



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI
EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS - PPGCA

RODRIGO DA SILVA MAIA

**COLONIZAÇÃO MICORRÍZICA E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO EM
SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA**

**BELÉM-PA
2020**

RODRIGO DA SILVA MAIA

**COLONIZAÇÃO MICORRÍZICA E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO EM
SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emilio Goeldi, como requisito para a obtenção do título de doutor em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Linha de pesquisa: Microbiologia do solo

Orientador: Dr. Steel Silva Vasconcelos

**BELÉM – PA
2020**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M217c Maia, Rodrigo da Silva
Colonização micorrízica e disponibilidade de fósforo no solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia / Rodrigo da Silva Maia. — 2020.
104 f.: il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Steel Silva Vasconcelos
Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2020.

1. Diversificação da palma de óleo. 2. Fracionamento de fósforo. 3. Micorrizas arbusculares. I. Título.

CDD 630.275

RODRIGO DA SILVA MAIA

**COLONIZAÇÃO MICORRÍZICA E DISPONIBILIDADE DE FÓSFORO NO SOLO
EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS COM PALMA DE ÓLEO NA AMAZÔNIA.**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências, da Universidade Federal do Pará em parceria com a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária/Amazônia Oriental e Museu Paraense Emílio Goeldi, como requisito para a obtenção do título de Doutora em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

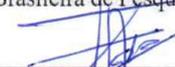
Linha de Pesquisa: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Socioambientais.

Data de aprovação: 20 / 01 / 2020

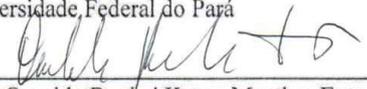
Banca Examinadora:



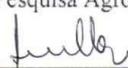
Prof. Steel Silva Vasconcelos - Orientador
Doutor em Recursos e Conservação Florestais
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária



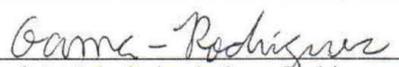
Prof. José Henrique Cattanio – Membro Interno
Doutor em Agronomia
Universidade Federal do Pará



Prof. Osvaldo Ryohei Kato - Membro Externo
Doutor em Agricultura Tropical
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária



Prof. Andrea Hentz de Mello – Membro Externo
Doutora em Agronomia
Universidade Federal do Sul e Sudeste do Pará



Prof. Antônio Carlos da Gama-Rodrigues - Membro Externo
Doutor em Agronomia
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus pela força e oportunidade de alcançar esse grande sonho na minha carreira profissional.

À minha mãe Ana Maia que foi minha maior incentivadora nos estudos, ao meu pai Edson Afonso “*in memoriam*” e meus irmãos Rafael e Roberta pelo amor, carinho e incentivo nas horas difíceis.

À minha esposa Larissa Maia e minha filha Anna Letícia por todo o amor e compreensão durante esses anos.

Ao meu orientador Dr. Steel Silva Vasconcelos pela parceria e valiosos ensinamentos desde os tempos do mestrado até a conclusão de mais essa importantíssima etapa na minha vida profissional.

À equipe de profissionais do Laboratório de Análises de Sistemas Sustentável (LASS) da Embrapa Amazônia Oriental: Em especial a Neusa Ferreira e ao Ivanildo e Everson pelo apoio nas atividades de campo e laboratório. As estagiárias Daniela Batista e Talissa pela contribuição nas atividades de laboratório e a Rubia Carla Ribeiro pelas dicas e ensinamentos na área de fracionamento de fósforo.

A todos os amigos do curso de pós-graduação em Ciências Ambientais, em especial: Ronaldo Braga e Priscila Barros pela troca de experiências, amizade e contribuição no desenvolvimento da minha pesquisa.

Aos colegas de pesquisa da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE): Profa. Dra. Leonor Maia, Dra. Danielle Karla Alves, Dra. Iolanda Ramalho e em especial ao Dr. Fritz Oehl pela oportunidade e inestimável ensinamento na área de taxonomia de Glomeromycota.

A Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi e Embrapa Amazônia Oriental. Instituições que fizeram parte da minha vida acadêmica na pós-graduação.

Ao Programa de Ciências Ambientais (UFPA) e a todos os professores do curso pelo ensino e enriquecimento dos meus estudos, em especial: Dr. José Henrique Cattanio e Dr. Roberto Lisboa Cunha pelas valiosas contribuições na etapa de qualificação da tese.

Aos bibliotecários do Instituto de Geociências (UFPA), em especial, à Sra. Lúcia Imbiriba, por toda dedicação e agilidade no apoio à adequação da tese aos padrões da ABNT.

Aos parceiros, Natura Inovação e Tecnologia de Produtos LTDA, Cooperativa Mista de Tomé-Açú (CAMTA) e EMBRAPA- Amazônia Oriental, pelo Projeto “Dendê em Sistemas Agroflorestais”, que possibilitou a realização desse estudo.

A Agência Americana para o Desenvolvimento Internacional (United States Agency for International Development, USAID) responsável pelo apoio financeiro deste projeto e da pesquisa.

Muito obrigado!

RESUMO

O fósforo (P) é considerado o nutriente mais oneroso e limitante para a produção agrícola nos trópicos, devido às limitações das reservas fosfáticas e ao fenômeno de adsorção no qual o P fica retido no solo e indisponível a planta. Na região Amazônia a produção agrícola pode ser limitada em até 90% pela deficiência do P e nas últimas décadas a introdução de monocultivos nessa região, como o cultivo da palma de óleo (*Elaeis guineensis*) no estado do Pará, tem provocado alterações no uso do solo, afetando a disponibilidade de nutrientes e a dinâmica socioambiental. Nesse contexto, a inserção da palma de óleo a um modelo de manejo do solo alternativo e conservacionista como o Sistema Agroflorestal (SAF), pode ajudar a reduzir a dependência do P importado, garantir maior aproveitamento de P no solo através de fontes orgânicas e ampliar a absorção desse nutriente pela planta através da simbiose com Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMAs). No entanto existe pouca informação sobre a contribuição dos SAFs para a disponibilidade de P e para a colonização micorrízica em cultivos perenes como a palma de óleo nos agrossistemas tropicais, especialmente na Amazônia. O objetivo deste estudo foi avaliar as frações lábeis e moderadamente lábeis de P (orgânico e inorgânico) no solo e a colonização micorrízica arbuscular na palma de óleo plantada em sistemas agroflorestais biodiversos e monocultivos na Amazônia brasileira. As frações de P foram determinadas através do método sequencial de extração descrito por Hedley e a colonização micorrízica foi avaliada pelo método da ampliação das intersecções. A colonização micorrízica foi de modo geral 3,5 vezes maior na palma de óleo cultivada nos SAFs em relação ao monocultivo e os SAFs não diferiram do monocultivo no fornecimento de P lábil e apresentam maior pool de P moderadamente lábil no solo. Os resultados do estudo mostraram que a adoção de SAFs no cultivo de palma de óleo na Amazônia é uma prática promissora para aumentar a colonização micorrízica nessa espécie e representa um tipo de manejo vantajoso para o fornecimento de P disponível e para a manutenção de reservas de P no solo em relação ao monocultivo.

