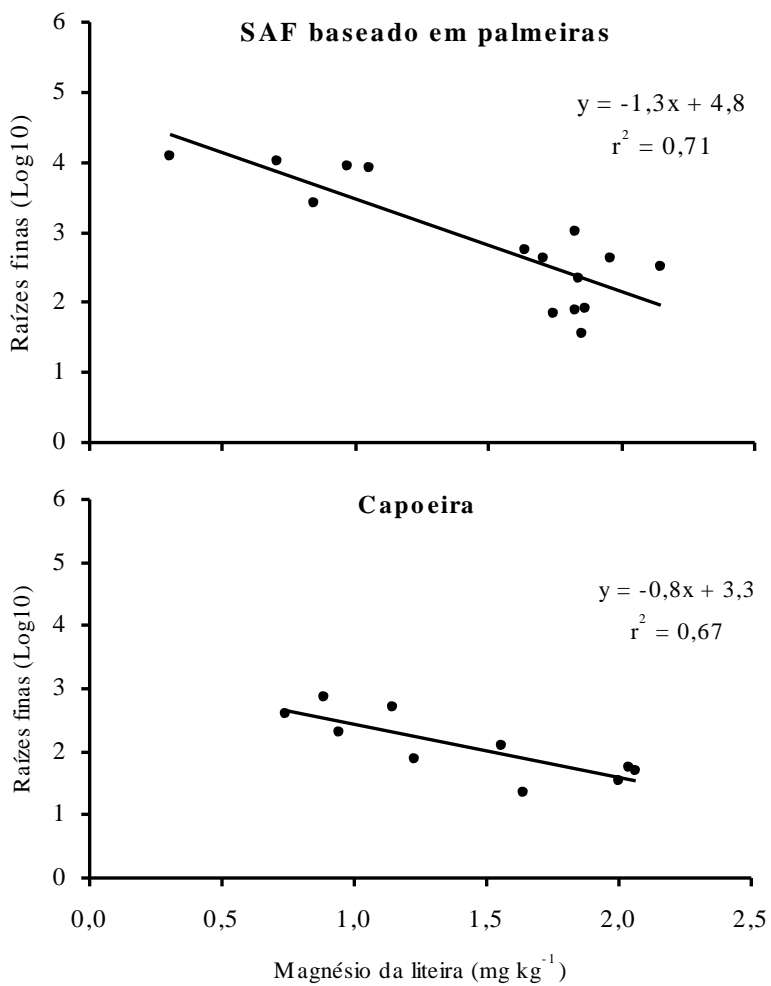


Figura 4.10. Regressões lineares entre massa seca de raízes finas e a concentração de magnésio no SAF baseado em palmeiras (n = 15) e na capoeira (n = 10).

Porcentagens de Nitrogênio, Carbono e Relação C:N da Liteira Residual

As porcentagens de nitrogênio, carbono e relação C:N da liteira residual do cupuaçu não apresentaram diferenças significativas entre os sistemas estudados. A porcentagem de nitrogênio da liteira residual aumentou ao longo do estudo. A porcentagem de carbono da liteira residual não mostrou diferenças entre os períodos de coleta e por isso a relação C:N diminuiu. Estes padrões foram observados tanto nos SAFs baseados em palmeiras (Figura 4.11) e em fruteiras (Figura 4.12), como na capoeira (Figura 4.13).

As análises de regressão linear entre as porcentagens de liteira residual e nitrogênio e entre a relação C:N mostraram que nos SAFs baseados em palmeiras e em fruteiras e na capoeira a porcentagem de nitrogênio da liteira residual aumentou ($r^2 = 0,70$; $p = 0,001$; $r^2 = 0,80$; $p = 0,001$ e $r^2 = 0,81$; $p = 0,001$, respectivamente), enquanto a relação C:N diminuiu ($r^2 = 0,72$; $p = 0,001$; $r^2 = 0,89$; $p = 0,001$ e $r^2 = 0,89$; $p = 0,001$, respectivamente) (Figura 4.14).

As análises de regressão linear entre a massa seca das raízes finas e a porcentagem de nitrogênio e entre a relação C:N da liteira residual mostraram que no SAF baseado em palmeiras a penetração das raízes finas influenciaram a diminuição da relação C:N ($r^2 = 0,66$; $p = 0,001$) e o acúmulo de nitrogênio ($r^2 = 0,60$; $p = 0,001$) na liteira residual. No SAF baseado em fruteiras a penetração das raízes finas influenciaram a diminuição da relação C:N ($r^2 = 0,59$; $p = 0,001$) na liteira residual. Na capoeira, a penetração das raízes finas influenciaram a diminuição da relação C:N ($r^2 = 0,77$; $p = 0,001$) e o acúmulo do nitrogênio ($r^2 = 0,76$; $p = 0,001$) na liteira residual (Figura 4.15).

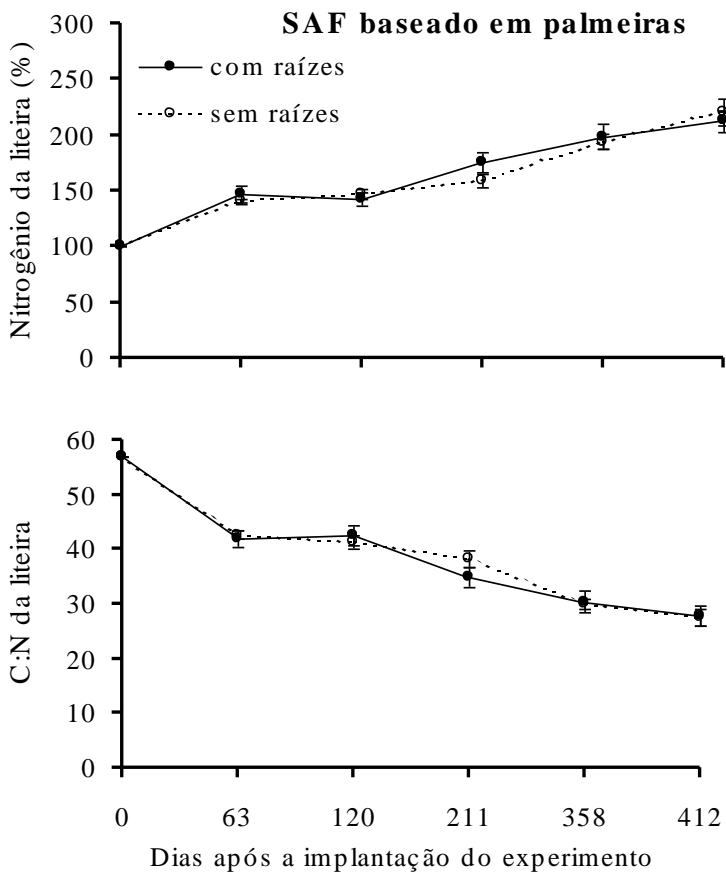


Figura 4.11. Porcentagens de nitrogênio e relação C:N da liteira residual dos sacos de malha com e sem presença de raízes finas no SAF baseado em palmeiras ao longo do período de estudo. Os valores são médias de três sacos de malha retirados em três réplicas durante cada coleta. As barras correspondem ao erro padrão da amostra.

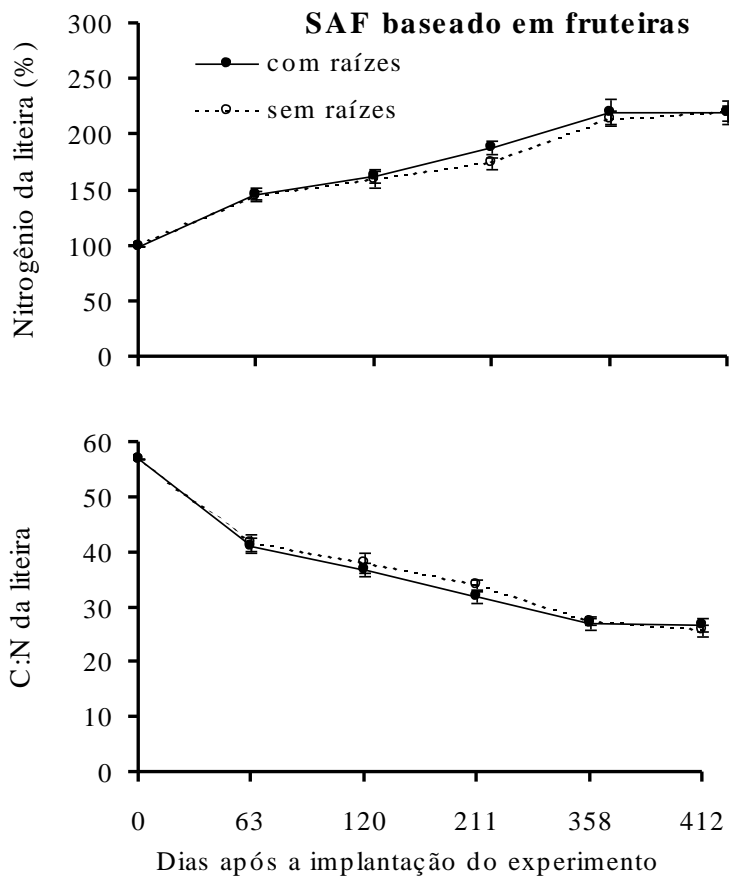


Figura 4.12. Porcentagens de nitrogênio e relação C:N da liteira residual dos sacos de malha com e sem presença de raízes finas no SAF baseado em fruteiras durante o período de estudo. Os valores são médias de três sacos de malha retirados em três réplicas durante cada coleta. As barras correspondem ao erro padrão da amostra.

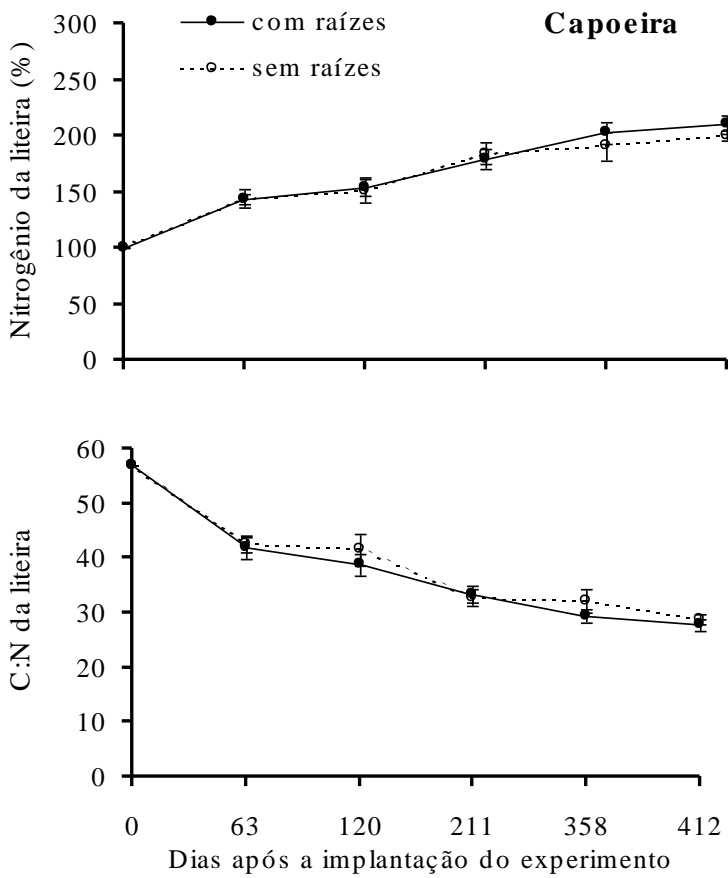


Figura 4.13. Porcentagens de nitrogênio e relação C:N da liteira residual dos sacos de malha com e sem presença de raízes finas da capoeira ao longo do período de estudo. Os valores são médias de três sacos de malha retirados em duas réplicas durante cada coleta. As barras correspondem ao erro padrão das amostras.

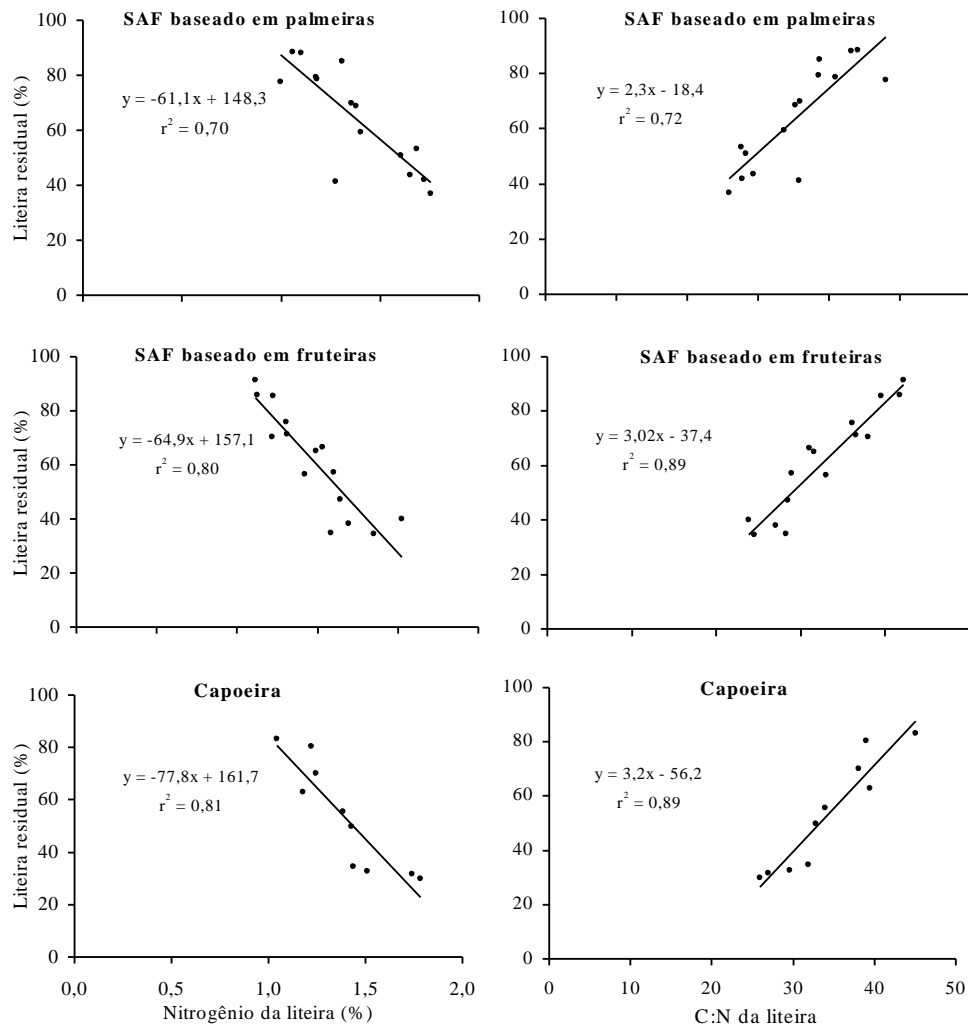


Figura 4.14. Regressões lineares entre as porcentagens de liteira residual e nitrogênio (à esquerda) e entre as porcentagens de liteira residual e a relação C:N (à direita) da liteira dos SAFs baseados em palmeiras e em fruteiras (n = 15) e na capoeira (n = 10).

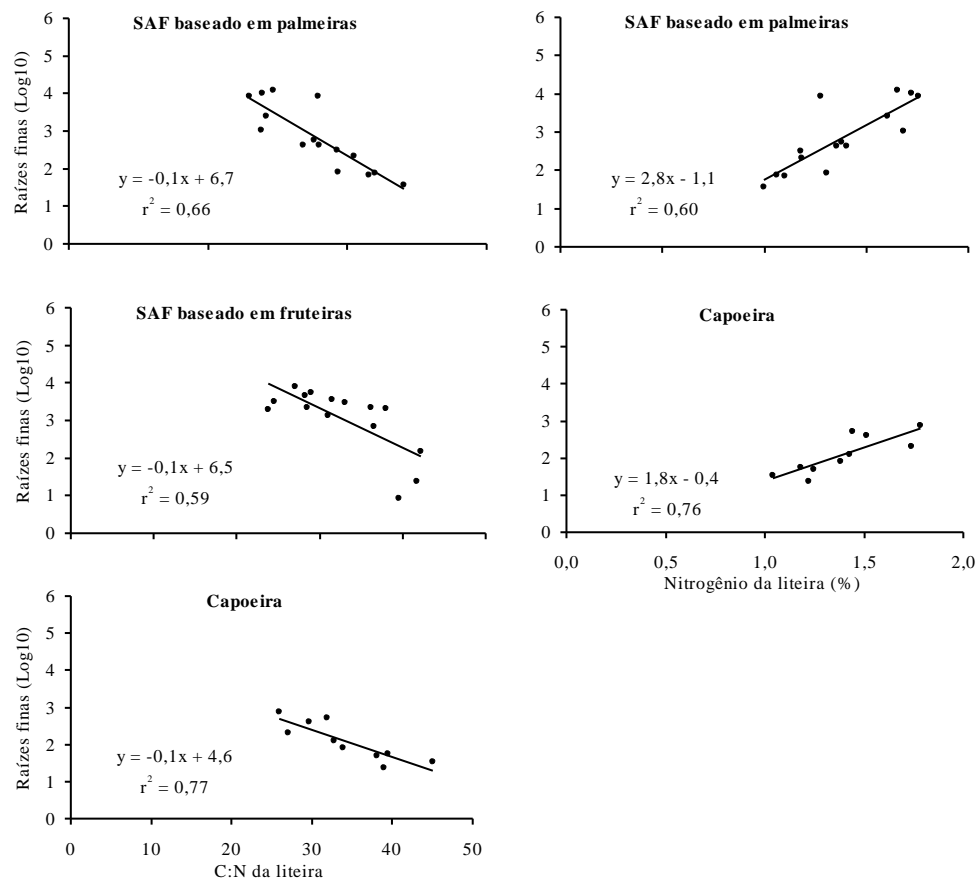


Figura 4.15. Regressões lineares entre a massa seca das raízes finas e a relação C:N da liteira residual (à esquerda) e entre a massa seca das raízes e a porcentagem de nitrogênio (à direita) nos SAFs baseados em palmeiras e em fruteiras (n = 15) e na capoeira (n = 10).

DISCUSSÃO

Biomassa das Raízes Finas

A produção de raízes finas é considerada importante na avaliação da capacidade produtiva dos ecossistemas terrestres (Swift *et al.*, 1979). Na região amazônica, a produção de uma densa camada de raízes finas superficiais é consequência da baixa disponibilidade de nutrientes nos solos (Stark & Jordan, 1978; Jordan, 1985; Cuevas & Medina, 1988). As raízes finas retêm os nutrientes, impedindo sua perda por lixiviação (Stark & Jordan, 1978; Swift *et al.*, 1979; Jordan, 1985; Cuevas & Medina, 1988).

Gallardo-Ordinola (2004) estudou a biomassa total das raízes das espécies vegetais em diferentes profundidades do perfil do solo nas mesmas áreas que o presente estudo e detectou que as raízes da *Vismia* sp, espécie dominante da capoeira, são mais abundantes do que as do cupuaçu. No entanto, quando o autor classificou as raízes entre finas (< 5mm) e grossas (> 5mm) observou que apenas 5% da biomassa total das raízes da *Vismia* sp. correspondiam às raízes finas, enquanto no cupuaçu 66% do total das raízes correspondiam as raízes finas.

No presente estudo, as raízes finas foram mais abundantes nos SAFs baseados em palmeiras e em fruteiras, que têm muitas raízes superficiais. Na capoeira, os sacos de malha foram distribuídos ao redor da *Vismia* sp, que têm raízes mais profundas e por isso mostrou um baixo crescimento de raízes finas sobre a liteira em decomposição.

Taxa de Decomposição da Liteira

A taxa de decomposição (k) da liteira de *Theobroma grandiflorum* (cupuaçu) variou entre 0,77 e 1,17 ano⁻¹. Embora as diferenças entre os sistemas não fossem significativas a capoeira mostrou a maior taxa de decomposição, talvez porque a atividade dos organismos decompositores da capoeira fosse mais intensa do que nos SAFs. Em estudos próximo a cidade de Manaus foi observado que a densidade de organismos decompositores é muito baixa sob o cupuaçuzeiro (Vohland & Schroth 1999), o que pode ter causado a lenta perda de massa da liteira em decomposição.

Segundo Barros *et al.* (2003), que estudaram a densidade (indivíduo m⁻²) de macro-invertebrados nas mesmas áreas que o presente estudo, a capoeira mostrou maiores densidade de macro-invertebrados de liteira e diversidade de espécies do que os SAFs baseado em palmeiras e em fruteiras.

A taxa de decomposição neste estudo confirma que o cupuaçu tem uma liteira de decomposição muito lenta, quando comparado a de outras espécies (McGrath *et al.*, 2000). Em sistemas agroflorestais implantados no Acre, McGrath *et al.* (2000) obtiveram uma taxa de decomposição da liteira do cupuaçu de 0,4 ano⁻¹ e o presente estudo calculou valores ainda maiores, entre 0,7 - 1,17 ano⁻¹. Estas diferenças podem estar relacionadas às características ambientais e biológicas dos locais.

Após quase um ano de estudo, foi observada a influência das raízes finas na decomposição da liteira residual no SAF baseado em palmeiras, mas os valores não foram estatisticamente diferentes entre os sacos de malha com e sem a entrada de raízes. Cuevas & Medina (1988), que estudaram o efeito das raízes finas na decomposição da liteira de *Caryocar glabrum*, *Aspidosperma megalocarpum* e *Licania heteromorpha*, nativas da

floresta de terra firme da Amazônia venezuelana, sobre solo do tipo Oxissolo, não observaram o efeito das raízes finas na perda de massa da liteira em decomposição. Em florestas de campina e campinarana sobre solos arenosos (Podzólicos) e florestas de terra firme (Ultissolo), Luizão (1994) também não observou influência das raízes finas na perda de massa da liteira de *Clitoria fairchildiana* em decomposição.

Porcentagens de Carbono e Nitrogênio e Relação C:N da Liteira Residual

A porcentagem de carbono da liteira residual do cupuaçu não apresentou diferenças significativas em nenhum período de coleta e nem entre os sistemas estudados. A porcentagem de nitrogênio da liteira residual aumentou ao longo do estudo devido à atividade biológica sobre o material em decomposição. Dos três elementos vitais para as plantas (nitrogênio, fósforo e potássio) o nitrogênio é o mais importante para o seu crescimento (Coelho & Verlengia, 1973; Juo & Franzluebbbers, 2003; Epstein & Bloom, 2005). A relação C:N diminuiu devido ao acúmulo de nitrogênio na liteira residual e a perda de massa seca.

A relação C:N da liteira do cupuaçu neste estudo foi muito alta e não variou entre os sistemas estudados. No início do experimento a relação C:N da liteira foi de 57 e no final ela chegou a 35. Esta alta relação C:N inicial indica que os organismos decompositores imobilizaram os nutrientes em seus tecidos até o final do experimento, quando a relação C:N baixou.

A alta relação C:N da liteira do cupuaçu também reflete sua baixa qualidade nutricional. Segundo Lowman (1988), liteiras de textura grossa, semelhante a do cupuaçu, são de baixa qualidade nutricional. Schwendener *et al.* (2005) estudaram a decomposição da liteira de cupuaçu e *Vismia* sp. sob o solo em microcosmos e confirmaram a baixa

qualidade nutricional e difícil decomposição da liteira do cupuaçu. Entretanto, quando misturada a liteiras de melhor qualidade, como a de *Gliricidia sepium*, a decomposição foi facilitada. Em estudos de enriquecimento de liteira em capoeiras da região próxima à Manaus, Silva (2000) mostrou que a diversidade de liteira tem influência positiva na qualidade nutricional do substrato e na biomassa microbiana do solo.

McGrath *et al.* (2000) mostraram que a liteira do cupuaçu funciona como fonte contínua de nutrientes para o solo, porque ela é de difícil decomposição e a disponibilização dos nutrientes é lenta e gradativa evitando as perdas por lixiviação. Isso é muito importante, principalmente para o elemento fósforo que é limitante em solos de ecossistemas antigos e altamente lixiviados, como os da Amazônia central (Vitousek & Farrington, 1997). Menyailo *et al.* (2003) observaram que a taxa de mineralização de nitrogênio foi menor sob as plantas do cupuaçu nos SAFs, devido à imobilização microbiana, quando comparada a *Vismia* sp. na capoeira. Já o potencial de desnitrificação foi maior sob as plantas de cupuaçu. Mesmo com estas diferenças, a atividade microbiana foi similar no solo sob as plantas de cupuaçu e *Vismia* sp. (Menyailo *et al.*, 2003).

Concentrações de Nutrientes na Liteira Residual

Entre os sistemas estudados ocorreram variações significativas nas concentrações dos elementos cálcio, ferro, fósforo e zinco da liteira residual dos sacos de malha com penetração de raízes e ferro, fósforo e magnésio nos sacos de malha onde o crescimento das raízes foi impedido. Nos sacos de malha com penetração das raízes, as concentrações de cálcio e zinco foram maiores na liteira residual da capoeira e as concentrações de ferro e fósforo foram maiores na liteira residual do SAF baseado em fruteiras. Nos sacos de malha sem crescimento de raízes, a concentração de magnésio foi maior na liteira residual do SAF

baseado em palmeiras e as concentrações de ferro e fósforo foram maiores no SAF baseado em fruteiras.

Apenas no SAF baseado em fruteiras os elementos cálcio, magnésio e manganês foram absorvidos pelas raízes finas. As análises de regressão linear mostraram que destes elementos, o magnésio foi o único que além de ser absorvido, influenciou também o crescimento das raízes finas. A influência das raízes finas na absorção do magnésio da liteira residual no SAF baseado em fruteiras ocorreu na quarta (aos 358 dias) e quinta coletas (aos 412 dias). O magnésio é um componente estrutural da molécula de clorofila muito importante para as plantas (Coelho & Verlengia, 1973; Juo & Franzleubbers, 2003; Epstein & Bloom, 2005).

No SAF baseado em fruteiras, o cálcio foi absorvido pelas raízes finas na quinta coleta, aos 412 dias após a implantação do experimento. O cálcio é o segundo elemento mais abundante nas células vegetais, depois do potássio. O cálcio está mais concentrado nas folhas velhas e é muito importante na formação das folhas novas e no funcionamento das raízes (Coelho & Verlengia, 1973; Juo & Franzleubbers, 2003; Epstein & Bloom, 2005). O manganês foi absorvido pelas raízes finas durante a quinta coleta no SAF baseado em fruteiras. O manganês tem participação nas reações de oxi-redução e em excesso pode reduzir o crescimento das plantas (Coelho & Verlengia, 1973; Juo & Franzleubbers, 2003; Epstein & Bloom, 2005).

Por outro lado, os elementos ferro, fósforo e nitrogênio acumularam na liteira residual. O ferro nos SAFs baseados em palmeiras e em fruteiras, o fósforo apenas no SAF baseado em palmeiras e o nitrogênio em todos os sistemas. O ferro é um catalisador na produção da clorofila que normalmente acumula na liteira em decomposição porque os processos bióticos, tais como o crescimento das raízes finas e atividades dos organismos

decompositores, e abióticos como as chuvas, contribuem no transporte de partículas de solo para o material em decomposição (Luizão, 1994; Luizão 1995; Epstein & Bloom, 2005). O fósforo e o nitrogênio acumularam na liteira em decomposição porque são produzidos pela atividade dos organismos decompositores (Luizão, 1995). A relação C:N (qualidade da liteira) reduziu ao longo do estudo devido ao grande acúmulo de nitrogênio na liteira residual e a perda de massa seca.

Luizão (1994) e Luizão (1995) estudaram a decomposição da liteira de *Clitoria fairchildiana* e também observaram o acúmulo do elemento ferro na liteira residual. Luizão (1995) estudou também a decomposição da liteira de *Pradosia schomburgkiana* e *Aldina heterophylla* e observou o acúmulo do ferro, manganês e nitrogênio na liteira residual de *P. schomburgkiana* e ferro na liteira de *A. heterophylla*. McGrath *et al.* (2000) estudaram a decomposição da liteira do cupuaçu e observaram um acúmulo de fósforo e nitrogênio na liteira residual. No presente estudo os elementos que acumularam na liteira residual do cupuaçu foram o ferro, o fósforo e o nitrogênio. A única diferença entre esses vários estudos sobre liberação de nutrientes da liteira (Luizão, 1994; Luizão, 1995; McGrath *et al.*, 2000) foi com relação às concentrações de nitrogênio na liteira. Assim, quanto menor for a concentração de nitrogênio mais elementos acumularão na liteira em decomposição.

As concentrações dos elementos cálcio, potássio, manganês e zinco variaram muito ao longo do estudo e por isso não mostraram relação significativa com a massa seca da liteira residual. Estas variações podem estar relacionadas a sazonalidade. Estudos em SAFs e em capoeira próximos a cidade de Manaus, Schroth *et al.* (2001) mostraram que as águas das chuvas que lavam as copas das árvores têm maiores concentrações de nitrogênio, fósforo, potássio e cálcio na capoeira dominada por *Vismia* sp. que em monocultivos de cupuaçu.

Luizão (1994) observou a influência das raízes finas na absorção dos elementos magnésio, manganês e cálcio diretamente da liteira. Além disso, Luizão (1994) também observou uma contribuição significativa das raízes no acúmulo de ferro. Uma possível explicação seria que os solos ácidos das florestas tropicais são dominados por fungos, os quais são eficientes na retenção de nutrientes (Lodge *et al.*, 1994). Na verdade, em estudos de disponibilização de nutrientes da liteira de *Fagus sylvatica* em decomposição em florestas da Suécia, Tyler (2005) mostrou que os elementos potássio, fósforo e zinco aumentaram suas concentrações devido a habilidade dos fungos decompositores em transferir estes elementos do solo para a liteira em decomposição.

Cuevas & Medina (1988) também mostraram que as raízes finas influenciam a ciclagem do cálcio e do magnésio, mas não afetam a taxa de mineralização do potássio. Provavelmente, a ausência das raízes no saco de malha pode ter reduzido a taxa de perda de peso do material em decomposição, refletindo no acúmulo do potássio. Segundo Cuevas & Medina (1988), a ausência das raízes finas pode ter afetado a colonização do substrato (liteira) por organismos decompositores.

Em estudo em SAFs e em capoeira próximos a cidade de Manaus, Menyailo *et al.* (2003) observaram que a concentração de cálcio no solo sob as plantas do cupuaçu (21,6 mg kg⁻¹) dos SAFs foi maior do que sob a *Vismia* sp. (0,7 mg kg⁻¹) da capoeira. No presente estudo não houve variação na concentração de cálcio entre os sistemas.

Segundo Kellman & Tackaberry (1997), raízes finas colonizadas por ectomicorrizas, como o cupuaçu, podem influenciar a decomposição da matéria orgânica do solo. Usando radioisótopos de fósforo, Herrera *et al.* (1978) mostraram que as hifas de micorrizas e as raízes finas são capazes de absorver nutrientes da liteira em decomposição. O processo desenvolvido pelas micorrizas e raízes finas é suficiente para explicar a

retenção de nutrientes em ecossistemas tropicais sem a influência das raízes profundas (Kellman & Tackaberry, 1997).

CONCLUSÕES

No presente estudo a decomposição da liteira do cupuaçu foi mais rápida na capoeira do que nos SAFs, embora não significativa estatisticamente.

As raízes finas influenciaram a disponibilização dos elementos cálcio, magnésio e manganês da liteira residual no SAF baseado em fruteiras. Destes elementos, o magnésio foi utilizado no crescimento da biomassa das raízes finas.

CAPÍTULO V

FLUXO DE NUTRIENTES E COLONIZAÇÃO DE MICORRIZAS ARBUSCULARES NO SOLO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS E DE VEGETAÇÃO SECUNDÁRIA DA AMAZÔNIA CENTRAL.

INTRODUÇÃO

Em ecossistemas naturais, os fungos formadores de micorrizas influenciam todos os organismos que utilizam o mesmo recurso que seu hospedeiro ou que utilizam o hospedeiro como recurso (Allen *et al.*, 1991). Diferentes tipos de micorrizas podem colonizar a mesma raiz e podem diferir quanto à forma de aquisição de nutrientes para a planta hospedeira (Allen *et al.*, 1991; Wardle, 2002) e com isso possibilitaram a coexistência de várias espécies de plantas devido a redução da competição (Wardle, 2002).

As micorrizas têm hifas com diâmetros (5-10 μ m) menores que os das raízes das plantas (10-20 μ m) (Allen *et al.*, 1991; Newsham *et al.*, 1995). As hifas exploram ambientes do solo antes complicado para as raízes das plantas (Newsham *et al.*, 1995; Wright & Anderson, 2000; Rilling, 2004). As micorrizas funcionam mais como extensão das raízes das plantas do que como parte da biomassa microbiana do solo (Allen, 1991; Wardle, 2002). O principal benefício das micorrizas para as plantas é a absorção mais eficiente de água e de alguns nutrientes minerais do solo (Allen, 1991; Wardle, 2002). Esta estratégia é muito importante em ambientes com deficiência de nutrientes como os ecossistemas tropicais (Jordan, 1985; Janos, 1983).

As micorrizas podem influenciar os processos ecológicos de ciclagem de nutrientes e decomposição da matéria orgânica do solo (van der Heijden *et al.*, 1998; Wardle, 2002). Estudos em casa de vegetação (Marschner & Dell, 1994) mostraram que as micorrizas arbusculares contribuem com a absorção de 80% do fósforo, 25% do nitrogênio, 10% do potássio, 25% do zinco e 60% do cobre necessários para a manutenção das plantas. Em menores proporções, as ectomicorrizas podem contribuir na absorção do fósforo, do nitrogênio e do potássio.

Estudos com 83 espécies de plantas da zona temperada mostraram que as micorrizas são muito importantes na ciclagem do nitrogênio e do carbono (Cornelissen *et al.*, 2001). As micorrizas das plantas da família Ericaceae influenciam na absorção do fósforo, do nitrogênio, do cálcio e do ferro. As ectomicorrizas e, principalmente, as micorrizas arbusculares influenciam a ciclagem do carbono (Cornelissen *et al.*, 2001). Estudos em ilhas vulcânicas do Hawaii, que tem idades geológicas variando de 300 a 4,1 milhões de anos, mostraram que as micorrizas arbusculares contribuem com a ciclagem do carbono formando um imenso sumidouro no solo das ilhas mais antigas, onde predomina o solo do tipo Oxissolo (Rilling *et al.*, 2001).

As micorrizas influenciam os ecossistemas por induzir mudanças fisiológicas na planta hospedeira, tanto na absorção quanto na secreção de elementos. A secreção de substâncias sintetizadas pelo micélio do fungo micorrízico, tal como a glomalina, influencia o funcionamento dos ecossistemas porque a glomalina contribui diretamente com a formação de agregados do solo (Wardle, 2002; Lovelock *et al.*, 2004; Rilling, 2004). Além disso, plantas que desenvolvem associações micorrízicas são mais sensíveis a altas concentrações de nutrientes no solo do que plantas que não desenvolvem micorrizas (Aikio & Ruotsalainen, 2002).