Palavras-chave: Diversificação da palma de óleo. Fracionamento de fósforo. Micorrizas arbusculares. Amazônia.

ABSTRACT

Phosphorus (P) is considered the most expensive and limiting nutrient for agricultural production in the tropics, due to the limitations of phosphate reserves and adsorption phenomenon. In the Amazon agricultural production may be limited by 90% due to P deficiency. In recent decades the introduction of monocultives, such as oil palm (*Elaeis guineensis*) in the state of Pará, has caused changes in land use, affecting nutrient availability and environmental dynamics. In this context, the insertion of oil palm into an alternative soil management model and conservationists such as the Agroforestry System (AS), can help reduce dependence on imported P, ensure greater use of P in the soil through organic sources and increase plant uptake through arbuscular mycorrhizae symbiosis. However, there is little information on the contribution of AS to P availability and mycorrhizal colonization in perennial crops like an oil palm in tropical agrosystems, especially in the Amazon. The aim of this study was to evaluate the labile and moderately P (organic and inorganic) fractions in soil and arbuscular mycorrhizal colonization in oil palm planted in biodiverse and monoculture agroforestry systems in the Brazilian Amazon. The P fractions were determined by sequential extraction method described by Hedley and mycorrhizal colonization was evaluated by intersection magnification method. Mycorrhizal colonization was generally 3.5 times higher in oil palm cultivated in Agroforestry in relation to monoculture and Agroforestry did not differ from monoculture in the supply of labile P and have a larger pool of moderately labile P in the soil. The results of the study showed that the adoption of Agroforestry Systems in oil palm cultivation in the Amazon is a promising practice to increase mycorrhizal colonization in this species and represents a type of advantageous management for the supply of available P and for the maintenance of P reserves compared to monoculture.

Key words: Oil palm diversification. Phosphorus fractionation. Arbuscular mycorrhizae. Amazonia.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1 INTRODUÇÃO GERAL

Figura 1- Principais processos e estruturas da colonização micorrízica na raiz da planta.....23

Figura 2- Dinâmica de P no solo no sistema solo-planta-microrganismos.32

Figura 3- Absorção de fósforo por via direta (sistema radicular) e por via simbiótica através dos FMAs. Círculos verdes simbolizam os transportadores de Pi localizados na epiderme e pelos radiculares e círculos azuis representam transportadores de Pi localizados na hifa.....34

Figura 4- Absorção e transferência de P e carboidratos nas raízes colonizadas. Onde: (1) representa absorção de P via hifa extracelular; (2) Efluxo de P pela membrana do arbúsculo; (3) Absorção de P pela membrana periarbuscular e (4) Sítios de absorção de glicose no fungo.....35

2 A COLONIZAÇÃO MICORRÍZICA NA PALMA DE ÓLEO É MAIOR QUANDO CULTIVADA EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS DO QUE NO MONOCULTIVO

Figura 5- Croqui representativo do local de coleta nos Sistemas Agroflorestais (A) e nos monocultivos (B). Os círculos em destaque indicam os locais de coleta das amostras na parcela, onde: (1) Base da planta (0,6 m) e entre plantas de palma de óleo (2,5 m) e (2) pilha de folha da poda.....44

Figura 6- Porcentagem de Colonização Micorrízica (PCM) nos tratamentos: Sistemas Agroflorestais e Monocultivos. (A) Tratamentos localizados na UD1. (B) Tratamentos localizados na UD2. (C) Tratamentos localizados na UD3. Dados são médias \pm desvio padrão, n=12. A c tem que somar o numero final + os pre-textuais que aqui são 10 e diferença significativa foi avaliada pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.....50

3 CULTIVO DE PALMA DE ÓLEO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS ORGÂNICOS AUMENTA O POOL DE P MODERADAMENTE LÁBIL NO SOLO EM RELAÇÃO AO MONOCULTIVO NA AMAZÔNIA

- Figura 7- Croqui representativo do local de coleta nos Sistemas Agroflorestais (A) e no monocultivo (B). Os círculos em destaque indicam os locais de coleta das amostras na parcela, onde: (1) Base da planta (0,6 m) e entre plantas de palma de óleo (2,5 m), (2) pilha de folha da poda e (3) entre as linhas de plantio e entre plantas dos SAFs.....68
- Figura 8- Efeito dos tratamentos nas frações lábeis de fósforo. Dados são médias, n=6. Letras indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.....70
- Figura 9- Efeito dos tratamentos nas frações moderadamente lábeis de fósforo. Dados são médias, n=6. Letras indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.....71
- Figura 10- Distribuição das frações totais (Pi e Po) lábeis e moderadamente lábeis entre os tratamentos. Dados são médias, n=12. Letras indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.....71
- Figura 11- Contribuição percentual das frações lábeis (P lábil) e moderadamente lábeis (P mod lábil), respectivamente nos tratamentos: Adubadeira (A e B), Biodiverso (C e D) e Monocultivo (E e F).....72

LISTA DE TABELAS

1 INTRODUÇÃO GERAL

Tabela 1- Principais características dos tipos de fungos micorrízicos.....22

Tabela 2- Principais funções das estruturas encontradas nos FMAs.....23

Tabela 3- Principais resultados encontrados sobre a colonização micorrízica de 3 espécies vegetais densamente presentes nos SAFs da área de estudo.....25

Tabela 4- Demanda de nutrientes para palma de óleo.....28

Tabela 5- Valores médios de entrada de nutrientes via sistema radicular na palma de óleo em relação a média de cultivos anuais.....29

2 A COLONIZAÇÃO MICORRÍZICA NA PALMA DE ÓLEO É MAIOR QUANDO CULTIVADA EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS DO QUE NO MONOCULTIVO

Tabela 6- Espécies vegetais consorciadas com palma de óleo em sistemas agrofloretais da área de estudo, no município de Tomé-Açu (PA).....45

Tabela 7- Características físico-químicas do solo nos tratamentos da área de estudo.....47

Tabela 8- Colonização micorrízica por local e época de amostragem nas Unidades Demonstrativas.....51

3 CULTIVO DE PALMA DE ÓLEO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS ORGÂNICOS AUMENTA O POOL DE P MODERADAMENTE LÁBIL NO SOLO EM RELAÇÃO AO MONOCULTIVO NA AMAZÔNIA

Tabela 9- Espécies vegetais consorciadas com palma de óleo nos Sistemas Agrofloretais da área de estudo, no município de Tomé-Açu (PA).....68

Tabela 10- Características físico-químicas do solo nos tratamentos da área de estudo.....69

Tabela 11- Distribuição das frações de fósforo de acordo com as zonas de manejo dos tratamentos estudados.....73

AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO VII	
ABSTRACT.....	VIII
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XI
CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL.....	13
1.1 Tópicos temáticos.....	16
1.1.1 Sistemas Agroflorestais e o cultivo de palma de óleo no Estado do Pará.....	16
1.1.2 Sistemas Agroflorestais com palma de óleo no Município de Tomé-Açú no Estado do Pará.....	18
1.1.3 Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMAs).....	20
1.1.4 Micorrizas Arbusculares em Sistemas Agroflorestais.....	24
1.1.5 Micorrizas Arbusculares em palma de óleo.....	25
1.1.6 Sistema de absorção de nutrientes na palma de óleo.....	27
1.1.7 Dinâmica do fósforo no solo.....	29
1.1.8 A importância dos FMAs na mobilização do P no solo.....	32
1.2 Objetivo geral.....	35
1.3 Objetivos específicos.....	35
1.4 Estrutura da Tese.....	36
CAPÍTULO 2 A COLONIZAÇÃO MICORRÍZICA NA PALMA DE ÓLEO É MAIOR QUANDO CULTIVADA EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS DO QUE NO MONOCULTIVO.....	38
Resumo	38
Abstract	39
2.1 Introdução.....	40
2.2 Material e métodos.....	42
2.2.1 Área de estudo.....	42
2.2.2 Descrição do experimento.....	44
2.2.3 Coleta do material de estudo.....	46

2.2.4 Avaliação da Colonização Micorrízica.....	46	
2.2.5 Análise estatística.....	48	
2.3 Resultados.....	49	
2.4 Discussão.....	51	
2.5 Conclusões.....	55	
Agradecimentos.....	55	
Referências.....	56	
CAPÍTULO 3 CULTIVO DE PALMA DE ÓLEO EM SISTEMAS		
AGROFLORESTAIS ORGÂNICOS AUMENTA O RESERVATÓRIO DE P		
MODERADAMENTE LÁBIL NO SOLO EM RELAÇÃO AO		
MONOCULTIVO NA AMAZÔNIA.....		60
Resumo	60	
Abstract	60	
3.1 Introdução.....	61	
3.2 Material e métodos.....	64	
3.2.1 Área do estudo.....	64	
3.2.2 Descrição do experimento.....	65	
3.2.3 Coleta do material de estudo.....	66	
3.2.4 Fracionamento sequencial de P.....	66	
3.2.5 Análise das propriedades físico-químicas do solo.....	67	
3.2.6 Análise estatística.....	67	
3.3 Resultados.....	69	
3.4 Discussão.....	74	
3.5 Conclusões.....	79	
Agradecimentos.....	79	
Referências.....	80	
CAPÍTULO 4 CONCLUSÃO GERAL.....		84
4.1 Resultados Chaves: Impactos e implicações.....	84	
4.2 Prioridades para pesquisas futuras.....	85	

4.3 Considerações Finais.....	85
REFERÊNCIAS.....	87
APÊNDICES A - P.....	100

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

O fósforo (P) é um elemento essencial à vida e, portanto, à segurança alimentar global (CHEN; GRAEDEL, 2016). O ciclo global do P não possui componente gasoso significativo, a exemplo do ciclo do nitrogênio e carbono (ROY, 2016). Os principais reservatórios de P na biosfera estão sob a forma de sedimentos oceânicos (não reciclável) e no ambiente terrestre estão presentes nas rochas, solo e interface solo-biota (SHEN et al., 2011). A principal fonte de P para os seres vivos são as rochas fosfáticas que não são renováveis, estima-se que essa fonte de P pode se esgotar nos próximos 80 anos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Por isso o solo e a interface solo-biota configuram um importante papel estratégico no fluxo e disponibilidade de P nos agroecossistemas (SCHNUG et al., 2016).

Devido às condições de intenso intemperismo nos solos tropicais, a maior parte do P encontra-se indisponível para a planta, isso ocorre por causa do fenômeno da adsorção que é o processo pelo qual o P fica retido na superfície das partículas do solo (BUNEMANN et al., 2011; SMIL, 2000). O Brasil apresenta um número limitado de minas de rochas fosfáticas, e por isso cerca de 60% dos fertilizantes fosfatados usados na agricultura são importados (WITHERS et al., 2018). Na região Amazônia a produção agrícola pode ser limitada em até 90% pela deficiência do P, no qual a baixa fertilidade natural dos solos e elevada capacidade de adsorção de P pela presença de óxidos de ferro e alumínio, gera baixa solubilidade e mobilidade desse elemento (MCGRATH et al., 2000; SANCHEZ et al., 1982).

A taxa de aumento no uso de fertilizantes fosfatados no Brasil nos últimos 20 anos foi de 5,5% por ano, sendo muito maior que a taxa média de expansão das terras cultivadas para o mesmo período que foi 2,6% por ano (WITHERS et al., 2018). Sabe-se que grande parte dos fertilizantes fosfatados aplicados no solo são perdidos via lixiviação ou ficam retidos no solo pelos processos de adsorção, tornando esse investimento dispendioso (SCHNUG et al., 2016). Por isso torna-se importante buscar estratégias que aproveitem melhor as formas, o fluxo e o

estoque de P na interface solo-planta-microrganismos, afim de não depender totalmente do uso de insumos químicos fosfatados.

Uma das estratégias da natureza para melhorar a relação do P no sistema solo-planta é a associação com Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMAs). A associação micorrízica é o resultado da relação simbiótica entre raízes de plantas e o fungo que tem como finalidade melhorar a capacidade da planta na absorção de água e nutrientes do solo (SMITH; READ, 2008). Neste processo de troca, os fungos obtêm sua energia através dos fotossintatos da planta hospedeira. Cerca de 80 a 90% de todas as plantas terrestres precisam das micorrizas para ajudar suas raízes a obter água e nutrientes do solo (CARDOSO et al., 2017).