No ecossistema amazônico a presença de raízes e hifas de micorrizas arbusculares na camada orgânica do solo contribuiu para uma ciclagem de nutrientes mais eficiente (St John, 1985). Os três principais fatores que determinam a distribuição das micorrizas nos solos da Amazônia são: as espécies vegetais, o tipo de solo e a presença de raízes profundas. Na Amazônia central, os solos do tipo Ultissolos, que acumulam pouca ou nenhuma matéria orgânica, estão menos sujeitos a colonização micorrízica do que os solos Oxisolos (St John, 1985). As florestas de campina, campinarana e terra firme da Amazônia central têm maior colonização de ectomicorrizas do que de micorrizas arbusculares, atribuídas a baixa fertilidade natural do ambiente (Luizão, 1994). As micorrizas arbusculares são abundantes em ambientes com fertilidade moderada, enquanto as ectomicorrizas são abundantes em solo de baixa fertilidade (Janos, 1983).

Devido a importância das micorrizas arbusculares na ciclagem do carbono e no funcionamento dos ecossistemas foram formulados conceitos sobre o funcionamento das micorrizas em estudos de casa de vegetação com o isótopo estável do carbono ($\delta^{13}\text{C}$), mostrando que a porcentagem de carbono movimentado entre as raízes e os fungos está relacionada com as estruturas das micorrizas arbusculares (Fitter *et al.*, 1998; Brundrett, 2002).

O conceito fitocêntrico é baseado nos efeitos das micorrizas arbusculares na comunidade vegetal. Ele determina que na associação fungo – planta, as plantas fornecem nutrientes minerais e carboidratos de acordo com suas possibilidades e em troca os recebem dos fungos de acordo com suas necessidades (Fitter *et al.*, 1998). Isso pode ser verdade, pois o gasto de energia do fungo micorrízico quase nunca é compensado pelos carboidratos fornecidos pelas plantas, pois os fungos absorvem os carboidratos por estruturas de curto

ciclo de vida, os arbúsculos (Fitter *et al.*, 1998). Para as plantas, as micorrizas trazem inúmeros benefícios ao longo prazo, uma vez que os nutrientes imobilizados pelo fungo ficam estocados na biomassa microbiana do solo. Se os nutrientes fossem disponíveis no solo formariam óxidos, hidróxidos e ficariam indisponíveis para as plantas (Fitter *et al.*, 1998).

No entanto, há o conceito micocêntrico baseado no efeito das micorrizas arbusculares no ecossistema natural (Fitter *et al.*, 1998). O conceito micocêntrico determina que o fungo micorrízico estoca o carbono das plantas que ele colonizava quando era jovem e o transfere para o hospedeiro atual sem influenciar diretamente o estoque de carbono e o desenvolvimento das plantas (Allen *et al.*, 1991; Fitter *et al.*, 1998). Segundo este conceito, quando o fungo micorrízico é jovem ele forma muitas hifas e arbúsculos que absorvem o carbono das plantas. Quando o fungo alcança a maturidade ele passa a formar as vesículas que são responsáveis pelo estoque de carbono e reprodução do fungo. Uma correlação positiva entre a transferência do carbono e a formação das vesículas de micorrizas arbusculares mostrou que o fungo pode adquirir carbono das plantas que colonizavam quando eram jovens e transferi-lo para outros hospedeiros mais antigos, onde as vesículas se desenvolveram (Fitter *et al.*, 1998).

Planos de manejo florestal devem incluir estudos com micorrizas arbusculares, porque as árvores e os fungos formadores de micorrizas têm estratégias de sobrevivência similares, tais como, baixa taxa de crescimento populacional, indivíduos de tamanho grande, longevidade, pequeno investimento em reprodução e, geralmente têm populações que estabilizam na capacidade suporte do ambiente (Hart *et al.*, 2001). Árvores e micorrizas arbusculares são organismos muito especializados com capacidade de regulação ecológica de estrategista-K, ou seja, investem mais energia no funcionamento e na manutenção do

indivíduo no ambiente (Hart *et al.*, 2001). A atual forma de manejo dos solos está resultando em mudanças qualitativas e quantitativas nos fungos formadores de micorrizas. O uso de fertilizantes químicos, pesticidas, a aeração e a inoculação de fungos exóticos nos solos privilegia poucas espécies em detrimento de muitas. Ao longo prazo, essas formas de manejo podem esgotar a fertilidade natural dos solos (Allen, 1991; Moreira & Siqueira, 2002).

As micorrizas arbusculares são influenciadas pelo ambiente e pelo manejo do ecossistema. As micorrizas arbusculares são inibidas em condições de elevada fertilidade e favorecida pela baixa fertilidade, onde a colonização geralmente é máxima (Allen, 1991; Newsham *et al.*, 1995; Wright & Anderson, 2000; Wardle, 2002; Rilling, 2004). O fósforo é o elemento que em concentrações elevadas pode exercer efeito inibitório nas micorrizas arbusculares, mas não se sabe através de qual mecanismo o fósforo regula a formação das micorrizas. As micorrizas imobilizam o fósforo no ecossistema, aumentando sua viabilidade na camada orgânica do solo e evitando as perdas por lixiviação (Wardle, 2002) e são limitadas quando é alta a concentração de fósforo e magnésio no solo (Allen, 1991; Jarstfer *et al.*, 1998).

Os micronutrientes ferro, manganês e zinco também inibem a formação de micorrizas. O pH do solo tem um efeito indireto sobre as micorrizas porque a acidez controla a concentração dos metais tóxicos do solo, como o alumínio e o manganês (Moreira & Siqueira, 2002).

Estudos na Grécia, em solo do tipo Alfissolo, mostraram que as micorrizas arbusculares são responsáveis por um aumento de 25 vezes na absorção de fósforo pelas plantas (Karagiannidis & Hadjisavva-Zinoviadi, 1998). Além disso, foi mostrado que plantas que desenvolvem micorrizas são ideais para ambientes contaminados com metais

pesados, pois os elementos contaminantes ficam presos na biomassa microbiana e não são absorvidos pelas raízes das plantas. Os autores encontraram taxa de colonização micorrízica variando de 23% a 78%, mas concluíram que não havia relação da colonização micorrízica com a produtividade do ambiente.

No clima semi-árido da região do mar Mediterrâneo, Caravaca *et al.* (2002) mostraram que o crescimento de *Olea europaea* foi maior no tratamento que continha resíduos orgânicos e micorrizas. Segundo os autores este resultado foi possível porque as micorrizas influenciaram de forma positiva a estabilidade dos agregados do solo.

Em estudos na Espanha, na região do mar Mediterrâneo, Garcia *et al.* (2000) observaram que a fertilidade natural do solo era maior em tratamentos onde junto do reflorestamento com *Pinus halepensis* foram aplicados resíduos orgânicos e micorrizas arbusculares.

Para manejar micorrizas em sistemas sustentáveis é necessário conhecer as condições do ambiente. A seleção das espécies vegetais tem que ser diversa. Perturbações florestais, como o corte comercial, podem reduzir ou eliminar as micorrizas do ambiente. Sieverding (1991) mostrou que o manejo apropriado de corte e queima não têm efeitos negativos nas micorrizas, mas a agricultura intensiva pode não somente resultar em declínio do potencial de colonização das micorrizas como também seleciona o fungo micorrízico menos benéfico para o ambiente. As micorrizas só são manejáveis quando suas quantidades ou qualidades são limitantes ao ambiente. As micorrizas não aumentam a disponibilidade de nutrientes para o ambiente, elas apenas facilitam o acesso das plantas aos nutrientes (Allen, 1991; Newsham *et al.*, 1995; Wright & Anderson, 2000; Moreira & Siqueira, 2002; Wardle, 2002; Rilling, 2004).

OBJETIVO GERAL

Visando fornecer subsídios ao manejo agroflorestal, o objetivo geral deste estudo foi avaliar, em diferentes formulações de SAFs e em capoeira, a taxa de colonização por micorrizas arbusculares nas camadas orgânica (de 0 - 10cm) e mineral (de 20 - 30cm) do perfil do solo durante as épocas chuvosa e seca e suas fases de transição e sua relação com o fluxo de nutrientes do solo. Para obter estas informações foram investigados as seguintes questões:

1. Qual é a taxa de colonização micorrízica nos solos dos SAFs e da capoeira?
2. Qual é a porcentagem de umidade e o valor do pH do solo dos SAFs e da capoeira?
3. Qual é a concentração dos nutrientes K, P, Fe, Mn e Zn no solo dos SAFs e da capoeira?

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

O estudo foi realizado em capoeiras e sistemas agroflorestais (SAFs) estabelecidos desde 1991 na Estação Experimental da EMBRAPA-CPAA, em Manaus. Três formulações de SAFs, cada um com três réplicas independentes, foram utilizados neste estudo: (1) SAF baseado em palmeiras (sistema agroflorestal 1 - AS1); (2) SAF baseado em fruteiras e madeiráveis (sistema agroflorestal 2 - AS2); (3) SAF baseado em pastagens (sistema agrossilvopastoril - ASP1). Além destes sistemas, áreas de capoeira de mesma idade que os SAFs foram utilizadas como controle.

Amostragem

Foram realizadas quatro amostragens temporais: nas épocas chuvosa (em 17/04/2001, precipitação de 405 mm e temperatura de 27°C) e seca (em 18/09/2001, precipitação de 124 mm e temperatura de 28°C) e nas fases sazonais de transição entre as épocas seca e chuvosa (em 19/12/2001, precipitação de 236 mm e temperatura de 28°C) e entre as épocas chuvosa e seca (em 25/06/2002, precipitação de 226 mm e temperatura de 27°C). Para estas amostragens foram traçadas transecções de 50m de comprimento, perpendiculares as linhas de plantações nos SAFs e no sentido norte e sul nas capoeiras. Para as análises do potencial de inóculo de micorizas no solo dos sistemas foram realizadas coletas de solo e de raízes finas a cada 2m de distância nas transecções, com o auxílio de um trado metálico. As coletas foram realizadas nas camadas orgânica (de 0 – 10cm) e mineral (de 20 – 30cm) do perfil do solo, com exclusão da camada superficial de liteira. Cada grupo de cinco coletas foi misturado, homogeneizado e considerado como uma amostra composta.

Colonização de Micorrizas Arbusculares

No laboratório foi avaliada a taxa de colonização de micorrizas arbusculares nas raízes finas coletadas do solo dos SAFs e da capoeira (Claassen & Zasoski, 1992). As raízes finas foram separadas do solo e lavadas em água corrente. Com o auxílio de um bisturi, as raízes foram cortadas em pedaços de 1cm. Ao acaso selecionou-se 100 pedaços que foram confinados em seringas com pontas teladas e submetidos a uma solução clareadora de hidróxido de potássio (KOH) 2,5% em autoclave (a 120°C por 5 min), para facilitar a penetração dos reagentes. Em seguida as raízes foram colocadas em solução de

peróxido de hidrogênio (H₂O₂), lavadas e cobertas com ácido clorídrico (HCl) 1%, para acidificar as raízes facilitando a posterior impregnação do corante “Triphan Blue” (Phillips & Hayman, 1970). Após a coloração, 10 pedaços de raízes foram montados em lâminas para a contagem da taxa de colonização micorrízica, observando a raiz em todo seu comprimento. Com o auxílio de uma lente ocular milimetrada foi anotado, em cada interseção, se as raízes eram positivas ou negativas para as características das micorrizas arbusculares, i.e., a presença de arbúsculos, vesículas e hifas. Os valores obtidos foram aplicados na seguinte equação:

$$\% \text{ de colonização micorrízica} = \frac{\text{n}^{\circ} \text{ de interseções positivas} \times 100}{\text{n}^{\circ} \text{ de positivas} + \text{negativas}}$$

Umidade do Solo

Para a análise da porcentagem de água no solo (umidade gravimétrica) inicialmente foram pesadas alíquotas de solo para estimar o peso úmido. Depois de pesadas, as amostras foram colocadas para secar em estufa a 105 °C por 24 h, após o qual foram novamente pesadas, para estimar o peso do material seco. A seguinte equação foi aplicada para o cálculo da umidade gravimétrica (EMBRAPA, 1997):

$$U\% = \frac{(\text{peso úmido} - \text{peso seco}) \times 100}{\text{peso seco}}$$

Acidez Real

A acidez real (pH em água) é a concentração de íons de hidrogênio que afetam diretamente a biota do solo, em contraste com a acidez total, medida com KCl, que indica a concentração total de íons de hidrogênio que afetam ou não a biota do solo. Para avaliar o pH real foi utilizada a metodologia proposta pelos laboratórios da EMBRAPA (EMBRAPA, 1997): em um béquer de vidro de 50ml, pesou-se 10 g de solo seco e moído; adicionou-se 25ml de água destilada; deixou-se a mistura descansar por 40 minutos e leu-se o pH da amostra em pHmetro. O pHmetro foi ligado 30 minutos antes de sua utilização, para estabilizar o aparelho.

Concentração de Nutrientes no Solo

Para estimar as concentrações de macro e microelementos no solo foi utilizada a metodologia do duplo - ácido (EMBRAPA, 1997). A solução de duplo - ácido (HCl 0,05M + H₂SO₄ 0,0125M) foi obtida a partir da diluição da mistura de 43ml de ácido clorídrico e 6,9ml de ácido sulfúrico em um béquer com 10 litros de água destilada. Para extrair os nutrientes do solo pesou-se 5g de solo seco e moído em béquer de 100ml, adicionou-se 50ml da solução de duplo - ácido, agitou-se por 5 minutos e deixou-se decantar por uma noite.

Para determinar o fósforo pipetou-se 20ml do extrato da amostra, adicionou-se 10ml de solução ácida de molibdato de amônio e 30mg de ácido ascórbico em pó. A solução foi agitada por 2 minutos e após uma hora realizou-se a leitura em espectrofotômetro (Shimadzu) com comprimento de onda (λ) de 660nm. Para obter a solução ácida de molibdato de amônio adicionou-se 20g de molibdato de amônio em 1litro de água

destilada. Para determinar o potássio trocável da amostra pipetou-se 20ml do extrato e realizou-se a leitura em espectrofotômetro de chama. Para determinar os microelementos (Fe, Zn e Mn) pipetou-se 25ml do extrato, filtrou-se o extrato em filtro Whatman nº42 e leu-se em espectrofotômetro de chama.

Para as análises de carbono e nitrogênio totais do solo, as amostras de solo foram secas em estufa a 60 °C por 72 h, após o que foram maceradas e peneiradas (malha 0,85 mm). De cada amostra, foram pesadas alíquotas de 10 a 15 mg de solo e embaladas em cápsulas de estanho.

Foi utilizado um Auto-Analizador de fase gasosa (usando o hélio como gás carregador) da marca Carlo Erba®, modelo NA 1500 para as análises de carbono e nitrogênio totais no solo (Campbell *et al.*, 1998). Nesse aparelho, as amostras foram queimadas a 970 °C em um meio oxidante e os gases da combustão entraram numa coluna de oxidação (óxido de cromo e óxido de cobalto granulado), onde foram transformados em CO₂, H₂O e N_xO_y. Em seguida, as amostras passaram por uma coluna de redução (cobre) para transformar os óxidos de nitrogênio em nitrogênio elementar (N₂). O excesso de água foi retido em uma ampola com óxido de magnésio. O CO₂ e N₂ foram separados numa coluna de cromatografia. As medidas de carbono e nitrogênio totais do solo foram feitas num detector de condutividade térmica. O sinal amplificado passou pelo integrador Chromjet Integrator – Thermo Separation Products® para obtenção do cromatograma, o qual correspondia a gráficos com áreas conhecidas. A partir dessas áreas, foram calculadas as porcentagens de carbono e nitrogênio totais das amostras.

Análise dos Dados

Para realizar as análises estatísticas foram calculadas as médias das amostras. As médias foram testadas quanto a normalidade utilizando o teste Lilliefors. Os dados que não mostraram distribuição normal foram transformados em logarítimo. Análises de variância simples (ANOVA) foram aplicadas para verificar os efeitos dos SAFs e da camada de solo, 0 - 10cm (solo orgânico) e 20 – 30cm (solo mineral) (variáveis independentes) sobre a taxa de colonização micorrízica e na concentração de nutrientes no solo (variáveis dependentes). Na constatação de algum efeito significativo ($p \leq 0,05$), foi aplicado o teste de “Tukey” que fez comparações entre os SAFs e a capoeira

RESULTADOS

Umidade, pH e Nutrientes do Solo

Entre as camadas orgânica (de 0 – 10 cm de profundidade) e mineral (de 20 – 30 cm de profundidade) do solo foram observadas variações nas porcentagens de umidade, carbono e nitrogênio, nos valores de pH e nas concentrações dos nutrientes no solo. No SAF baseado em palmeiras os parâmetros físicos e químicos que variaram entre as camadas orgânica e mineral do solo foram as porcentagens de umidade, carbono e nitrogênio e as concentrações de fósforo e manganês (Tabela 5.1).

Tabela 5.1. Parâmetros físicos e químicos das camadas orgânica e mineral do solo no SAF baseado em palmeiras. Os valores são médias \pm desvio padrão de quatro coletas em cada uma das três réplicas de cada sistema.

Parâmetros	Camada do solo		ANOVA	
	Orgânica	Mineral	F	P
Umidade (%)	40,5 \pm 0,5	37,2 \pm 1,8	5,4	0,030
pH	4,5 \pm 0,3	4,6 \pm 0,2	0,9	n.s.
C (%)	3,1 \pm 0,9	1,5 \pm 0,4	36,5	0,0001
N (%)	0,2 \pm 0,03	0,1 \pm 0,01	87,6	0,0001
C:N	16,1 \pm 3,9	14,4 \pm 3,9	1,2	n.s.
P (mg kg ⁻¹)	58,2 \pm 27,1	16,9 \pm 10,2	26,9	0,000
K (mg kg ⁻¹)	147 \pm 149	98 \pm 103	1,7	n.s.
Fe (mg kg ⁻¹)	395 \pm 147	385 \pm 203	0,017	n.s.
Mn (mg kg ⁻¹)	6,5 \pm 2,7	2,9 \pm 0,8	22,7	0,0001
Zn (mg kg ⁻¹)	15,2 \pm 11,1	15 \pm 10	0,002	n.s.