Ao contrário das bactérias fixadoras de nitrogênio que captam e acrescentam nitrogênio atmosférico (N_2) aos agroecossistemas, os FMAs não acrescentam mais P no solo. Eles participam ativamente da ciclagem de P através da imobilização e mobilização (VARMA et al., 2017a). A imobilização é importante pois funciona como um estoque dinâmico e temporário de P na biomassa dos FMAs, que depois é disponibilizado no sistema solo-planta (HIJRI et al., 2018; SIDDIQUI et al., 2008). Esse mecanismo é importante pois a maior parte do P tende a ficar retido no solo através dos processos de adsorção, além disso o P tem uma baixa mobilidade no solo e as hifas assumem o papel principal na movimentação desse nutriente no solo dentro dos ecossistemas (CARDOSO; KUYPER, 2006).

Outra estratégia para melhorar a disponibilidade de P no solo, é o uso de plantas de cobertura, um tipo de manejo alternativo característico dos Sistemas Agroflorestais (SAFs), onde a adição da biomassa vegetal promovida por esses arranjos produtivos, contribuem diretamente para a disponibilização de P no solo, através dos processos de decomposição e mineralização do P presente na biomassa vegetal (QIAO, 2012; SILVA et al., 2011). Além disso, a decomposição da matéria orgânica também pode liberar ânions orgânicos, que

competem com o P pelos sítios de adsorção da fase sólida do solo, diminuindo, assim, a adsorção do P (GRIERSON et al., 2004).

As raízes mais extensas das árvores presentes nos SAFs em relação aos cultivos anuais, aumentam as chances de explorar maior volume de solo, resultando em captação aprimorada de P (DAMON et al., 2014; DIETER et al., 2010). A maior biomassa de raízes e diversidade de plantas presentes nos SAFs em relação aos cultivos convencionais, estimulam o crescimento de hifas extraradiculares dos FMAs o que potencializa a absorção de P no solo (CARVALHO et al., 2010; INGLEBY et al., 2007).

Mudanças no uso da terra afetam a disponibilidade de P no solo, sendo que a conversão de floresta em monocultivo, por exemplo, diminui a quantidade de fósforo e aumenta a proporção de formas não disponíveis (CHACON; DEZZEO, 2004), principalmente pela alteração da cobertura do solo que gera perda da biomassa vegetal, impacta negativamente a biota e provoca erosão acelerada, reduzindo grande parte da matéria orgânica (ZHENG et al., 2005), que é considerada uma fonte importante de substrato para a liberação de formas disponíveis de P no solo (GROPPO et al., 2015; PIMENTEL et al., 1995).

Na região Amazônica as monoculturas agrícolas têm causado frequente alteração na dinâmica socioambiental, como a destruição das florestas primárias e secundárias, concentração fundiária e ameaça a segurança alimentar (NAHUM; MALCHER, 2012). O estado do Pará é o maior produtor de palma de óleo (*Elaeis guineenses*) do Brasil, responsável por 88% da produção nacional (MAPA, 2018), sendo que em 2016 foram cultivadas no estado uma área de aproximadamente 207.253 ha e as projeções para 2020 serão de aproximadamente 330.000 ha, grande parte do cultivo de palma de óleo na região é destinado, principalmente, para a produção de biodiesel (MAPA, 2018).

No entanto, a expansão de extensas áreas de monocultivo de palma de óleo no nordeste paraense, tem provocado vários questionamentos sobre os impactos socioambientais

causados por esse modelo produtivo (NAHUM; SANTOS, 2013), como a ameaça a conservação da floresta, a biodiversidade e mudanças nas relações de trabalho no campo e no espaço agrário, afetando a segurança alimentar (HOMMA, 2016; VIJAY et al., 2016).

Visando a adoção de um modelo alternativo ao monocultivo para a produção de palma de óleo no nordeste paraense, foi implementado em julho de 2008 em três propriedades rurais no município de Tomé-Açu, um sistema de produção de palma de óleo, associado a SAFs com manejo orgânico e diferentes composições de espécies vegetais.

Apesar dos benefícios ambientais potenciais dos SAFs, existem poucos estudos sobre o impacto desse sistema nos recursos do solo amazônico, especialmente na colonização de fungos micorrízicos e disponibilidade de P no solo. O entendimento de que os SAFs como modelo produtivo alternativo ao monocultivo de palma de óleo, apresente um melhor aproveitamento de P a partir da análise da colonização micorrízica e da disponibilidade de P no solo, pode contribuir para a implementação de políticas públicas mais sustentáveis para o cultivo da palma de óleo na Amazônia.

Neste sentido, o presente estudo tem como objetivo avaliar os efeitos dos Sistemas Agroflorestais sobre a colonização micorrízica na palma de óleo e disponibilidade de fósforo no solo, comparando os resultados com cultivos convencionais (monocultivo de palma de óleo) sob condições edafoclimáticas semelhantes dos SAFs. A hipótese da pesquisa é de que os SAFs aumentam a colonização micorrízica na raiz da palma de óleo e contribuem de modo significativo para o fornecimento e manutenção das reservas de P no solo.

1.1 Tópicos temáticos

1.1.1 Sistemas Agroflorestais e o cultivo de palma de óleo no Estado do Pará

Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) podem ser definidos como sistemas dinâmicos e ecológicos de gestão de recursos naturais, integrando árvores com cultivos agrícolas e/ou animais. Desse modo, o SAF diversifica e sustenta a produção agrícola no campo obtendo

maiores benefícios sociais, econômicos e ambientais (ATANGANA et al., 2014). As interações entre plantas lenhosas e herbáceas em sistemas agroflorestais geralmente melhoram o microclima e a disponibilidade de nutrientes no solo (ROSENBERG et al., 1988), reduz a erosão, melhora a circulação da água no solo, aumenta a biodiversidade, promove corredores ecológicos e sequestro de carbono (JOSE, 2009).

A prática de SAFs na Amazônia não é nova e já era utilizada por povos indígenas, caboclos e ribeirinhos para fins de subsistência, porém os colonizadores europeus e japoneses perceberam sua importância muito tempo depois (HOMMA, 2006). Na região do nordeste paraense, essa prática foi iniciada com agricultores japoneses ou descendentes de japoneses no município de Tomé-Açú na década de 60 (HOMMA, 2006), que aperfeiçoaram essas técnicas de cultivo agrícola para diversificar a produção, permanecendo assim na área de cultivo e melhorando a qualidade do solo com espécies da família fabaceae, por exemplo, que aumentam a disponibilidade de nitrogênio no solo a partir da interação com bactérias fixadoras de nitrogênio (LOURENÇO; HOMMA, 2009). Os estudos promovidos por instituições como EMBRAPA, CEPLAC e INPA, iniciados desde os anos 80, já indicavam que os SAFs são mais sustentáveis comparados aos cultivos convencionais (monoculturas), cultivos tradicionais (agricultura de derrubada e queima) e pastagens convencionais (HOMMA, 2006; LOURENÇO; HOMMA, 2009).