No SAF baseado em fruteiras os parâmetros físicos e químicos que variaram entre as camadas orgânica e mineral do solo foram as concentrações de fósforo e manganês e as porcentagens de carbono e nitrogênio do solo (Tabela 5.2).

Tabela 5.2. Parâmetros físicos e químicos das camadas orgânica e mineral do solo no SAF baseado em fruteiras. Os valores são médias \pm desvio padrão de quatro coletas em cada uma das três réplicas de cada sistema.

Parâmetros	Camada do solo		ANOVA	
	Orgânica	Mineral	F	P
Umidade (%)	38,7 \pm 3	37,6 \pm 1	1	n.s
pH	4,4 \pm 0,1	4,4 \pm 0,1	0	n.s.
C (%)	2,9 \pm 0,5	1,5 \pm 0,3	68,9	0,0001
N (%)	0,2 \pm 0,03	0,1 \pm 0,02	46,1	0,0001
C:N	14,9 \pm 3,5	13,4 \pm 3,6	0,8	n.s.
P (mg kg ⁻¹)	64,9 \pm 39,3	21 \pm 13,7	18	0,0001
K (mg kg ⁻¹)	161 \pm 164	118 \pm 110	1	n.s.
Fe (mg kg ⁻¹)	395 \pm 125	417 \pm 184	0,04	n.s.
Mn (mg kg ⁻¹)	7,3 \pm 3,9	3,1 \pm 0,9	17	0,0001
Zn (mg kg ⁻¹)	14,1 \pm 12,7	12 \pm 12,4	0,1	n.s.

No SAF baseado em pastagens os parâmetros físicos e químicos que variaram entre as camadas orgânica e mineral do solo também foram as concentrações de fósforo e manganês e as porcentagens de carbono e nitrogênio do solo (Tabela 5.3).

Tabela 5.3. Parâmetros físicos e químicos das camadas orgânica e mineral do solo no SAF baseado em pastagens. Os valores são médias \pm desvio padrão de quatro coletas em cada uma das três réplicas de cada sistema.

Parâmetros	Camada do solo		ANOVA	
	Orgânica	Mineral	F	P
Umidade (%)	38,9 \pm 3,6	37,3 \pm 1,8	1,7	n.s.
pH	4,5 \pm 0,2	4,6 \pm 0,2	0,8	n.s.
C (%)	3,1 \pm 0,7	1,5 \pm 0,3	66,2	0,0001
N (%)	0,2 \pm 0,03	0,1 \pm 0,02	61,6	0,0001
C:N	14,9 \pm 3,5	13,6 \pm 3,7	0,9	n.s.
P (mg kg ⁻¹)	54,9 \pm 28,8	19,2 \pm 14,2	15,2	0,001
K (mg kg ⁻¹)	160 \pm 150	104 \pm 91	1,9	n.s.
Fe (mg kg ⁻¹)	472 \pm 171	409 \pm 185	0,8	n.s.
Mn (mg kg ⁻¹)	6 \pm 2,2	4,3 \pm 3,7	5,7	0,026
Zn (mg kg ⁻¹)	11,9 \pm 9,9	18,1 \pm 16,4	1,1	n.s.

Na capoeira os parâmetros físicos e químicos que variaram entre as camadas orgânica e mineral do solo foram as porcentagens de umidade, carbono e nitrogênio, os valores de pH e as concentrações de fósforo e manganês no solo (Tabela 5.4).

Tabela 5.4. Parâmetros físicos e químicos das camadas orgânica e mineral do solo no SAF baseado em pastagens. Os valores são médias \pm desvio padrão de quatro coletas em cada uma das três réplicas de cada sistema.

Parâmetros	Camada do solo		ANOVA	
	Orgânica	Mineral	F	P
Umidade (%)	43,2 \pm 3,2	38,9 \pm 1,2	18	0,0001
pH	4,3 \pm 0,1	4,5 \pm 0,1	13	0,002
C (%)	3 \pm 0,8	1,5 \pm 0,3	39,7	0,0001
N (%)	0,2 \pm 0,03	0,1 \pm 0,03	31	0,0001
C:N	15,9 \pm 4	14 \pm 4	1,4	n.s.
P (mg kg ⁻¹)	23,2 \pm 11,8	9,7 \pm 4,9	15,8	0,001
K (mg kg ⁻¹)	127 \pm 143	98 \pm 103	0,7	n.s.
Fe (mg kg ⁻¹)	394 \pm 145	412 \pm 228	0,02	n.s.
Mn (mg kg ⁻¹)	4,6 \pm 1,8	3 \pm 1	6,9	0,016
Zn (mg kg ⁻¹)	14,6 \pm 12,1	13,8 \pm 11,8	0,1	n.s.

Camada Orgânica do Solo (de 0 – 10cm de Profundidade)

No geral, as porcentagens de umidade na camada orgânica do solo foram maiores no SAF baseado em palmeiras (40,5%) e na capoeira (43%) (Tabela 5.5). Durante a fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca as porcentagens de umidade no solo foram maiores na capoeira (46,3%) do que nos SAFs baseados em fruteiras (41,1%) e em

pastagens (41,2%) (ANOVA; $F = 6,1$; $p = 0,018$). Nas outras fases sazonais não houveram variações nas porcentagens de umidade do solo nos SAFs e na capoeira.

Os valores de pH da camada orgânica do solo foram menores na capoeira (4,3) e no SAF baseado em fruteiras (4,4) (Tabela 5.5). Durante a fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca foram observados os menores valores de pH do solo na capoeira (4,3) do que nos SAFs baseados em palmeiras (4,7) e em pastagens (4,6) (ANOVA; $F = 7,1$; $p = 0,012$). Nas outras fases sazonais não houveram variações nos valores de pH do solo nos SAFs e na capoeira.

As concentrações de fósforo na camada orgânica do solo foram maiores nos SAFs (54,9 – 68,8 mg kg⁻¹) do que na capoeira (23,5 mg kg⁻¹) (Tabela 5.5). O fósforo foi o único elemento que mostrou variação em todas as fases sazonais. Durante a época chuvosa as concentrações de fósforo foram maiores no SAF baseado em fruteiras (25,2 mg kg⁻¹) do que na capoeira (10,5 mg kg⁻¹) (Tabela 5.6). Na fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca as concentrações de fósforo no solo foram maiores nos SAFs baseado em fruteiras (101,5 mg kg⁻¹) e em palmeiras (78,1 mg kg⁻¹) do que na capoeira (32,1 mg kg⁻¹). Durante a época seca as concentrações de fósforo no solo foram maiores nos SAFs baseado em palmeiras (60 mg kg⁻¹) e em pastagens (54,7 mg kg⁻¹) do que na capoeira (19 mg kg⁻¹). Na fase sazonal de transição entre as épocas seca e chuvosa as concentrações de fósforo foram maiores no SAF baseado em fruteiras (106,8 mg kg⁻¹) do que na capoeira (32,2 mg kg⁻¹). Apenas na época seca o SAF baseado em fruteiras não mostrou as maiores concentrações de fósforo na camada orgânica do solo.

As concentrações de potássio na camada orgânica do solo não variaram entre os SAFs e a capoeira (Tabela 5.5). Na fase sazonal de transição entre as épocas seca e chuvosa

as concentrações de potássio foram maiores nos SAFs baseados em fruteiras (48,2 mg kg⁻¹) e em pastagens (49,9 mg kg⁻¹) do que na capoeira (29,2 mg kg⁻¹) (ANOVA; F = 12,5; p = 0,002). Nas outras fases sazonais não houveram variações nas concentrações de potássio do solo nos SAFs e na capoeira.

As concentrações dos micronutrientes ferro, manganês e zinco e as porcentagens de carbono e nitrogênio e a relação C:N na camada orgânica do solo (Tabela 5.5) não mostraram variações nem entre os SAFs e a capoeira e nem entre as fases sazonais.

Tabela 5.5. Parâmetros físicos e químicos da camada orgânica do solo (de 0 – 10cm de profundidade) nos SAFs e na capoeira. Os valores são médias ± desvio - padrão de quatro coletas em cada uma das três réplicas de cada sistema. Letras diferentes na mesma linha correspondem a variação significativa (p<0,05).

Parâmetros	Sistemas agroflorestais			Capoeira	ANOVA	
	Palmeiras	Fruteiras	Pastagens		F	P
Umidade (%)	40,5 ab ± 4,4	38,5 a ± 2,5	38,8 a ± 3,2	43 b ± 3,3	4	0,014
pH	4,5 a ± 0,14	4,4 ab ± 0,08	4,5 a ± 0,11	4,3 b ± 0,1	6,1	0,001
C (%)	3,1 ± 0,9	2,8 ± 0,5	3,1 ± 0,7	3 ± 0,7	0,4	n. s.
N (%)	0,2 ± 0,03	0,2 ± 0,03	0,21 ± 0,03	0,19 ± 0,02	0,6	n. s.
C:N	16 ± 4,3	15 ± 3,2	15 ± 3,6	16 ± 3,8	0,3	n. s.
P (mg kg ⁻¹)	58,2 a ± 26,5	68,8 a ± 41,4	54,9 a ± 27,4	23,5 b ± 10,6	6,2	0,001
K (mg kg ⁻¹)	147 ± 126	152 ± 140	151 ± 122	119 ± 122	0,1	n. s.
Fe (mg kg ⁻¹)	395 ± 87	390 ± 80	465 ± 119	382 ± 103	0,8	n. s.
Mn (mg kg ⁻¹)	6,5 ± 2,1	7,1 ± 2,4	5,9 ± 1,8	4,5 ± 1	1,9	n. s.
Zn (mg kg ⁻¹)	15,2 ± 11,1	14,7 ± 11,7	12,1 ± 7,9	15,1 ± 11,2	0,2	n. s.

Tabela 5.6. Concentrações de fósforo (mg kg^{-1}) na camada orgânica do solo (de 0 – 10cm de profundidade) nos SAFs e na capoeira nas diferentes fases sazonais. Os valores são médias \pm desvio-padrão de quatro coletas em cada uma das três réplicas de cada sistema. Letras diferentes na mesma linha correspondem a variação significativa ($p < 0,05$).

Fase sazonal	Sistemas agroflorestais			Capoeira	ANOVA	
	Palmeiras	Fruteiras	Pastagens		F	P
Chuvosa	20,3 ab $\pm 2,2$	25,2 a $\pm 7,7$	16,3 ab $\pm 2,3$	10,5 b $\pm 3,3$	5,7	0,021
Chuvosa - seca	78,1 a ± 25	101 a $\pm 21,2$	76 ab $\pm 2,1$	32,1 b $\pm 8,1$	8,8	0,006
Seca	60 a ± 2	41,8 ab $\pm 9,1$	54,7 a ± 18	19 b ± 7	8,7	0,007
Seca - chuvosa	74,5 ab $\pm 15,9$	107 a $\pm 19,8$	72,6 ab $\pm 20,9$	32,2 b $\pm 8,3$	9,7	0,005

Camada Mineral do Solo (de 20 – 30 cm de Profundidade)

As porcentagens de umidade na camada mineral do solo foram maiores na capoeira (38,9%) (Tabela 5.7). Os valores de pH na camada mineral do solo foram maiores no SAF baseado em palmeiras (4,6) (Tabela 5.7). As concentrações de fósforo na camada mineral do solo foram maiores no SAF baseado em fruteiras do que na capoeira (Tabela 5.7). As porcentagens de umidade, os valores de pH e as concentrações de fósforo na camada mineral não variaram entre as fases sazonais.

No geral, as concentrações de potássio na camada mineral do solo não variaram entre os SAFs e a capoeira, mas na fase sazonal de transição entre as épocas seca e chuvosa as concentrações de potássio no solo foram maiores no SAF baseado em fruteiras ($25,7 \text{ mg kg}^{-1}$) do que na capoeira (15 mg kg^{-1}) (ANOVA; $F = 6,5$; $p = 0,015$).

As concentrações de zinco na camada mineral do solo não variaram entre os SAFs e a capoeira. Na fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca, as concentrações

de zinco no solo foram maiores nos SAFs baseado em pastagens (20,3 mg kg⁻¹) e em palmeiras (8 mg kg⁻¹) do que no SAF baseado em fruteiras (0,05 mg kg⁻¹) (ANOVA; F = 6,9; p = 0,022). Nas outras fases sazonais não houveram variações nas concentrações de zinco nos SAFs e na capoeira.

As concentrações de ferro e manganês e as porcentagens de carbono e nitrogênio e a relação C:N na camada mineral do solo não variaram nem entre os SAFs e a capoeira e nem entre as fases sazonais.

Tabela 5.7. Parâmetros físicos e químicos na camada mineral do solo (20 – 30cm de profundidade) nos SAFs e na capoeira. Os valores são médias ± desvio - padrão de quatro coletas em cada uma das três réplicas de cada sistema. Letras diferentes na mesma linha correspondem a variação significativa (p<0,05).

Parâmetros	Sistemas agroflorestais			Capoeira	ANOVA	
	Palmeiras	Fruteiras	Pastagens		F	P
Umidade (%)	37,2 a ± 0,7	37,6 ab ± 0,7	37,4 ab ± 1,1	38,9 b ± 1	3,3	0,029
pH	4,6 a ± 0,14	4,4 b ± 0,08	4,5 ab ± 0,13	4,4 ab ± 0,08	3,4	0,026
C (%)	1,5 ± 0,4	1,5 ± 0,2	1,5 ± 0,3	1,5 ± 0,3	0,1	n. s.
N (%)	0,1 ± 0,01	0,11 ± 0,02	0,11 ± 0,02	0,12 ± 0,02	1,3	n. s.
C:N	14 ± 4,2	14 ± 3,6	14 ± 3,9	14 ± 4	0,1	n. s.
P (mg kg ⁻¹)	16,9 ab ± 8,3	21,4 b ± 12	19,6 ab ± 11,1	9,7 a ± 4,6	3,4	0,025
K (mg kg ⁻¹)	98,4 ± 103	110,1 ± 104,9	97,4 ± 89,7	91,3 ± 99,7	0,3	n. s.
Fe (mg kg ⁻¹)	386 ± 132	402 ± 125	401 ± 121	394 ± 149	0,1	n. s.
Mn (mg kg ⁻¹)	2,9 ± 0,6	3,1 ± 0,7	4,2 ± 2,1	3 ± 1	1	n. s.
Zn (mg kg ⁻¹)	15 ± 9,3	13 ± 9,3	17,7 ± 2,2	13,6 ± 11	0,3	n. s.

Colonização de Micorrizas Arbusculares

As taxas de colonização de micorrizas arbusculares foram estudadas pela observação de suas estruturas formadoras, tais como, hifas, arbúsculos e vesículas (Figura 5.1). O somatório das taxas de colonização das estruturas de micorrizas arbusculares foi considerado como a taxa de colonização total de micorrizas arbusculares. As taxas de colonização de micorrizas não variaram entre as raízes coletadas nas camadas orgânica (de 0 – 10cm) e mineral (de 20 – 30cm) do perfil do solo nos SAFs e na capoeira.

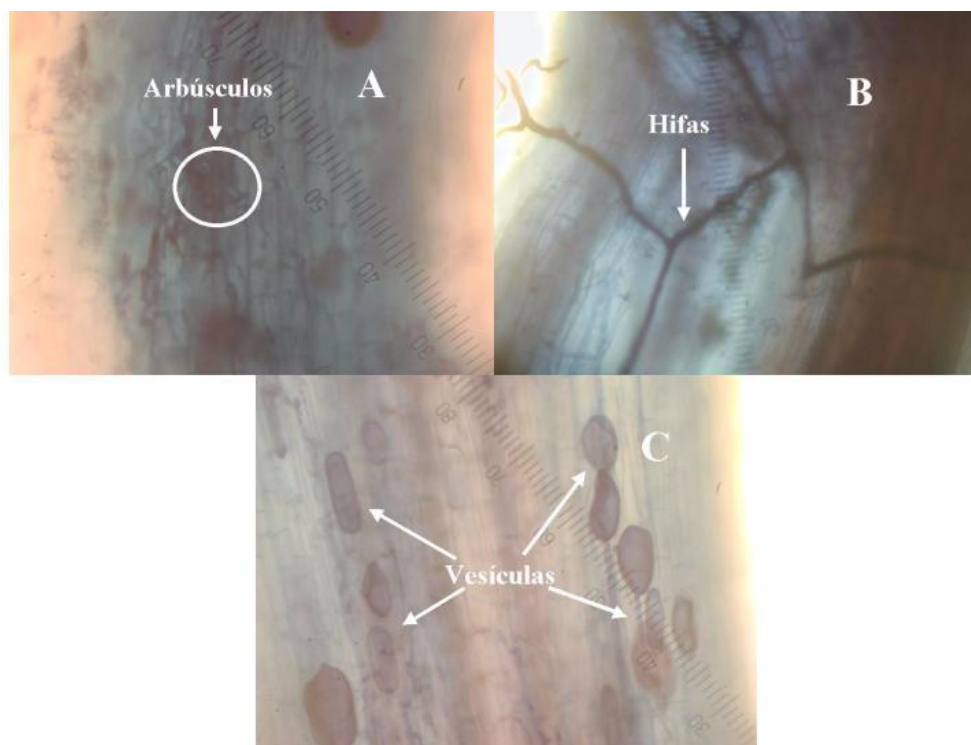


Figura 5.1. Micrografia das raízes finas contendo as estruturas das micorrizas arbusculares observadas no microscópio óptico. (A) arbúsculos, (B) hifas e (C) vesículas. Magnificação de 60 vezes ao microscópio óptico.

Camada Orgânica do Solo (de 0 - 10cm de Profundidade)

Nas raízes coletadas na camada orgânica do solo as taxas de colonização total de micorrizas foram maiores no SAF baseado em pastagens (35,8%) (Tabela 5.8).