Desde a década de 50 a implementação de monocultivos de palma de óleo, também chamado de dendê ou dendezeiro, vem mudando a configuração espacial, econômica e social nos municípios do nordeste paraense (NAHUM; SANTOS, 2016). A produção agrícola familiar, que antes se dedicava em plantar para sua subsistência, nos últimos anos alguns agricultores deixaram de cultivar seus produtos (pimenta, mandioca, feijão) para viver exclusivamente da cultura da palma de óleo, o que deixou a economia familiar dependente de

um único produto, afetando, portanto, as relações de trabalho no campo, o espaço agrário e a segurança alimentar (HOMMA, 2016; MAZOYER; ROUDART, 2010).

Para Monteiro et al. (2016) é importante que a expansão de palma de óleo seja acompanhada por programas de reflorestamento, bem como recuperação de áreas de reserva legal, áreas de preservação permanente e plantio de outros cultivos perenes para reduzir os riscos do monocultivo na agricultura familiar. De acordo com Homma (2016), a expansão da palma de óleo no estado do Pará, vem sofrendo críticas como: Exploração ilegal de mão de obra, trabalho penoso e desgastante, ameaça às áreas quilombolas e à biodiversidade local, uso de agroquímicos, dependência com relação à agroindústria.

Por isso é importante desenvolver outras formas de manejo que busquem o melhor aproveitamento do solo e do espaço agrário, com diversificação da produção e causando menos impacto à biodiversidade local.

1.1.2 Sistemas Agroflorestais com palma de óleo no Município de Tomé-Açu no Estado do Pará

A ideia de inserção da palma de óleo em SAFs tem como objetivo a diversificação da produção agrícola, uma vez que são plantados vários cultivos de alto valor no mercado como açaizeiro, cupuaçuzeiro, castanheira e paricá (KATO et al., 2009). Os agricultores familiares, principalmente os nipo-brasileiros, predominantes na região de Tomé-Açu, já notaram que a diversificação da produção em SAFs é mais rentável para eles do que a monocultura (KATO; TAKAMATSU, 2005), uma vez que os produtos agrícolas apresentam em determinadas épocas do ano flutuações de preços e de mercados. Com isso, a dependência de apenas um produto é um risco, pois ainda tem que lidar com as pragas que podem em algumas semanas devastar todas as plantas da mesma espécie (HOMMA, 2006).

Além da diversificação na produção, os SAFs reconhecidamente proporcionam diversos benefícios ambientais como a promoção de corredores ecológicos, aumento da

biodiversidade e sequestro de carbono (JOSE, 2009; ATANGANA et al., 2014). A palma de óleo consorciada ao SAF é uma experiência inédita no estado do Pará e foi implantada em poucos lugares do mundo. Experiências como essas estão sendo bastante discutidas na mesa redonda sobre sustentabilidade de palma de óleo (Roundtable on Sustainable Palm Oil), que é uma associação composta por representantes dos mais variados grupos (produtores de palma de óleo, comerciantes, investidores, ONGs ambientais e sociais) e tem um importante papel na certificação sustentável de produção de palma de óleo em vários países. Um dos critérios para receber a certificação sustentável é a adoção de um manejo do solo que conserve os recursos naturais e a biodiversidade (PHOSRI, 2010).

Em virtude da emergente discussão global no âmbito político-econômico e sócio-ambiental para uma produção mais sustentável de palma de óleo, a Embrapa Amazônia Oriental juntamente com a empresa Natura Inovações e Tecnologia de Produtos Ltda e a Cooperativa Agrícola Mista de Tomé-Açu (CAMTA), criaram em 2008 um projeto intitulado: “Projeto dendê: Sistemas Agroflorestais na agricultura familiar”, no município de Tomé-Açu, nordeste do estado do Pará. O projeto tem como objetivo geral avaliar o impacto de sistemas agroflorestais com palma de óleo sobre a ciclagem de carbono e nutrientes, a qualidade do solo, a polinização e a diversidade de fauna e flora em função da técnica de preparo da área e do arranjo de espécies agrícolas e florestais.

Esses estudos são comparados com outras áreas de referência como florestas secundárias e plantios convencionais de palma de óleo sob condições edafoclimáticas semelhantes (KATO et al., 2009). Os primeiros resultados mostraram que os SAFs integrados com palma de óleo possuem alta capacidade de armazenar carbono, favorecem o controle biológico de pragas e apresentam maiores diversidades de aves e abelhas quando comparada ao cultivo convencional (KATO et al., 2009).

1.1.3 Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMAs)

Os FMAs pertencem ao filo Glomeromycota, colonizam as raízes de quase todos os gêneros de plantas, de Gimnospermas a Angiospermas, além de alguns representantes das Briófitas e Pteridófitas (VARMA et al., 2017a). Aproximadamente 80% das espécies de plantas formam esse tipo de micorriza (SMITH; READ, 2008). Por serem simbioses obrigatórios, cosmopolitas e não apresentarem especificidade hospedeira (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

As micorrizas podem ser classificadas de acordo com o tipo de colonização, quando o fungo forma estruturas especializadas (arbúsculos ou hifas) no córtex da raiz e penetra a parede celular da planta essa colonização é do tipo endomicorrízica (fungos endomicorrizas), se o fungo cresce entre as células do córtex e não penetra a parede celular da planta, a colonização é do tipo ectomicorrízica (SMITH; READ, 2008), nesse caso os fungos são ectomicorrízicos. Caso o fungo apresente características de colonização do tipo endomicorrízica (colonização intracelular) e ectomicorrízica (colonização intercelular), ele é classificado como ectendomicorrízico.

São classificadas como endomicorrizas os fungos: Arbusculares, Ericóides e Orquidóides. Os fungos do tipo Arbutóides e Monotropóides são classificados como ectendomicorrizas (SMITH; READ, 2008). As micorrizas do tipo arbuscular são as mais comuns de serem estudadas nos mais diversos tipos de ecossistemas terrestres, já os outros tipos de micorrizas (Tabela 1) são mais restritas quanto à predominância e especificidade de hospedeiros (VARMA et al., 2017b; MOREIRA; SIQUEIRA, 2006).