Dentre as estruturas das micorrizas arbusculares, as taxas de hifas foram maiores no SAF baseado em pastagens (27,9%) e as taxas de vesículas foram maiores nos SAFs baseados em fruteiras (3,2%) e em pastagens (4,9%) (Tabela 5.8).

Na camada orgânica do solo as fases sazonais influenciaram apenas as taxas de arbúsculos de micorrizas. Durante a época seca as taxas de arbúsculos de micorrizas foram maiores no SAF baseado em pastagens (4,6%) do que nos SAFs baseados em palmeiras (1%) e em fruteiras (0,2%) e na capoeira (0,6%) (ANOVA; F = 76; p = 0,001).

Tabela 5.8. Taxas de colonização de micorrizas arbusculares na camada orgânica do solo (de 0 – 10cm de profundidade) nos SAFs e na capoeira. Os valores são médias ± desvio - padrão de quatro coletas em cada uma das três réplicas de cada sistema. Letras diferentes na mesma linha correspondem a variação significativa (p<0,05).

Taxas de colonização	Sistemas agroflorestais			Capoeira	ANOVA	
	Palmeiras	Fruteiras	Pastagens		F	P
Hifas (%)	13,3 a ± 5,7	23 ab ± 6,3	27,9 b ± 7,8	15,2 a ± 8,9	5,6	0,002
Vesículas (%)	1,9 ab ± 0,7	3,2 a ± 1,1	4,9 a ± 2,1	1,1 b ± 0,4	6,5	0,001
Arbúsculos (%)	2,4 ± 3,6	1,5 ± 2	2,8 ± 2	0,5 ± 0,3	1,4	n. s.
Micorrizas totais (%)	17,7 a ± 9,3	27,7 ab ± 8,9	35,8 b ± 11,2	16,8 a ± 9,3	5,4	0,003

Camada Mineral do Solo (de 20 - 30cm de Profundidade)

Nas raízes coletadas na camada mineral do solo as taxas de colonização total de micorrizas também foram maiores no SAF baseado em pastagens (28,4%) (Tabela 5.9).

Dentre as estruturas das micorrizas arbusculares, as taxas de hifas foram maiores no SAF baseado em pastagens (22,3%), as de vesículas foram maiores nos SAFs baseados em fruteiras (2,4%) e em pastagens (3,7%) e as de arbúsculos foram maiores no SAF baseado em pastagem (2,4%) (Tabela 5.9).

Tabela 5.9. Taxas de colonização de micorrizas arbusculares na camada mineral do solo (de 20 – 30cm de profundidade) nos SAFs e na capoeira. Os valores são médias \pm desvio-padrão de quatro coletas em cada uma das três réplicas de cada sistema. Letras diferentes na mesma linha correspondem a variação significativa ($p < 0,05$).

Taxas de colonização	Sistemas agroflorestais			Capoeira	ANOVA	
	Palmeiras	Fruteiras	Pastagens		F	P
Hifas (%)	16,4 ab $\pm 7,6$	14,3 a $\pm 2,8$	22,3 b $\pm 3,8$	11 a $\pm 3,2$	5,4	0,003
Vesículas (%)	1,6 ab $\pm 0,4$	2,4 a $\pm 1,5$	3,7 a $\pm 1,3$	1,2 b $\pm 0,8$	5	0,005
Arbúsculos (%)	0,7 a $\pm 0,2$	0,6 a $\pm 0,9$	2,4 b $\pm 1,3$	0,7 a $\pm 0,3$	6,3	0,002
Micorrizas totais (%)	18,7 a $\pm 7,4$	17,3 a $\pm 3,5$	28,4 b $\pm 3,7$	12,9 a $\pm 3,6$	7,6	0,0001

Na camada mineral do solo as fases sazonais mostraram grande influência nas variações da colonização de micorrizas arbusculares entre as fases sazonais (Tabela 5.10). Durante a época chuvosa as taxas de hifas de micorrizas foram maiores no SAF baseado em palmeiras (27,3%) do que na capoeira (10,9%). Na fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca as taxas de hifas de micorrizas foram maiores no SAF baseado em pastagens (17,6%) do que na capoeira (8,6%).

Durante a época chuvosa as taxas de vesículas de micorrizas foram maiores no SAF baseado em pastagens (2,1%) do que no baseado em fruteiras (0,6%). Na fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca as taxas de arbúsculos de micorrizas foram maiores no SAF baseado em pastagens (3,8%) do que na capoeira (0,6%) e na época seca as taxas de arbúsculos foram maiores no SAF baseado em pastagens (2,5%) do que nos SAFs baseados em palmeiras (1%) e em fruteiras (0,2%).

Durante a época chuvosa as taxas de colonização total de micorrizas arbusculares foram maiores no SAF baseado em palmeiras (29,3%) do que na capoeira (12,8%). Na fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca as taxas de colonização total de micorrizas foram maiores no SAF baseado em pastagens (26,4%) do que nos SAFs baseados em palmeiras (11,9%) e em fruteiras (15,4%) e na capoeira (11,3%).

Tabela 5.10. Colonização de micorrizas arbusculares (%) na camada mineral do solo. Os valores são médias \pm desvio - padrão de quatro coletas em cada uma das três réplicas de cada sistema. Letras diferentes na mesma linha correspondem a variação significativa ($p < 0,05$).

Fases sazonais	Sistemas agroflorestais				ANOVA	
	Palmeiras	Fruteiras	Pastagens	Capoeira	F	P
	Hifas					
Chuvosa	27,3 a $\pm 7,7$	13,1 ab $\pm 6,2$	21,8 ab $\pm 4,1$	10,9 b $\pm 4,8$	5,1	0,029
Chuvosa - seca	10,1 ab $\pm 2,2$	10,9 ab $\pm 4,1$	17,6 a $\pm 2,9$	8,6 b $\pm 2,2$	5,4	0,025
Seca	13,1 $\pm 3,2$	15,7 $\pm 9,8$	26,9 $\pm 15,3$	15,6 $\pm 3,4$	1,3	n.s.
Seca - chuvosa	15,1 $\pm 5,8$	17,3 $\pm 7,1$	23,1 $\pm 8,3$	9 $\pm 5,9$	2,2	n.s.
	Vesículas					
Chuvosa	1,5 ab $\pm 0,4$	0,5 a $\pm 0,9$	2,1 b $\pm 0,4$	0,9 ab $\pm 0,2$	4,2	0,045
Chuvosa - seca	1,1 $\pm 1,5$	2,5 $\pm 1,4$	5,1 $\pm 3,5$	2,1 $\pm 2,8$	1,4	n.s.
Seca	2 $\pm 2,3$	2,4 $\pm 1,7$	3,5 $\pm 2,8$	1,6 $\pm 1,7$	0,4	n.s.
Seca - chuvosa	1,9 $\pm 1,6$	4,1 $\pm 1,1$	4,1 $\pm 2,6$	0,3 $\pm 0,3$	3,9	n.s.
	Arbúsculos					
Chuvosa	0,5 $\pm 0,1$	0 ± 0	0,6 $\pm 1,1$	1,1 $\pm 1,1$	7,6	n.s.
Chuvosa - seca	0,7 ab $\pm 0,6$	2 ab $\pm 0,6$	3,8 a $\pm 2,2$	0,6 b $\pm 0,3$	4,7	0,035
Seca	1 ab $\pm 0,5$	0,2 a $\pm 0,2$	2,5 b $\pm 2,3$	0,8 ab $\pm 0,9$	7,1	0,030
Seca - chuvosa	0,6 $\pm 0,4$	0,3 $\pm 0,4$	2,5 $\pm 2,8$	0,4 $\pm 0,6$	0,8	n.s.
	Micorrizas totais					
Chuvosa	29,3 a $\pm 7,7$	13,7 ab $\pm 6,1$	24,5 ab $\pm 4,6$	12,8 b $\pm 5,2$	5,5	0,024
Chuvosa - seca	11,9 a $\pm 2,3$	15,4 a $\pm 4,7$	26,5 b $\pm 2,8$	11,3 a $\pm 4,4$	10,7	0,004
Seca	16,2 $\pm 4,2$	18,3 $\pm 11,4$	32,9 ± 20	17,9 $\pm 1,7$	1,3	n.s.
Seca - chuvosa	17,6 $\pm 6,2$	21,8 $\pm 5,7$	29,7 $\pm 13,6$	9,7 $\pm 6,4$	2,8	n.s.

DISCUSSÃO

Umidade, pH e Nutrientes do Solo

A água é o recurso mais importante para o crescimento das plantas. Na maioria dos ecossistemas naturais, o principal estoque de água para as plantas está no solo. As plantas necessitam mais de água do que de nutrientes para seu crescimento, pois embora as plantas possam estocar os nutrientes na biomassa, a água é continuamente perdida para o ambiente através da transpiração (Aber & Melillo, 1991; Epstein & Bloom, 2005). A velocidade da transpiração depende da natureza do solo, da precipitação e das espécies de plantas.

No presente estudo, a capoeira mostrou as maiores porcentagens de umidade do solo, tanto na camada orgânica do solo quanto na mineral. As menores porcentagens de umidade do solo nos SAFs podem estar influenciando ou sendo influenciado por maiores taxas de transpiração e absorção de água nas plantas destes sistemas (Aber & Melillo, 1991). Na fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca as porcentagens de umidade da camada orgânica do solo foram maiores na capoeira do que nos SAFs baseados em fruteiras e em palmeiras. O estudo de Gallardo-Ordinola (2004) mostrou que as plantas dos SAFs têm muitas raízes finas superficiais, as quais podem estar absorvendo a umidade da camada orgânica do solo com maior eficiência.

As maiores porcentagens de umidade do solo na capoeira podem estar influenciando a decomposição da liteira e acidificando o solo deste sistema pela liberação de ácidos orgânicos. No presente estudo, a camada orgânica do solo na capoeira foi duas vezes mais ácida do que a dos SAFs. Isso pode ter ocorrido porque a capoeira produziu as maiores massas de liteira, e como a liteira da capoeira é de lenta decomposição as concentrações de ácidos orgânicos no solo aumentaram ocasionando a acidificação do solo.

Na camada mineral do solo, os valores de pH foram menores no SAF baseado em fruteiras do que no baseado em palmeiras. Em contraste com o SAF baseado em palmeiras, o SAF baseado em fruteiras tem várias espécies com raízes profundas, as quais decompõe e liberam ácidos orgânicos nas camadas mais profundas no perfil do solo. Os valores de pH em água (acidez real) abaixo de 5,2 como o observado neste estudo, caracterizam o solo como fortemente ácido e de baixa concentração de nutrientes essenciais (Juo & Franzluebbbers, 2003).

No presente estudo, apenas os valores de pH do solo da capoeira mostraram variações entre as camadas orgânica e mineral do solo. Os SAFs não mostraram variações significativas nos valores de pH entre as camadas orgânica e mineral, mas a camada orgânica mostrou sempre os menores valores de pH. Segundo Aber & Melillo (1991) a camada orgânica do solo geralmente é mais ácida do que a camada mineral, como foi observado na capoeira do presente estudo, devido a alta atividade biológica e a baixa taxa de lixiviação (perda) dos nutrientes do ecossistema. Contudo, quando as taxas de lixiviação dos nutrientes são menores na camada mineral do solo, os valores de pH são similares entre as camadas orgânica e mineral do solo, como observado nos SAFs.

Os valores de pH observados na camada orgânica do solo no presente estudo foram similares ao observado para o solo da região de Manaus (Schroth *et al.*, 1999; Menyailo *et al.*, 2003). Na Amazônia peruana os valores de pH observados na camada orgânica do solo em SAFs foram ainda menores do que os observados no presente estudo, variando entre 3,6 e 3,9 (Tapia-Coral, 2004).

O termo fertilidade do solo foi definido por Juo & Franzluebbbers (2003) como a capacidade do solo de suportar o crescimento das plantas por longos períodos de tempo sem

degradar as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo. A importância do nutrientes essenciais já foi discutida no capítulo 3.

No geral, as concentrações de potássio, tanto da camada orgânica do solo quanto da mineral, não diferiram estatisticamente entre os SAFs e a capoeira. Outros estudos mostraram que as concentrações de potássio na camada orgânica do solo próximo das plantas são maiores nos SAFs do que na capoeira (Pereira *et al.*, 2005), mas nesse caso as plantas dos SAFs haviam recebido fertilização química a base de potássio.

Na fase sazonal de transição entre as épocas seca e chuvosa as concentrações de potássio mostraram diferenças, tanto na camada orgânica do solo quanto na mineral. Na camada orgânica do solo as concentrações de potássio foram maiores nos SAFs baseado em fruteiras e em pastagens, e na camada mineral as concentrações de potássio foram maiores no SAF baseado em fruteiras.

No solo, o potássio disponível para as plantas está na forma iônica K^+ , que é muito móvel (Aber & Melillo, 1991; Juo & Franzluebbbers, 2003). Nesta forma o potássio não é assimilado por nenhum composto orgânico conhecido e é facilmente lixiviado do sistema. Na planta, o potássio está na forma orgânica e é o nutriente mais abundante (10% do peso seco da planta) (Epstein & Bloom, 2005). As funções do potássio nas plantas estão relacionadas ao transporte de nutrientes.

No presente estudo, as concentrações de fósforo foram sempre maiores na camada orgânica do solo, tanto nos SAFs, quanto na capoeira. Entre as camadas orgânica e mineral do solo, as concentrações de fósforo foram cerca de três vezes maiores na camada orgânica do solo dos SAFs e duas vezes maiores na camada orgânica da capoeira. As concentrações de fósforo foram maiores na camada orgânica do solo por ela ser rica em matéria orgânica e ter maior atividade biológica (Aber & Melillo, 1991; Lehmann *et al.*, 2001; Juo &

Franzluebbers, 2003). As fontes de fósforo para os ecossistemas naturais são a atmosfera (precipitação), lixiviação da rocha matriz e, principalmente, a decomposição da matéria orgânica (Aber & Melillo, 1991; Juo & Franzluebbers, 2003).

O fósforo está relacionado com as principais vias metabólicas das plantas (Epstein & Bloom, 2005). O fósforo é um elemento essencial na aquisição, estoque e utilização de energia pelas plantas porque influencia a fosforilação oxidativa no processo de fotossíntese (Epstein & Bloom, 2005). Segundo Juo & Franzluebbers (2003) o fósforo fica indisponível para as plantas em solos tropicais altamente lixiviados e na presença dos óxidos de ferro e alumínio, e uma maneira de disponibilizar este fósforo é pela adição de matéria orgânica. A disponibilidade de fósforo nos solos do tipo Oxissolo está mais relacionada a mineralização da matéria orgânica do que a disponibilização via sedimentos do solo (Lehmann *et al.*, 2001).

As concentrações de fósforo na camada orgânica do solo dos sistemas mostraram variações sazonais durante as fases de transição e na época chuvosa. Os SAFs mostraram maiores concentrações de fósforo do que a capoeira. Sistemas agroflorestais com espécies perenes têm maiores contribuições nos fluxos de fósforo no solo do que as plantas de ciclo anual (Lehmann *et al.*, 2001). Segundo Feldpausch *et al.* (2004) a vegetação da capoeira imobiliza o fósforo do solo com maior eficiência do que a mineralização, o que causa um “déficit” de fósforo no solo das capoeiras. Na camada mineral do solo (de 20 – 30cm de profundidade) as concentrações de fósforo não variaram nem entre os SAFs e a capoeira e nem entre as fases sazonais.

Estudos com as concentrações de fósforo nos mesmos SAFs analisados no presente estudo, mostraram que as espécies *Bertholletia excelsa* (castanha-do-Pará), presente no SAF baseado em fruteiras e *Bactris gasipaes* (pupunha), presente no SAF baseado em

palmeiras, têm concentrações de fósforo no solo próximo as plantas seis vezes maiores do que as outras espécies dos SAFs e da capoeira (Pereira *et al.*, 2005). Essas espécies podem ter influenciado as maiores concentrações de fósforo no solo dos SAFs no presente estudo.

O carbono é o principal elemento formador das estruturas biológicas. A maior fonte de carbono para as plantas está na atmosfera na forma de gás carbônico (CO₂) (Aber & Melillo, 1991; Juo & Franzluebbbers, 2003). O CO₂ é absorvido pelas plantas no processo de fotossíntese e é incorporado na biomassa das plantas. O carbono pode ficar estocado por muito tempo nos tecidos vegetais até ser depositado no solo, através da queda da liteira (fina ou grossa) e/ou das secreções das raízes das plantas. No solo o carbono orgânico proveniente das plantas é a principal fonte de energia para os organismos decompositores.

As porcentagens de carbono total do solo não variaram estatisticamente nem entre os SAFs e a capoeira e nem entre as fases sazonais. As porcentagens de carbono total do solo nos SAFs e na capoeira foram maiores na camada orgânica do que na camada mineral do solo. Nos SAFs e na capoeira as porcentagens de carbono total na camada orgânica do solo foram cerca de duas vezes maiores do que na camada mineral. Na camada orgânica do solo a matéria orgânica não decomposta fica acumulada. Estudos de recuperação de ambientes degradados com a maximização do estoque de carbono no solo são importantes porque no solo o carbono fica menos sensível a perturbações (Feldpausch *et al.*, 2004). Em capoeiras próximas a área do presente estudo o carbono e o nitrogênio estão estocados preferencialmente no solo, enquanto o fósforo, o potássio, o magnésio e o cálcio estão estocados na biomassa vegetal (Feldpausch *et al.*, 2004).