A colonização micorrízica arbuscular ocorre nas células do córtex inter e intracelular (Figura 1), formando os arbúsculos, estruturas intra-radulares muito ramificadas onde ocorre a troca de metabólitos entre fungo e planta (Figura 1 e Tabela 2), característica desse tipo de fungo (SOUZA, 2015). Alguns grupos taxonômicos das micorrizas arbusculares também

formam outra estrutura peculiar, denominada vesícula (Figura 1 e Tabela 2), formada a partir da dilatação de hifas (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Durante a simbiose, a planta cede a energia necessária (fotossintatos) para o crescimento e reprodução do fungo. Em troca, os FMAs absorvem água e nutrientes, e depois disponibilizam para células do córtex das raízes das plantas colonizadas (micotrofismo), estabelecendo desse modo a relação simbiótica (SOUZA et al., 2008). A planta se beneficia particularmente pela disponibilização de nutrientes de baixa mobilidade no solo, como fósforo, cuja absorção é limitada pelas raízes (SMITH; READ, 2008).

No solo os FMAs favorecem a formação e a estabilidade de agregados, pois o micélio fúngico, juntamente com as raízes finas formam uma rede biológica que entrelaçam e mantêm juntas as partículas do solo, assim como as hifas produzem proteínas, denominadas glomalinas, que também atuam na agregação do solo (BERRUTI et al., 2016; VARMA et al., 2017b). Ao longo de décadas, os estudos realizados com FMAs em plantas já demonstraram diversos benefícios proporcionados para a planta e para o ecossistema como a ação “biofertilizadora” das micorrizas que resulta na maior absorção e utilização de nutrientes no solo, amenização de estresses nutricionais e acesso a nutrientes pouco disponíveis (BERRUTI et al., 2016; SIDDIQUI, 2008). A ação biocontroladora das micorrizas controla certos patógenos e pragas, reduz danos causados por pragas e doenças, ameniza estresses causados por fatores diversos como metais pesados e poluentes orgânicos, e possui efeitos benéficos na agregação do solo, melhorando a conservação da água e do solo (SIQUEIRA et al., 2002).

Por todos esses benefícios inúmeras pesquisas têm avaliado a inoculação de espécies de FMAs em mudas de plantas durante o plantio no campo e tem demonstrado que a inoculação de espécies selecionadas de FMAs favorece a sobrevivência e o desenvolvimento das plantas, tornando-se de grande importância para o sucesso de programas de restauração e reabilitação ambiental no Brasil (SIQUEIRA; SAGGIN JUNIOR, 1995; SIQUEIRA et al.,

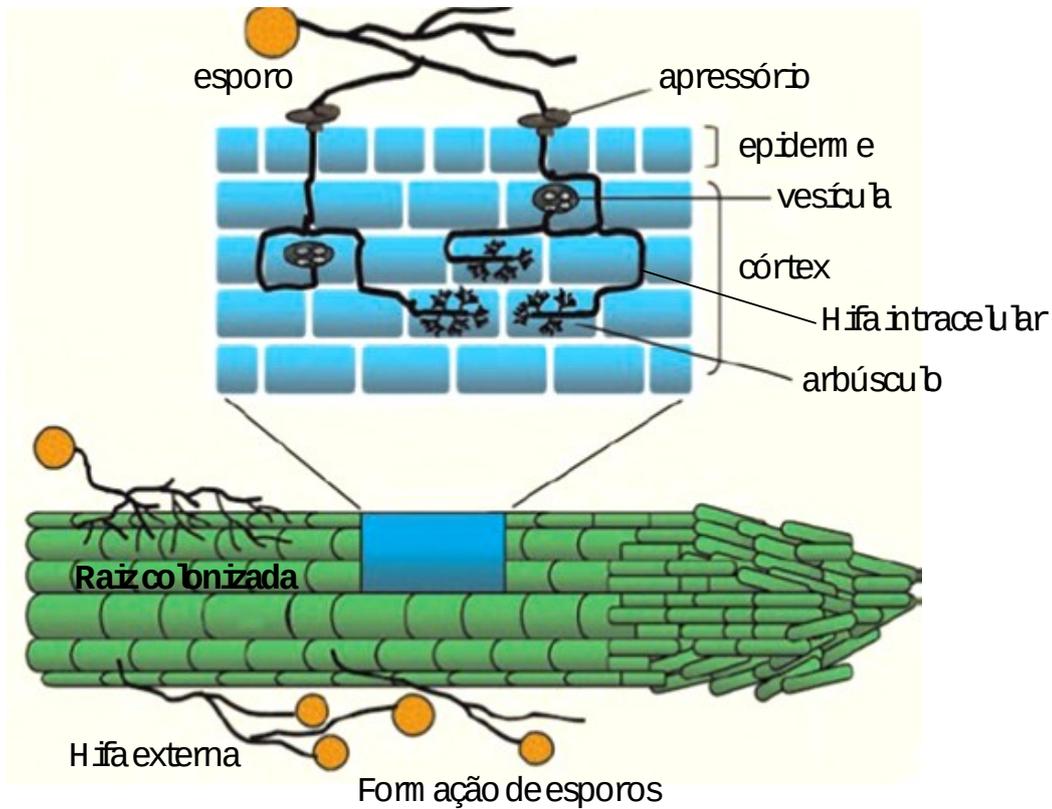
2010). Porém o sucesso da inoculação micorrízica depende das relações fungo-planta-solo, que devem ser previamente estudadas, uma vez que os FMAs atuam de modo diferente de acordo com a espécie de planta hospedeira e manejo do solo (CAVALCANTE et al., 2009; JANOS, 1996), ratificando a importância das pesquisas sobre FMAs em espécies de plantas situadas no campo.

Tabela 1- Principais características dos tipos de fungos micorrízicos.

Características Gerais	Tipos de Micorrizas						
	Arbuscular	Ectomicorriza	Ectendomicorriza	Arbutóide	Monotropóide	Ericóide	Orquidóide
Principais aspectos do fungo	Pertencem ao filo Glomeromycota, são simbioses obrigatórios intracelulares, assexuados, apresentam arbúsculos (estruturas efêmeras), vesículas (estruturas globosas) e podem esporular no interior das raízes. Alguns autores apontam que aproximadamente 80% das espécies de plantas formam associação simbiótica com esse fungo.	A maioria pertence ao filo Basidiomiceto, colonizam intercelularmente o córtex das raízes, formando a rede de Hartig, esse fungo é bastante encontrado nas coníferas (Ex: <i>Pinus</i>).	São encontrados tanto no filo Basidiomiceto quanto ascomiceto. Apresentam características das ectomicorrizas, formando a rede de Hartig, porém colonizam intracelularmente o córtex.	São encontrados no filo Basidiomiceto. Apresentam colonização específica nos gêneros vegetais: <i>Arbutos</i> , <i>Arctostaphylos</i> e <i>Pyrola</i> . Podem colonizar tanto inter quanto intracelularmente o córtex vegetal.	São encontrados no filo Basidiomiceto. Apresentam colonização específica nos gêneros vegetais: <i>Sarcodes</i> , <i>Pterospora</i> e <i>Monotropa</i> . Podem colonizar tanto inter quanto intracelularmente o córtex vegetal.	São encontrados no filo Ascomiceto. Apresentam colonização específica na família: <i>Ericaceae</i> . Produz hifas enroladas no interior das células e são muito específicos quanto ao hospedeiro.	São encontrados no filo Basidiomiceto. Colonizam intracelularmente as raízes de plantas da família <i>Orquidaceae</i> .
Especificidade	Baixa	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta	Alta
Classificação das plantas hospedeiras	<i>Gimnospermas</i> <i>Angiospermas</i>	<i>Gimnospermas</i> <i>Angiospermas</i>	<i>Gimnospermas</i> <i>Angiospermas</i>	<i>Ericales</i>	<i>Monotropa</i>	<i>Ericales</i>	<i>Orquidaceae</i>
Predominância	Cosmopolitas	Clima temperado	Clima temperado	Clima temperado	Clima temperado	Clima temperado	Clima temperado e tropical

Fonte: Moreira e Siqueira (2006).

Figura 1- Principais processos e estruturas da colonização micorrízica na raiz da planta.



Fonte: Adaptado de Gadkar et al. (2011).

Tabela 2- Principais funções das estruturas encontradas nos FMAs.

Estrutura	Função
Arbusculo (Intracelular)	Interação com a planta hospedeira. Regulação bioquímica e trocas de energia e nutrientes
Vesículas (Intraradicular)	Armazenamento de energia, rica em lipídeos, formado durante o desenvolvimento da simbiose.
Hifa (Intraradicular)	Estabelece a “unidade de infecção” nas raízes das plantas hospedeiras
Hifa (extraradicular)	Responsável pela absorção de água e nutrientes na rizosfera Fornece novos pontos de entrada ao longo da raiz da planta hospedeira Responsável pela produção de novos esporos
Esporos	Estrutura de sobrevivência e resistência Responsável pela dispersão e estabelecimento dos FMAs É a estrutura usada para identificação de espécies de FMAs

Fonte: Souza (2015).

1.1.4 Micorrizas Arbusculares em Sistemas Agroflorestais

Os SAFs apresentam características que se aproximam dos ecossistemas naturais, como a maior diversidade de plantas e a baixa perturbação do solo, os quais são fatores que contribuem para aumentar a ocorrência e a diversidade de FMAs (CARDOSO; KUYPER, 2006). Por outro lado, monocultivos, cultivo de plantas não micorrízicas, pousios prolongados, uso excessivo de fertilizantes e pesticidas estão entre os principais fatores que contribuem para a redução ou eliminação dos FMAs (JANSA et al., 2006; MANOHARAN et al., 2017).

Ingleby et al. (2007) e Ricalde e Dhillion (2003) observaram que algumas espécies de plantas da família Fabaceae são importantes para a manutenção de propágulos ativos de FMAs. Esse efeito foi testado tanto em experimentos controlados (casa de vegetação), através da inoculação de FMAs, quanto no campo com os fungos nativos do solo e provavelmente está relacionado a manutenção do banco de esporos e estimulação ao crescimento da rede de hifas extraradiculares proporcionados por essas espécies hospedeiras (INGLEBY et al, 2007).

A rede de hifas é definida como o micélio fúngico estabelecido no sistema solo-planta que simultaneamente coloniza e interconecta as raízes de espécies de plantas iguais ou diferentes (VAN DER HEIJDEN et al., 2015; SELOSSE et al., 2006), compartilhando nutrientes e informações entre si, um sistema conhecido como “wood wide web” (BELIER et al., 2009; SIMARD; DURALL, 2004).

Os sistemas agroflorestais são mais importantes para a construção e manutenção da rede de hifas do que sistemas anuais de cultivo (CARVALHO et al., 2010; INGLEBY et al., 2007), pois contribuem para o aumento da biomassa de FMAs (SIMARD et al., 2012; VAN DER HEIJDEN et al., 2009). No entanto, os benefícios atribuídos pelos SAFs no aumento da colonização micorrízica para os cultivos consorciados tem sido pouco explorado nos agrossistemas tropicais (BERRUTI et al., 2016; RODRIQUEZ; SANDERS, 2015). A relação

entre a colonização micorrízica e algumas espécies vegetais que apresentam elevada densidade na área dos SAFs do presente estudo podem ser vistas na tabela 3.

Tabela 3- Principais resultados encontrados sobre a colonização micorrízica de 3 espécies vegetais densamente presentes nos SAFs da área de estudo.

Espécies vegetais	Principais resultados	Referência
<i>Gliricidia sepium</i> (Fabaceae)	Espécie considerada altamente micotrófica.	Osonubi et al. (1991) Bakarr e Janos (1996)
	Inoculação de FMAs do gênero <i>Glomus</i> , aumentou o crescimento da planta e a atividade de fixação de N	Fagbola et al. (2001)
	Houve aumento significativo na colonização micorrízica em espécies de <i>Cajanus cajan</i> , <i>Arachis hypogaea</i> e <i>Panicum milliaceum</i> quando consorciadas com <i>Gliricidia sepium</i>	Balakrishna et al. (2017)
	Observaram taxas significativas de colonização micorrízica (principalmente hifas e vesículas) nesta espécie quando cultivada em um SAF na América Central.	Jalonem et al. (2012)
<i>Inga edulis</i> (Fabaceae)	Espécie considerada altamente micotrófica.	Iglesias et al. (2011)
	Apresentaram alto grau de colonização com FMAs da espécie <i>Glomus intrarradices</i> e <i>Glomus mosseae</i> .	Shepherd et al. (2007)
<i>Theobroma cacao</i> (Malvaceae)	Mostraram colonização micorrízica de até 69% em raízes de plantas jovens e adultas em SAFs na Venezuela	Cuenca e Meneses (1996)
	Obteve resposta positiva a colonização micorrízica em fase de muda. A espécie é considerada altamente micotrófica.	Iglesias et al. (2011)

1.1.5 Micorrizas Arbusculares em palma de óleo

Apesar da palma de óleo apresentar morfologia do sistema radicular com características desfavoráveis para absorção de nutrientes como raízes adventícias cilíndricas espessas e não produção de pelos radiculares (CORLEY; TINKER, 2016), o que provavelmente tornaria essa planta funcionalmente dependente da colonização micorrízica (PHOSRI et al., 2010), poucos estudos relataram a ocorrência da associação simbiótica entre os FMAs e a palma de óleo em condições de campo. São raros os estudos que mostraram

como ocorre o desenvolvimento dessa relação simbiótica desde a fase de plântula até a adulta (PHOSRI et al., 2010).