As porcentagens de nitrogênio foram maiores na camada orgânica do solo nos SAFs e na capoeira do que na camada mineral. Nos SAFs e na capoeira as porcentagens de nitrogênio total na camada orgânica do solo foram cerca de duas vezes maiores do que as

da camada mineral. A maior fonte de nitrogênio está na atmosfera na forma de N_2 , mas nesta forma o nitrogênio não pode ser absorvido pela maioria dos seres vivos, apenas algumas bactérias fixadoras de nitrogênio conseguem absorvê-lo e disponibilizá-lo para o ecossistema (Aber & Melillo, 1991; Juo & Franzluebbbers, 2003). No solo, a maioria dos seres vivos se encontram nos primeiros centímetros de profundidade e por isso as porcentagens de nitrogênio do solo foram maiores na camada orgânica do solo do que na camada mineral. Entre os SAFs, a capoeira e as fases sazonais não houveram diferenças nas porcentagens de nitrogênio no solo.

Os valores da relação C:N nas camadas orgânica e mineral do solo nos SAFs e na capoeira não mostraram diferenças significativas, nem mesmo entre as fases sazonais. Os valores da relação C:N do solo neste estudo variaram entre 14 e 16. Segundo Juo & Franzluebbbers (2003) ecossistemas com valores de relação C:N do solo maiores que 10 são mais resistentes a mineralização e conseqüentemente a disponibilização de nitrogênio e outros nutrientes essenciais para o solo é lenta.

As concentrações dos micronutrientes ferro, manganês e zinco não mostraram variações entre as camadas orgânica e mineral do solo nos SAFs e na capoeira. Entre as fases sazonais, apenas as concentrações de zinco na camada mineral do solo foram maiores nos SAFs baseados em pastagens e em palmeiras do que no SAF baseado em fruteiras. Esta deficiência de zinco no SAF baseado em fruteiras pode estar relacionada aos valores de pH deste sistema, os quais foram tão baixos quanto na capoeira. No SAF baseado em pastagens a concentração de zinco foi maior do que o valor considerado tóxico para os solos tropicais (20 mg kg^{-1}) (Epstein & Blomm, 2005).

Colonização por Micorrizas Arbusculares

Neste estudo, as taxas de colonização total de micorrizas na camada orgânica do solo foram similares ao observado em “La Gran Sabana” no sudoeste da Venezuela (Cuenca *et al.*, 1998), no Parque Estadual de Campos do Jordão (SP) (Moreira-Souza *et al.*, 2003), na mata Atlântica de Londrina (PR) (Zangaro *et al.*, 2000) e na China tropical (Muthukumar *et al.*, 2003). Estudos realizados na floresta tropical de “Los Tuxtlas”, no México (Núñez-Castillo & Álvaro-Sánchez, 2003) mostraram taxas de colonização micorrízica maiores do que os encontrados no presente estudo.

No geral, entre as camadas orgânica (de 0 – 10cm) e mineral (de 20 – 30cm) do perfil solo, apenas as taxas de hifas de micorrizas nas raízes do SAF baseado em fruteiras foram maiores na camada orgânica do solo do que na mineral. Na camada orgânica do solo a atividade microbiana é maior pela entrada de substrato de melhor qualidade (liteira) e pela maior umidade do solo. No entanto, as taxas de colonização total de micorrizas, de arbúsculos e de vesículas não variaram entre as camadas orgânica e mineral do solo.

Estudando as taxas de colonização de micorrizas nas plantas dos mesmos SAFs utilizados no presente estudo, Gallardo-Ordinola (2004) não observou variação significativa nas taxas de micorrizas nas raízes entre as camadas orgânica e mineral do solo.

O presente estudo mostrou que nas raízes da camada orgânica do solo as taxas de colonização total, de hifas e de vesículas foram maiores no SAF baseado em pastagens. A capoeira, apesar de ter a maior biomassa total de raízes (Gallardo-Ordinola, 2004), mostrou as menores taxas de colonização micorrízica nas raízes da camada orgânica do solo.

As maiores taxas de colonização de micorrizas no solo orgânico do SAF baseado em pastagens podem estar relacionadas aos menores estoques de liteira sobre o solo deste

sistemas (Capítulo 3), disponibilizando poucos nutrientes no solo e influenciando o crescimento das micorrizas (Allen, 1991; Cornelissen *et al.*, 2001; Cardoso *et al.*, 2003).

A presença da leguminosa *Desmodium ovalifolium* e da gramínea *Brachiaria brizantha* no SAF baseado em pastagens também pode ter influenciado as maiores taxas de colonização micorrízica neste sistema, porque as culturas de gramíneas e leguminosas favorecem as taxas de colonização de micorrizas arbusculares (Munyanziza *et al.*, 1997) e a espécie *Desmodium ovalifolium* mostrou as maiores taxas de colonização micorrízica entre as espécies dos SAFs e da capoeira (Gallardo-Ordinola, 2004). Além disso, estudos em ambientes semiáridos do México (Camargo-Ricalde & Dhillion, 2003) mostraram que as plantas da família Leguminosae (*Mimosa*) funcionam como “ilhas de recursos” para os esporos de micorrizas arbusculares, explicando a maior densidade de esporos próximo a essas plantas.

Entre os SAFs, as taxas de micorrizas foram maiores no SAF baseado em pastagens, o qual mostrou as menores concentrações de fósforo no solo. Cuenca *et al.* (1998) mostraram que as taxas de colonização de micorrizas foram influenciadas pelas concentrações de fósforo no solo. O experimento consistiu no cultivo de *Brachiaria decumbens* em cinco diferentes tratamentos de solo, a saber, solo estéril; solo sem aplicação de micorrizas; com aplicação de micorrizas; com fertilizantes fosfatados e solo com fertilizantes fosfatados mais aplicação de micorrizas. Os tratamentos que mostraram as menores taxas de colonização micorrízica foram o solo estéril (2%), sem aplicação de micorrizas (3,1%) e com fertilizantes fosfatados (2%). Os tratamentos com fertilizantes fosfatados e aplicação de micorrizas mostraram valores intermediários (19,2%) e os tratamentos com aplicação de micorrizas mostraram as maiores taxas de colonização de micorrizas (33,4%). Os tratamentos com fertilizantes fosfatados mais aplicação de

micorrizas mostraram as maiores biomassas de *Brachiaria decumbens* e taxas de colonização micorrízica intermediárias, demonstrando que em solos com maiores concentrações de fósforo as micorrizas estão menos ativas. Também foi observado que as micorrizas podem ser utilizadas para a recuperação de áreas degradadas, porque as plantas pioneiras geralmente são pouco micorrizadas (Cuenca *et al.*, 1998), como é o caso da *Vismia* sp. (Gallardo-Ordinola, 2004).

As menores taxas de colonização micorrízica nas raízes da camada orgânica do solo da capoeira podem estar relacionadas as maiores taxas de polifenóis na liteira da capoeira (Capítulo 3). Estudos em casa de vegetação mostraram que apenas as micorrizas das plantas da família Ericacea têm habilidade para degradar compostos tanínicos (polifenóis) (Bending & Read, 1996). Adicionalmente, no presente estudo o solo da capoeira mostrou as maiores porcentagens de umidade. Stevens & Peterson (1996) estudaram a colonização micorrízica em *Lythrum salicaria*, herbácea perene comum do norte dos EUA. Eles realizaram os estudos em áreas de platô, declive e baixio e concluíram que a colonização micorrízica foi inversamente proporcional a capacidade de reter água de cada ambiente ou a alguma outra variável ambiental relacionada com a umidade do solo.

Em estudos com espécies pioneiras iniciais e tardias e espécies de clímax da mata Atlântica de Londrina, Paraná, foi observado que no campo as espécies pioneiras iniciais têm maiores taxas de colonização micorrízica (55%) do que as pioneiras tardias (12%) e as de clímax (14%) (Zangaro *et al.*, 2000). Segundo os autores isso pode ser atribuído as concentrações de nutrientes nos solos e a luminosidade. Na floresta, o solo é fértil e o ambiente é sombreado, contribuindo para um lento crescimento das plantas de clímax, ocasionando uma lenta produção de carboidratos e uma menor taxa de colonização micorrízica. Por outro lado, em ambientes degradados, com solos pobres em nutrientes e

muito iluminados, as espécies pioneiras iniciais cresceram rápido e produziram grandes concentrações de carboidratos, os quais atraíram uma quantidade grande de fungos micorrízicos que se associaram as raízes das plantas. Os autores também observaram diferenças nas taxas de colonização micorrízica nas raízes das plantas em casa de vegetação e no campo (Zangaro *et al.*, 2000). Segundo Staddon *et al.* (2002) ocorrem muitas contradições entre estudos de colonização por micorrizas arbusculares em plantas isoladas (casa de vegetação) e no ambiente natural, pois a colonização micorrízica é muito dependente dos fatores ambientais.

No presente estudo os valores de pH foram sempre menores na capoeira, o que indica um ambiente mais ácido e menos fértil do que os SAFs. Em solos com pH muito ácido o crescimento das micorrizas pode ser inibido (Allen, 1991), como o observado na capoeira.

Estudos em casa de vegetação para avaliar a tolerância das plantas micorrizadas a acidez e a salinidade do solo sobre o amendoim (*Arachis hypogaea*) mostraram que as plantas que não receberam inóculos de micorrizas arbusculares não toleraram o estresse salino e ácido, mas as plantas que receberam aplicação micorrízica tornaram-se tolerantes aos sais e a acidez até um dado limite. Em doses acima de 5% de NaCl (solução salina) as plantas diminuíram suas taxas de crescimento (Gupta & Krishnamurthy, 1996). Segundo os autores as micorrizas arbusculares alteraram o potencial osmótico do tecido das raízes (Allen, 1991; Gupta & Krishnamurthy, 1996), proporcionando às plantas algum grau de resistência à acidez do solo.

Estudos em casa de vegetação para testar a influência do pH do solo sobre a gramínea *Panicum virgatum*, mostraram que a colonização micorrízica foi significativamente menor em solos com pH 4 do que em solos com pH 5 (Clark *et al.*,

1999). Isso pode estar relacionado com a solubilidade dos nutrientes no solo sobre diferentes níveis de pH (Clark *et al.*, 1999).

Neste estudo, na camada orgânica do solo, as taxas de colonização de micorrizas foram maiores no SAF baseado em pastagens. Embora as mudanças sazonais tenham influenciado as porcentagens de umidade e as concentrações de fósforo na camada orgânica do solo, as taxas de colonização micorrízica mantiveram valores similares nas quatro amostragens sazonais.

Na camada mineral do solo, porém houve variações sazonais nas taxas de micorrizas arbusculares nas raízes dos SAFs e da capoeira. Embora em todos os sistemas estudados a umidade do solo não tenha mostrado diferenças significativas entre as camadas orgânica e mineral do solo, na camada mineral a água pode ficar indisponível para a biota ao ser retida nos microporos das partículas de solo (Luizão *et al.*, 1992b) e, também, porque há menos macroporos armazenadores de água na camada mineral do solo (Cortés-Tarrá, 2003). Em estudos com os macroporos no solo dos SAFs foi observado que as espécies do SAF baseado em palmeiras são mais eficientes na manutenção dos macroporos do solo do que as espécies dos outros SAFs e da capoeira (Cortés-Tarrá, 2003).

Um outro estudo em sistemas agroflorestais do sudeste do Brasil mostrou maiores densidades de esporos de micorrizas arbusculares na camada mineral do solo (de 20 – 30cm de profundidade), quando comparados com monoculturas tradicionais do café (*Coffea arabica*) (Cardoso *et al.*, 2003). Segundo os autores, os sistemas agroflorestais possuíam árvores com raízes profundas que criavam novos ambientes para a colonização micorrízica e, por isso beneficiavam a ciclagem do fósforo em camadas profundas do solo (Cardoso *et al.*, 2003). No presente estudo os SAFs baseados em palmeiras e em fruteiras também

possuíam raízes profundas (Gallardo-Ordinola, 2004), mas as maiores taxas de micorrizas foram observadas no SAF baseado em pastagens.

Com relação as diferentes estruturas das micorrizas, na época chuvosa o SAF baseado em palmeiras mostrou as maiores taxas de formação de hifas de micorrizas nas raízes da camada mineral. O SAF baseado em pastagens mostrou as maiores taxas de formação de vesículas. As taxas de formação de arbúsculos não variaram na época chuvosa. Na fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca o SAF baseado em pastagens mostrou as maiores taxas de hifas e arbúsculos de micorrizas. As taxas de vesículas não variaram na fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca. Na época seca o SAF baseado em pastagens mostrou as maiores taxas de arbúsculos. As taxas de hifas e vesículas de micorrizas não variaram na época seca. Na fase sazonal de transição entre as épocas seca e chuvosa não houve variações nas taxas das estruturas das micorrizas arbusculares entre os SAFs e a capoeira.

Estudos realizados com a palmeira *Astrocaryum mexicanum* na floresta tropical de “Los Tuxtlas”, no México, mostraram que as taxas de colonização micorrízica total (hifas, arbúsculos e vesículas) foram maiores nas clareiras (80%) do que na floresta fechada (69%) e as maiores taxas foram observadas durante a época chuvosa (Núñez-Castillo & Álvaro-Sánchez, 2003). Entre as estruturas das micorrizas, as taxas de colonização de hifas foram maiores nas clareiras (50%) do que na floresta fechada (40%) e as maiores taxas foram observadas durante a época seca. As taxas de arbúsculos foram maiores na floresta fechada (30%) do que na clareira (20%) durante a época chuvosa. As taxas de vesículas foram maiores nas clareiras (12%) do que na floresta fechada (7%) durante a época chuvosa (Núñez-Castillo & Álvaro-Sánchez, 2003). Segundo os autores a competição por recursos foi responsável por estes resultados, porque na floresta fechada há menos penetração de luz

e, por isso, menos nutrientes, o que pareceu favorecer o crescimento de arbúsculos de micorrizas. Por outro lado, as clareiras, onde há maior luminosidade e as raízes das plantas crescem mais e produzem mais carboidratos, parecem favorecer o crescimento de vesículas de micorrizas (Núñez-Castillo & Álvaro-Sánchez, 2003). No presente estudo as maiores taxas de arbúsculos foram observadas na camada mineral do solo no SAF baseado em pastagens e as taxas de vesículas foram maiores nos SAFs do que na capoeira.

Sigüenza *et al.* (1996) mostraram que as taxas de colonização micorrízica em espécies de dunas da costa marítima do México foram menores em espécies pioneiras (1%) de dunas móveis (*Abronia maritima*) do que em espécies de dunas fixas (80%). Além disso os autores observaram um padrão sazonal nas taxas de colonização micorrízica nas espécies de dunas fixas. As taxas de colonização micorrízica foram relacionadas com a fenologia das plantas (Sigüenza *et al.*, 1996). As taxas de arbúsculos foram maiores na época chuvosa, período de crescimento vegetal e absorção de nutrientes, e as taxas de vesículas foram maiores na época seca (Sigüenza *et al.*, 1996). No presente estudo, entre as fases sazonais, as maiores taxas de vesículas foram observadas na época chuvosa e as maiores taxas de arbúsculos foram observadas na época seca e na fase de transição entre as épocas chuvosa e seca, tudo na camada mineral do solo do SAF baseado em pastagens.

Em contraste com o observado por outros autores (Sigüenza *et al.*, 1996; Núñez-Castillo & Álvaro-Sánchez, 2003), no presente estudo o SAF baseado em pastagens mostrou as menores taxas de hifas e vesículas de micorrizas arbusculares na fase sazonal de transição entre as épocas chuvosa e seca, período de maiores concentrações de fósforo no solo. As taxas de arbúsculos foram menores na época chuvosa, período de menores concentrações de fósforo no solo.

Na China tropical, estudos durante a época chuvosa em diversos ambientes, tais como florestas primária, secundária de 40 anos, pousio de 6 anos após o corte e queima e floresta sobre solos calcários, mostraram que as taxas de colonização micorrízica foram fortemente influenciadas pelo tipo de vegetação do ambiente. Na floresta primária e na floresta secundária de 40 anos, as taxas de colonização micorrízica foram de 30%, na área de pousio 20% e na floresta sobre solos calcários 10% (Muthukumar *et al.*, 2003).

O efeito da sazonalidade nas taxas de colonização micorrízica foi observado em estudos na Patagônia, em florestas de coníferas dominada por *Austrocedrus chilensis* (Fontenla *et al.*, 1998). Durante o verão quente e seco da Patagônia as taxas de colonização micorrízica foram de 98%. Durante o inverno frio e chuvoso, com 60-70% da precipitação anual, as taxas de colonização micorrízica foram de 85%.

No Canadá, estudos em tratamentos com areia e com argila onde foram plantados milho (*Zea mays*) e feno para gado (*Phleum pratense*), mostraram o efeito da sazonalidade na taxa de colonização micorrízica (Kabir *et al.*, 1997). Segundo os autores as taxas de colonização micorrízica foram maiores no mês de agosto (80%) e menores nos meses de junho (50%) e outubro (65%), isso tanto nos tratamentos com areia como nos com argila.

Em estudos em casa de vegetação com *Sorghum bicolor* (L) Liu *et al.* (2004) mostraram que as taxas de colonização micorrízica também podem ser influenciadas pela temperatura. A 10°C a colonização micorrízica foi apenas 17% do valor alcançado a 23 °C. Em baixas temperaturas o crescimento das raízes das plantas e das micorrizas foi inibido (Liu *et al.*, 2004).

No Parque Estadual de Campos do Jordão, São Paulo, Moreira-Souza *et al.* (2003) mostraram que as taxas de colonização micorrízica e as concentrações de nitrogênio e fósforo na liteira foram maiores na floresta nativa dominada por *Araucaria angustifolia* do

que em áreas adjacentes reflorestadas com *A. angustifolia* e *Pinus eliotti*. Em áreas nativas as taxas de colonização micorrízica variaram entre 7,2 e 48,3% e nas áreas reflorestadas as variações estiveram entre 4,4 e 15,8%. Segundo os autores este resultado pode ser efeito da sazonalidade, porque a taxa média de colonização micorrízica foi maior em fevereiro (época chuvosa) e menor em setembro (época seca).

Para realizar as associações micorrízicas com a diversidade e a distribuição das espécies arbóreas da floresta tropical do Panamá, Kiers *et al.* (2000) fizeram estudos, em casa de vegetação, com aplicação de micorrizas arbusculares. Eles constataram a forte dependência entre as espécies arbóreas e as micorrizas, pois 73% das plantas não colonizadas morreram enquanto apenas 3% das colonizadas morreram.

As micorrizas são biomonitores de qualidade ambiental (Silva *et al.*, 2001). Em estudos em áreas degradadas pela mineração na Bahia, Silva *et al.* (2001) mostraram que a diversidade de espécies de micorrizas foi menor em ambientes utilizados pela mineradora do que na caatinga nativa. Estes resultados foram influenciados pelas maiores concentrações de cobre e ferro e aos menores valores de pH do solo das áreas utilizadas pela mineradora. Segundo Munyanziza *et al.* (1997) as micorrizas arbusculares são sensíveis as diferentes formas de manejo dos solos.

As micorrizas arbusculares têm grande influência na absorção de fósforo e nitrogênio para as plantas e parecem exercer um pequeno papel na absorção de potássio (Marschner & Dell, 1994). Entre os micronutrientes as micorrizas parecem absorver o zinco e reter o manganês e o ferro, tornando as plantas mais tolerantes a toxidez causada pelo excesso de manganês e ferro (Marschner & Dell, 1994). No presente estudo não houve influência do potássio, ferro, manganês e zinco sobre as taxas de micorrizas arbusculares, mas foi observado que as concentrações de fósforo variaram na camada orgânica e não na

camada mineral do solo, enquanto as taxas de micorrizas variaram na camada mineral e as concentrações de zinco variaram na camada mineral, onde as taxas de micorrizas também variaram. Assim, parece que as micorrizas dos SAFs e da capoeira estudados são mais sensíveis as concentrações de zinco do que as de fósforo, no entanto não foi observada nenhuma relação estatística entre a colonização micorrízica e a disponibilidade de nutrientes no solo.

Comparando as taxas totais de colonização micorrízica do presente estudo com o valor econômico dos SAFs (Santos *et al.*, 2002) foi possível observar que o SAF baseado em pastagens, que tem o menor valor econômico é o sistema com as maiores taxas de colonização micorrízica. Por outro lado, o SAF baseado em fruteiras, que tem o maior valor econômico, tem taxas de colonização micorrízica intermediárias, o que significa dizer que este sistema pode aumentar seu valor econômico caso seja realizado um plano de manejo que aumente a disponibilização de nutrientes no solo, principalmente o fósforo, e diminua as taxas de colonização total de micorrizas arbusculares.

CONCLUSÕES

As maiores taxas de colonização micorrízica foram observadas no SAF baseado em pastagens, seguido pelos SAFs baseado em fruteiras, baseado em palmeiras e a capoeira.

A umidade do solo foi sempre maior na capoeira e entre os SAFs não houve variação.

Entre os nutrientes estudados, apenas a concentração de fósforo apresentou diferenças, sendo maior nos SAFs do que na capoeira.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A implantação de SAFs mostrou ter efeitos positivos na recuperação de ambientes abandonados e/ou degradados, contribuindo com a mitigação do efeito estufa, além de ser uma possibilidade econômica para o pequeno produtor da Amazônia.

No capítulo 3 foi observado que os SAFs têm liteira de melhor qualidade nutricional do que a capoeira. Isso tem um efeito positivo na conservação de nutrientes no ambiente. A massa de liteira acumulada sobre o solo da capoeira foi maior do que nos SAFs, mas a liteira da capoeira é pobre nos nutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio, magnésio e manganês, além de apresentar os maiores valores da relação C:N e da taxa de polifenóis. Devido a baixa qualidade nutricional da liteira da espécie *Vismia* sp., dominante na capoeira, ela poderia ser incluída em projetos de manejo agroflorestal, por favorecer a conservação de nutrientes.

No capítulo 4, a taxa de decomposição da liteira de cupuaçu não diferiu estatisticamente entre os sistemas estudados, mas a biomassa de raízes finas mostraram uma grande influência na absorção dos nutrientes necessários para o desenvolvimento das plantas, tais com o cálcio, o magnésio e o manganês. Assim, é importante incluir nas formulações dos SAFs espécies com muitas raízes superficiais, as quais formam uma densa camada superficial que retém boa parte do nutrientes antes deles serem lixiviados do sistema.

No capítulo 5 foi observado que a concentração de fósforo no solo foi cerca de três vezes maior nos SAFs do que na capoeira, demonstrando uma recuperação da fertilidade natural do solo dos SAFs. No entanto, a colonização por micorrizas arbusculares foi maior no SAF baseado em pastagens. Como as micorrizas arbusculares são abundantes em

ambientes de baixa fertilidade natural, é necessária uma maior adubação orgânica no SAF baseado em pastagens. A adubação orgânica libera os nutrientes lentamente para o solo, o que evita as perdas por lixiviação. Estudos sobre a influência das micorrizas na decomposição da matéria orgânica são importantes para ajudar a elucidar o processo de conservação de nutrientes em ambientes tropicais.

Entre os sistemas estudados, o SAF baseado em fruteiras mostrou a melhor performance na conservação dos nutrientes do que a capoeira e os SAFs baseados em palmeiras e em pastagens. Os SAFs baseados em palmeiras e em fruteiras produziram uma alta massa de raízes finas, mas as raízes finas do SAF baseado em fruteiras foram mais eficientes na absorção do cálcio, do magnésio e do manganês diretamente da liteira residual.

Planos de manejo que melhorem a disponibilização de nutrientes para o solo, principalmente o fósforo, manejem as taxas de colonização de micorrizas arbusculares e aumentem as taxas de polifenóis da liteira podem influenciar positivamente a rentabilidade econômica e ecológicas dos SAFs, além de contribuir com a diminuição do efeito estufa e dos desmatamentos da floresta Amazônica.

Formatados: Marcadores e numeração

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aber, J.D.; Melillo, J.M. 1980 Litter decomposition: measuring relative contributions of organic matter and nitrogen to forest soils. *Canadian Journal of Botany*, 58 (4): 416-421.
- Aber, J.D.; Melillo, J.M. 1991 *Terrestrial Ecosystems*. Saunders College Publishing. United States. 430p.
- Aerts, R.J.; Barry, T.N.; McNabb, W.C. 1999 Polyphenol and agriculture: beneficial effects of proanthocyanidins in forages. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 75: 1-12.
- Aikio, S; Ruotsalainen, A.L. 2002. The modelled growth of mycorrhizal and non-mycorrhizal plants under constant versus variable soil nutrient concentration. *Mycorrhiza*, 12: 257-261.
- Albrecht, A.; Kandji, S.T. 2003 Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. 99:15-27.
- Allen, M.F. 1991 *The ecology of mycorrhizae*. Cambridge Studies in Ecology. Cambridge (ed.). 184p.
- Anderson, J.M.; Ingran, J.S. 1993 *Tropical biology and fertility, a handbook of methods*. 2^a ed. Wallingford: Commonwealth Agricultural Bureau. 88-92.
- Art, H. 2001. *Dicionário de Ecologia e Ciências Ambientais*. 2^a edição. São Paulo. Editora da UNESP, 584p.
- Barros, E.; Neves, A.; Blanchart, E.; Fernandes, E.C.M.; Wandelli, E.; Lavelle, P. 2003 Development of the soil macrofauna community under silvopastoral and agrosilvicultural systems in Amazonia. *Pedobiologia*, 47: 273-280.

- Begon, M.; Harper, J.L.; Townsend, C.R. 1996. *Ecology*, 3rd ed. Blackwell Science, Oxford.
- Bending, G.D.; Read, D.J. 1996 Effects of the soluble polyphenol tannic acid on the activities of ericoid and ectomycorrhizal fungi. *Soil Biology and Biochemistry*, 28 (12): 1595-1602.
- Boulet, R. 2000 *Análise Estrutural da Cobertura Pedológica - Relatório Parcial*. Projeto PPD/PP-G7 n° 1158/99. “Avaliação do potencial de sustentabilidade de sistemas agroflorestais em pequenas propriedades agrícolas na Amazônia”. INPA, Manaus. 19p.
- Brundrett, M.C. 1999. *Introduction to mycorrhizas*. [WWW document]. URL <http://www.ffp.csiro.au/research/mycorrhiza>.
- Brundrett, M.C. 2002. Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New Phytologist*. 154: 275-304.
- Camargo-Ricalde, S.L.; Dhillon, S.S. 2003 Endemic *Mimosa* species can serve as mycorrhizal “resource islands” within semiarid communities of the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. *Mycorrhiza*, 13: 129-136.
- Caravaca, F; Barea, J.M.; Figueroa, D.; Roldán, A. 2002. Assessing the effectiveness of mycorrhizal inoculation and soil compost addition for enhancing reafforestation with *Olea europaea* subsp. *sylvestris* through changes in soil biological and physical parameters. *Applied Soil Ecology*. 20: 107-118.
- Cardoso, I.M, Boddington, C; Janssen, B.H.; Oenema, O.; Kuyper, T.W. 2003. Distribution of mycorrhizal fungal spores in soils under agroforestry and monocultural coffee systems in Brazil. *Agroforestry Systems*, 58: 33-43.
- Chauvel, A.; Lucas, Y.; Boulet, R. 1987 On the genesis of the soil mantle of the region of Manaus, Central Amazonia, Brasil. *Experientia*. 43: 234-240.

- Claassen, V.P.; Zasoski, R.J. 1992 A containerised staining system for mycorrhizal roots. *NewPhytol.* 121: 49-52.
- Clark, R.B.; Zobel, R.W.; Zeto, S.K. 1999 Effects of mycorrhizal fungus isolates on mineral acquisition by *Panicum virgatum* in acidic soil. *Mycorrhiza*, 9: 167-176.
- Coleman, D.C. 1985 Through a ped darkly: an ecological assessment of root-soil-microbial-faunal interactions. *Ecological Interactions in Soil: Plants, Microbes and Animals*. A.H. Fitter (ed.). Blackwell Scientific Publications. 1-21p.
- Cornelissen, J.H.C.; Aerts, R.; Cerabolini, B; Werger, M.J.A.; van der Heijden, M.G.A. 2001. Carbon cycling traits of plant species are linked with mycorrhizal strategy. *Oecologia*, 129: 611-619.
- Cortés-Tarrá, I.L. 2003 *Relações entre grupos funcionais da macrofauna e o volume dos macroporos do solo em sistemas agrossilviculturais da Amazônia Central*. Dissertação de Mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia – Universidade Federal do Amazonas (INPA/ UFAM), 80p.
- Cuenca, G.; De Andrade, Z.; Escalante, G. 1998 Arbuscular mycorrhizae in the rehabilitation of fragile degraded tropical lands. *Biol. Fertil. Soils.* 26: 107-111.
- Cuevas, E.; Medina, E. 1988 Nutrient dynamics within Amazonian forest. II – Fine root growth, nutrient availability and leaf litter decomposition. *Oecologia.* 76: 222-235.
- Dahlman, R.C.; Kucera, C.L. 1965 Root productivity and turnover in nature prairie. *Ecology*, 46: 84-89.
- Dresch, P.M. 2003 *Influência da Pueraria phaseoloides Sobre a Transformação Microbiana de Nitrogênio no Solo em Sistemas Agroflorestais do Projeto RECA em Nova Califórnia – RO*. Dissertação de mestrado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA – UFAM). 56p.

- Duponnois, R.; Plenchette, C.; Thioulouse, J.; Cadet, P. 2001. The mycorrhizal soil infectivity and arbuscular mycorrhizal fungal spore communities in soils of different aged fallows in Senegal. *Applied Soil Ecology* 17, 239-251.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 1997 *Manual de métodos de análise de solo*. 2^a ed. Rio de Janeiro, RJ. (EMBRAPA-CNPS. Documentos; 1). 212p.
- Epstein, E.; Bloom, A.J. 2005 *Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives*. 2nd edition. 400p.
- Ewel, J.; Berish, C. Brown, B.; Price, N.; Raich, J. 1981 Slash and burn impacts on a Costa Rican wet forest site. *Ecology*, 62 (3): 816-829.
- Fearnside, P.M. 2003 *A Floresta Amazônica nas Mudanças Globais*. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Manaus. 134p.
- Fearnside, P.M. 1998 Agro-silvicultura na política de desenvolvimento na Amazônia brasileira: a importância e os limites de seu uso em áreas degradadas. *Floresta Amazônica: Dinâmica, Regeneração e Manejo*. C. Gascon & P. Moutinho (eds.). Manaus-AM. 293-312p.
- Fearnside, P.M. 1995 Potential impacts of climatic change on natural forest and forestry in Brazilian Amazonia. *Forest Ecology and Management*. 78: 51-70.
- Feldpausch, T.R.; Rondon, M.R.; Fernandes, E.C.M.; Riha, S.J.; Wandelli, E. 2004 Carbon and nutrient accumulation in secondary forests regenerating on pastures in central Amazonia. *Ecological Applications*, 14(4): 164-176.
- Fisch, G; Marengo, J.A.; Nobrega, C.A. 1998 Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. *Acta Amazonica*, 28 (2): 101-126.

- Fitter, A.H.; Graves, J.D.; Watkins, N.K.; Robinson, D.; Scrimgeour, C. 1998. Carbon transfer between plants and its control in networks of arbuscular mycorrhizas. *Functional Ecology*. 12: 406-412.
- Fontenla, S.; Godoy, R.; Rosso, P.; Havrylenko, M. 1998. Root associations in *Austrocedrus* forests and seasonal dynamics of arbuscular mycorrhizas. *Mycorrhiza*. 8: 29-33.
- Gallardo-Ordinola, J. E. 2004 *Biomassa e dinâmica de raízes em sistemas agroflorestais implantados em áreas de pastagens abandonadas da Amazônia Central*. Tese de doutorado. INPA/UFAM. 117p.
- Garcia, C.; Hernandez, T.; Roldan, A.; Albaladejo, J.; Castillo, V. 2000. Organic amendment and mycorrhizal inoculation as a practice in afforestation of soils with *Pinus halepensis* Miller: effect on their microbial activity. *Soil Biology & Biochemistry*. 32: 1173-1181.
- Goulding, M. 1997 *História Natural dos Rios da Amazônia*. Brasília. Sociedade Civil Mamirauá. CNPq. Rainforest Alliance. 208p
- Gupta, R.; Krishnamurthy, K.V. 1996 Response of mycorrhizal and nonmycorrhizal *Arachis hypogaea* to NaCl and acid stress. *Mycorrhiza*,6: 145-149.
- Haselwandter, K.; Bowen, G.D. 1996. Mycorrhizal relations in trees for agroforestry and land rehabilitation. *Forest Ecology and Management*. 81: 1-17.
- Hector, A.; Beale, A.J.; Minns, A.; Otway, S.J.; Lawton, J.H. 2000 Consequences of the reduction of planta diversity for litter decomposition: effects through litter quality and microenvironment. *Oikos*, 90: 357-371.

- van der Heijden, M.G.A.; Klironomos, J.N.; Ursic, M.; Moutoglis, P.; Streitwolf-Engel, R.; Boller, T.; Wiemken, A.; Sanders, I.R. 1998. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature*, 396: 69-72.
- Herrera, R.; Merida, T., Stark, N.; Jordan, C. F. 1978 Direct phosphorus transfer from leaf litter to roots. *Naturwissenschaften*. 65: 208-209.
- Herrera, R. 1985 Nutrient cycling in Amazonian Forest. *Key Environments: Amazonia*. G.T. Prance & T.E. Lovejoy (Editors). Pergamon Press. 442p.
- INPE 2002 *Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite 2000-2001*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Janos, D.P. 1983 *Tropical mycorrhizas, nutrient cycles and plant growth*. Tropical Rain Forest Ecology and Management eds. S.L. Suttom, T.C. Whitmore and A.C. Chadwick, p. 327-345. Blackwell Scientific Publications, Oxford.
- Jarstfer, A.G.; Farmer-Koppenol, P.; Sylvia, D.M. 1998. Tissue magnesium and calcium affect arbuscular mycorrhiza development and fungal reproduction. *Mycorrhiza*, 7: 237-242.
- Jordan, C.F. & Herrera, R. 1981 Tropical rain forest: are nutrients really critical? *The American Naturalist*, 117 (2): 167-180.
- Jordan, C.F. 1985 *Nutrient Cycling in Tropical Forest Ecosystems: Principles and Their Application in Management and Conservation*. John Wiley & Sons Ltd. 190p.
- Juo, A.R.S.; Franzluebbers, K. 2003 *Tropical Soils: Properties and Management for Sustainable Agriculture*. Oxford University Press. 281p.
- Kabir, Z.; O'Halloran, I.P.; Fyles, J.W.; Hamel, C. Seasonal changes of arbuscular mycorrhizal fungi as affected by tillage practices and fertilization: Hyphal density and mycorrhizal root colonization. *Plant and Soil*, 192, 285-293.

- Kauffman, J.B.; Cummings, D.L.; Ward, D.E.; Babbitt, R. 1995 Fire in the Brazilian Amazon: 1-Biomass, nutrient pools, and losses in slashed primary forest. *Oecologia*, 104: 397-408.
- Kellman, M.; Tackaberry, R. 1997 *Tropical environments: The functioning and management of tropical ecosystems*. 380p.
- Kiers, E.T.; Lovelock, C.E.; Krueger, E.L.; Herre, E.A. 2000. Differential effects of tropical arbuscular mycorrhizal fungal inocula on root colonization and tree seedling growth: implications for tropical forest diversity. *Ecology Letter*. 3: 106-113.
- Kirschbaum, M.U.F.; Paul, K.I. 2002 Modelling C and N dynamics in forest soils with a modified version of CENTURY model. *Soil Biology & Biochemistry*. 34: 341-354.
- Laurance, W.F.; Albernaz, A.K.M; Schroth, G.; Fearnside, P.M.; Bergen, S; Venticinque, E.M.; Da Costa, C. 2002. Predictors of deforestation in the Brazilian Amazon. *Journal of Biogeography*. 29:737-748.
- Lavelle, P.; Chauvel, A.; Fragoso, C. 1995 Faunal activity in acid soils. *Plant Soil Interactions at Low pH*. R.A. Dale *et al.* (eds.). Kluwer Academic Publishers.
- Lehmann, J.; Cravo, M.S.; Macêdo, J.L.V.; Moreira, A.; Schroth, G. 2001 Phosphorus management for perennial crops in central Amazonian upland soils. *Plant and Soil*. 237: 309-319.
- Liu, A.; Wang, B; Hamel, C. 2004. Arbuscular mycorrhiza colonization and development at suboptimal root zone temperature. *Mycorrhiza*. 14: 93-101.
- Lodge, D.J.; McDowell, W.H.; McSwiney, C.P. 1994. The importance of nutrient pulses in tropical forests. *Trends in Ecology and Evolution*, 9 (10): 384-387.

- Lovelock, C.E.; Wright, S.F.; Clark, D.A.; Ruess, R.W. 2004. Soil stock of glomalin produced by arbuscular mycorrhizal fungi across tropical rain forest landscape. *Journal of Ecology*, 92: 278-287.
- Lowman, M.D. 1988 Litterfall and leaf decay in three Australian rainforest formations. *Journal of Ecology*, 76: 451-465.
- Luizão, R.C.C.; Bonde, T.A.; Rosswall, T. 1992a Seasonal variation of soil microbial biomass- the effects of clearfelling a tropical rainforest and establishment of pasture in the Central Amazon. *Soil Biology & Biochemistry*. 24 (8): 805-813.
- Luizão, F.J.; Luizão, R.C.C.; Chauvel, A. 1992b Premiers résultats sur la dynamique des biomasses racinaires et microbiennes dans un latsol d'Amazonie centrale (Brésil) sous forêt et sous pâturage. *Cah. Orstom, sér. Pedol.* 27(1): 69-79.
- Luizão, R.C.C. 1994 *Soil biological studies in contrasting types of vegetation in Central Amazonian Rain Forest*. PhD Thesis. Department of Biological and Molecular Sciences. Stirling, Scotland, UK. 204p.
- Luizão, F.J. 1995 *Ecological Studies in Contrasting Forest Types in Central Amazonia*. PhD Thesis. Department of Biological and Molecular Sciences. Stirling, Scotland, UK. 288p.
- Luizão, R.C.C.; Luizão, F.J.; Paiva, R.Q.; Monteiro, T.F., Soua, L.S.; Kruijt, B. 2004 Variation of carbon and nitrogen cycling processes along a topographic gradient in a central Amazonian forest. *Global Change Biology*, 10: 592-600.
- Luizão, F.J.; Schubart, H.O.R. 1987 Litter productions and decomposition in a terra-firme of central Amazonian. *Experientia*, 43:259-265.
- Mafongoya, P.L.; Giller, K.E.; Palm, C.A. 1998 Decomposition and nitrogen release patterns of tree prunings and litter. *Agroforestry Systems*, 38: 77-97.

- Magnusson, W.E.; Mourão, G. 2003 *Estatística sem Matemática: A ligação entre as questões e a análise*. Editora Planta. 126p.
- Malcová, R.; Gryndler, M.; Vosátka, M. 2002 Magnesium ions alleviate the negative effect of manganese on *Glomus claroideum* BEG23. *Mycorrhiza*, 12: 125-129.
- Marino, M. C., Furtado, J. S.; De-Vuono, Y. S. 1980 *Glossário de Termos Usuais em Ecologia*. ACIESP n° 24. Academia de Ciências do Estado de São Paulo.
- Marschner, H.; Dell, B. 1994. Nutrient uptake in mycorrhizal symbiosis. *Plant and Soil*, 159: 89-102.
- Martius, C.; Höfer, H.; Garcia, M.V.B.; Römbke, J.; Hanagarth, W. 2004 Litter fall, litter stocks and decomposition rates in rainforest and agroforestry sites in central Amazonia. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 68: 137-154.
- McCaffery, K.A. 2003 *Carbon and nutrients in land management strategies for the Brazilian Amazon*. Ph.D. Thesis. Cornell University. 204p.
- McGrath, D.A.; Comerford, N.B.; Duryea, M.L. 2000 Litter dynamics and monthly fluctuations in soil phosphorus availability in an Amazonian agroforest. *Forest Ecology and Management*, 131: 167-181.
- McKerrow, A. J. 1992 *Nutrient stocks in abandoned pastures of the Central Amazon Basin prior to and following cutting and burning*. MSc. thesis. North Carolina State University. Raleigh, USA. 116p.
- Melillo, J.M.; Aber, J.D.; Muratire, J.F. 1982 Nitrogen and lignin control of hardwood leaf litter decomposition dynamics. *Ecology*. 63 (3): 621-626.
- Menyailo, O.V.; Lehmann, J.; Cravo, M.S.; Zech, W. 2003 Soil microbial activities in tree-based cropping systems and natural forests of the Central Amazon, Brazil. *Biology and Fertility of Soils*, 38: 1-9.

- Moorhead, D.L.; Westerfield, M.M.; Zak, J.C. 1998 Plants retard litter decay in a nutrient-limited soil: a case of exploitative competition. *Oecologia*, 113: 530-536.
- Moreira, F.M.S; Siqueira, J.O. 2002. *Microbiologia e Bioquímica do Solo*. Lavras. UFLA editora. 626p.
- Moreira-Souza, M; Trufem, S.F.B.; Gomes-da-Costa, S; Cardoso, E.J.B.N. 2003. Arbuscular mycorrhizal fungi associated with *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. *Mycorrhiza*. 13: 211-215.
- Munyanziza, E.; Kehri, H.K.; Bagyaraj, D.J. 1997 Agricultural intensification, soil biodiversity and agro-ecosystem function in the tropics: The role of mycorrhiza in crops and trees. *Applied Soil Ecology*. 6(1): 77-85.
- Muthukumar, T.; Sha, L; Yang, X.; Cao, M.; Tang, J.; Zheng, Z. 2003. Mycorrhiza of plants in different vegetation types in tropical ecosystems of Xishuangbanna, southwest China. *Mycorrhiza*., 13: 289-297.
- Nair, P.K.R.; Buresh, R.J.; Mugendi, D.N.; Latt, C.R. 1999 *Nutrient cycling in tropical agroforestry systems: myths and science*. In: Agroforestry in sustainable agricultural systems. Nuck, L.E.; Lassoie, J.P. and Fernandes, E.C.M. (Editors). Lewis Publishers. 1-32p
- Newsham, K.K.; Fitter, A.H.; Watkinson, A.R. 1995. Arbuscular mycorrhiza protect an annual grass pathogenic fungi in the field. *Journal of Ecology*. 83:991-1000.
- Núñez-Castillo, O.; Álvarez-Sánchez, F.J. 2003 Arbuscular mycorrhizae of the palm *Astrocaryum mexicanum* in disturbed and undisturbed stands of a Mexican tropical forest. *Mycorrhiza*, 13: 271-276.
- Oades, J.M. 1978 Mucilages at the root surface. *Journal of Soil Science*, 29: 1-16
- Odum, E.P. 1969 The strategy of ecosystem development. *Science*. 164: 262-270.

- Olson, J.S. 1963 Energy storage and the balance of producer and decomposer in ecological systems. *Ecology*, 44: 322-331.
- Parton, W.J.; Schimel, D.S.; Cole, C.V.; Ojima, D.S. 1987 Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands. *Soil Science Society American Journal*. 51: 1173-1179.
- Paschke, M.W.; Valdecantos, A.; Redente, E.F. 2005 Manganese toxicity thresholds for restoration grass species. *Environmental pollution*, 135: 313-322.
- Paul, E.A.; Clark, F.E. 1996 *Soil Microbiology and Biochemistry*. Eds. E.A. Paul and F.E. Clark 2^a edição. Academic Press. 340p.
- Paustian, K.; Six, J.; Elliot, E.T.; Hunt, H.W. 2000 Management options for reducing CO₂ emissions from agriculture soils. *Biogeochemistry*. 48:147-163.
- Pel, A.N. 1998 Animals and agroforestry in the tropics. *Agroforestry in Sustainable Agricultural Systems*. L.E. Buck, J.P. Lassoie, E.C.M. Fernandes (editors). Advances in agroecology. CRC Press LLC. 416p.
- Peña-Carlos, M.; Boot, R.G.A.; Dorado-Lora, J.; Zonta, A. 2002 Enrichment planting of *Bertholletia excelsa* in secondary forest in the Bolivian Amazon: effect of cutting line width on survival, growth and crown traits. *Forest Ecology and Management*, 161: 159-168.
- Pereira, C.N.; Fernandes, E.C.M.; Lehmann, J.; Rondon, M.; Luizao, F.J. 2005 Agroforestry trees increase Phosphorus availability in an Oxisol of the Brazilian humid tropics. *Acta Amazonica*. Submetido.
- Peréz-Harguindeguy, N.; Díaz, 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 and Soil*, 218: 21-30.
- Phillips, J.M.; Hayman, D.S. 1970 Improvement procedures for cleaning roots and standing parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Trans. Br. Mycol. Soc.*, 55: 157-161.
- Primack, R.B; Rodrigues, E. 2001 *Biologia da Conservação*. Primack & Rodrigues (Ed.). Londrina-PR. 328p.
- Proctor, J. 1983 Mineral nutrients in tropical forest. *Advances in Applied Geography*, 7: 422-431.
- Ranzani, G. 1980 Identificação e caracterização de alguns solos da Estação Experimental de Silvicultura Tropical do INPA. *Acta Amazonica*. 10 (1): 7-41.
- Redecker, D.; Kodner, R.; Graham, L.E. 2000. Glomalean fungi from the Ordovician. *Science*. 289: 1920-1921.
- Ribeiro, M.N.G.; Adis, J. 1984 Local rainfall variability – A potencial bias for bioecological studies in the Central Amazon. *Acta Amazonica*. 14 (1/ 2): 159-174.
- Rilling, M.C.; Wright, S.F.; Nichols, K.A.; Schmidt, W.; Torn, M.S. 2001. Large contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to soil carbon pools in tropical forest soils. *Plant and Soil*, 233: 167-177.
- Rilling, M.C. 2004. Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes. *Ecology Letters*, 7: 740-754.
- Rothe, A.; Binkley, D. 2001 Nutricional interactions in mixed species forest: a synthesis. *Canadian Journal of Forest Research*, 31: 1855-1870.

- Salomão, R.P.; Nesptad, D.C.; Vieira, I.C.G. 1998 *Biomassa e estoque de carbono de florestas primárias e secundárias*. Floresta Amazônica: Dinâmica, Regeneração e Manejo. C. Gascon & P. Moutinho (Editores). Manaus. 373p.
- Santos, M.J.C. 2000 *Avaliação econômica de quatro modelos agroflorestais em áreas degradadas por pastagens na Amazônia ocidental*. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo. Piracicaba - SP, 75p.
- Schroth, G.; Elias, M.E.A.; Uguen, K.; Seixas, R.; Zech, W. 2001 Nutrient fluxes in rainfall, throughfall and stemflow in tree-based land use systems and spontaneous tree vegetation of central Amazonia. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 87: 37-49.
- Schubart, H.O.R.; Franken, W.; Luizão, F.J. 1984 Uma floresta sobre solos pobres. *Ciência Hoje*. 2: 26-32.
- Schwendener, C.M.; Lehmann, J.; Camargo, P.B.; Luizão, R.C.C.; Fernandes, E.C.M. 2005 Nitrogen transfer between high- and low-quality leaves on a nutrient-poor Oxisol determined by ¹⁵N enrichment. *Soil Biology & Biochemistry*, 37: 787-794.
- Seneviratne, G. 2000 Litter quality and nitrogen release in tropical agriculture: a synthesis. *Biology and Fertility of the Soils*, 31: 60-64.
- Sieverding, E. 1991. Vesicular - Arbuscular Mycorrhiza Management in Tropical Agrosystems. Technische Zusammenarbeit (GTZ) Gmbtt.
- Sigüenza, C.; Espejel, I., Allen, E.B. 1996 Seasonality of mycorrhizae in coastal sand dunes of Baja California. *Mycorrhiza*, 6: 151-157.
- Silva, F.C. 1999 *Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes*. EMBRAPA – SOLOS. 370p.

- Silva, G.A.; Maia, L.C.; Silva, F.S.B.; Lima, P.C.F. 2001. Potencial de infectividade de fungos micorrízicos arbusculares oriundos de área de caatinga nativa e degradada por mineração, no Estado da Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Botânica*. 24(2): 135-143.
- Silva, G.C. 2000 *Efeito da qualidade do substrato na biomassa microbiana do solo de uma capoeira da Amazônia Central*. Dissertação de mestrado. INPA, Manaus-AM. 55p.
- Silva, L.F. 1996 *Solos Tropicais: Aspectos pedológicos, ecológicos e de manejo*. Ed. Terra Brasilis, São Paulo.
- Singh, V.P.; Dwivedi, R.S. 1979 Microbial decomposition of leaf litter of *Terminalia* in a tropical forest biome: biochemical changes during decomposition. *Proc. Indian Natn. Sci. Acad.*, 45 (2): 154-162.
- Souza, S.G.A. 1995 *Dinâmica de plantas invasoras em sistemas agroflorestais implantados em pastagens degradadas na Amazônia Central*. Dissertação de Mestrado. São Paulo. 105p.
- Staddon, P.L.; Heinemeyer, A.; Fitter, A.H. 2002. Mycorrhizas and global environmental change: research at different scales. *Plant and Soil*, 244: 253-261.
- Stark, N.M.; Jordan, C.F. 1978 Nutrient retention by the root mat of an amazonian rain forest. *Ecology*, 59 (3): 434-437.
- Stevens, K., J.; Peterson, R. L. 1996. The effect of a water gradient on the vesicular-arbuscular mycorrhizal status of *Lythrum salicaria* L. (purple loosestrife). *Mycorrhiza*. 6: 99-104.
- St John, T.V. 1985. Mycorrhizas. *Amazonia*. (eds G.T. Prance & T.E. Lovejoy).p. 432-444. Pergamon Press, Oxford. 287-283.

- Swift, M.J.; Heal, O.W.; Anderson, J.M. 1979 *Decomposition in Terrestrial Ecosystems*. Studies in ecology – volume 5. D.J. Anderson, P. Greig-Smith and F.A. Pitelka (eds.). Blackwell Scientific Publications.
- Tapia-Coral, S.C. 2004 *Macro-invertebrados do Solo e Estoques de Carbono e Nutrientes em Diferentes Tipos de Vegetação de Terra Firme na Amazônia Peruana*. Tese de doutorado. Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA – UFAM). 135p.
- Tapia-Coral, S.C. 1998 *Macrofauna da liteira em sistemas agroflorestais implantados em áreas de pastagens abandonadas na Amazônia Central*. Dissertação de mestrado. INPA. Manaus-AM. 98p.
- Taylor, T.N; Osborn, J.M. 1996. The importance of fungi in shaping the paleoecosystem. *Review of Palaeobotany and Palynology*. 90: 249-262.
- Tyler, G. 2005 Changes in the concentrations of major, minor and rare-earth elements during leaf senescence and decomposition in *Fagus sylvatica* forerst. *Forest Ecology and Management*, 206: 167-177.
- Vanlauwe, B.; Diels, J.; Sanginga, N.; Merckx, R. 1997. Residue quality and decomposition: An unsteady relationship? *Driven By Nature: Plant litter quality and decomposition*. G. Cadish and K.E. Giller (eds).
- Visser, S. 1985 Role of the soil invertebrates in determining the composition of soil microbial communities. *Ecological Interactions in Soil: plants, microbes and animals*. A.H. Fitter (ed.). Blackwell Scientific Publications.
- Vitousek, P.M.; Farrington, H. 1997 Nutrient limitation and soil development: Experimental test of a biogeochemical theory. *Biogeochemistry*, 37: 63-75.

- Vitousek, P.M.; Tuner, D.R.; Parton, W.J.; Sanford, R.L. 1994 Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawaii: Patterns, mechanisms, and models. *Ecology*, 75: 418-429.
- Vohland, K.; Schroth, G. 1999 Distribution patterns of the litter macrofauna in agroforestry and monoculture plantations in central Amazonia as affected by plant species and management. *Applied Soil Ecology*, 13: 57-68.
- Wardle, D.A. 2002 *Communities and Ecosystems: Linking the Aboveground and Belowground Components*. Princeton University Press. 392p.
- Wardle, D.A.; Bonner, K.I.; Nicholson, K.S. 1997 Biodiversity and plant litter: experimental evidence which does not support the view that enhanced species richness improves ecosystem function. *Oikos*. 79: 247-258.
- Wardle, D.A.; Lavelle, P. 1997 Linkages between soil biota, plant litter quality and decomposition. *Driven by Nature: Plant litter quality and decomposition*. G. Cadish and K.E. Giller (eds.) 107-124p.
- Wardle, D.A. 1993 Changes in the microbial biomass and metabolic quotient during leaf litter succession in some New Zealand forest and scrubland ecosystems. *Functional Ecology*, 7 (3): 346-355.
- Yared, J.A.G. 1999 *Efeitos de sistemas silviculturais na florística e na estrutura de florestas secundária e primária, na Amazônia Oriental*. Tese de doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa – MG.
- Zangaro, W.; Bononi, V.L.R.; Trufen, S.B. 2000. Mycorrhizal dependency, inoculum potential and habitat preference of native woody species in South Brazil. *Journal of Tropical Ecology*. 16: 603-622.