Os primeiros trabalhos a reportarem a colonização micorrízica na palma de óleo iniciaram na década de 30 em regiões da Malásia e África. Nadarajah (1980), realizou um dos primeiros experimentos demonstrando os efeitos benéficos da colonização micorrízica na palma de óleo. Widiastuti e Tahardi (1993), mostraram que as mudas de palma de óleo precisavam de menos fertilizantes fosfatados quando cresciam em solos inoculados com *Gigaspora margarita* e outras espécies de micorrizas, diferentemente dos solos estéreis (sem micorrizas), sugerindo que a inoculação de FMAs seria uma boa prática para reduzir insumos fosfatados em mudas.

Motta e Munevár (2005) mostraram que em solos sem adição de fertilizantes as mudas de palma de óleo inoculadas com FMAs tiveram crescimento de biomassa três vezes maior do que mudas não inoculadas. Sharma e Tan (1997) usaram uma combinação de cinco espécies diferentes de FMAs para testar os efeitos nas mudas de palma de óleo. Os resultados mostraram que houve uma tendência de aumento significativo da biomassa das mudas que receberam os FMAs, principalmente quando nenhum fertilizante foi usado.

Chu (1997) observou que a colonização micorrízica após seis meses de desenvolvimento de mudas de palma de óleo em casa de vegetação variou entre 36,54 e 56,65%, os maiores valores de colonização micorrízica 56,65 e 55,35% foram encontrados quando as mudas foram inoculadas com espécies de *Gigaspora* sp. e *Scutellospora gilmorei*, respectivamente. Blal et al. (1990) ao avaliar o resultado da inoculação de FMAs em mudas de palma de óleo durante 12 semanas em solos tropicais na Costa do Marfim, observou também elevada colonização micorrízica variando entre 48 e 72%, as maiores taxas de colonização nesse estudo foram encontradas nos tratamentos sem a aplicação de superfosfato triplo e simples.

Em relação aos aspectos principais da simbiose micorrízica na palma de óleo, Galindo-Casteñeda e Romero (2013) mostraram que a colonização foi maior nas raízes terciárias da planta e o desenvolvimento da simbiose ocorreu nos primeiros meses de desenvolvimento do vegetal, com destaque para o estabelecimento da rede de hifas intraradicular no segundo mês, e o aparecimento de arbúsculos no terceiro mês em mudas de palmas de óleo cultivadas em viveiros na Colômbia.

De forma geral, o comprimento total das hifas extracelulares das micorrizas arbusculares é maior que o comprimento da raiz da planta hospedeira e a fração de fósforo que é absorvida via hifa para a palma de óleo, precisa ser medida tal como ocorreu em outros tipos de cultivo (CORLEY, 1993). A maioria dos estudos que avaliaram os efeitos da colonização micorrízica nos estágios iniciais do desenvolvimento da palma de óleo, obtiveram conclusões semelhantes mostrando aumento significativo da biomassa da planta e absorção de nutrientes, principalmente o fósforo (GALINDO-CASTEÑEDA; ROMERO, 2013; MENDEZ et al., 2013; CARVALHO et al., 1999; CHU, 1997).

1.1.6 Sistema de absorção de nutrientes na palma de óleo

É importante destacar que o comprimento e a distribuição funcional do sistema radicular devem ser levados em consideração para absorção de água e nutrientes na taxa necessária para garantir o crescimento da planta (LAMBERS et al., 2008). De acordo com a Teoria da difusão o comprimento da raiz é mais importante do que massa ou volume para o processo de captação da maioria dos íons e água, devido à restrição imposta pelo solo na difusão e movimento de íons (LAMBERS et al., 2008). A demanda de nutrientes para a palma de óleo foi medida por vários autores e pode ser observada na Tabela 4.

Segundo Corley e Tinker (2016), não existem relatos de pelos radiculares na palma de óleo, que apresenta como característica raiz fasciculada com quatro classes de raízes principais: Primária, secundária, terciária e quaternária. As raízes primárias apresentam de 6 a

10 mm de diâmetro, estas ramificam para formar as raízes secundárias (2 a 4 mm de diâmetro), que por sua vez ramificam-se e formam as raízes terciárias (0,7 a 1,2 mm de diâmetro) e as terciárias formam as quaternárias (0,1 a 0,3 mm de diâmetro).

A maior parte das raízes da palma de óleo estão situadas perto da superfície, sendo que a maioria das raízes finas (terciárias e quaternárias) que correspondem a 82% do total do comprimento da raiz, estão na camada de 10-30 cm do solo (CORLEY; TINKER, 2016). Essas raízes são consideradas as principais responsáveis pela absorção da maioria dos nutrientes do solo (PURVIS, 1956).

Gray (1969) estimou que o comprimento total das raízes de palma de óleo eram cerca de 70 km para uma palmeira de 4 a 6 anos de idade. Tinker (1976) calculou que o comprimento das raízes responsáveis pela absorção de nutrientes (quaternárias e terciárias) foi de aproximadamente 60 km/palma, ou seja, em torno de de 9000 km/ha de superfície, com peso equivalente a 14 t/ha. Apesar da palma de óleo contar com um amplo sistema radicular o que sugere uma eficiência na absorção de água e nutrientes do solo (TINKER; NYE, 2000), a planta apresenta uma baixa taxa de entrada de água e nutrientes via sistema radicular em relação a outros tipos de cultivos (Tabela 5).

Tabela 4- Demanda de nutrientes para palma de óleo.

Idade (anos)	N	P	K	Mg	Referências
	-----Kg/ha/ano-----				
10	114	14	149	32	Henson (1999)
15	162	21	279	49	Ng et al. (1999)
15	192	26	251	61	Pushparajah e Chew (1998)
9-10	137	18	231	Não avaliado	Henson e Chang (2007)

Fonte: Corley e Tinker (2016).

Tabela 5- Valores médios de entrada de nutrientes via sistema radicular na palma de óleo em relação a média de cultivos anuais.

	N	P	K	Mg
	----- mol/cm.s x 10 ⁻¹³ -----			
Palma de óleo	4	0.25	2	0.6
Cultivos anuais	10-15	1	5-10	-

Fonte: Corley e Tinker (2016).

1.1.7 Dinâmica do fósforo no solo

A dinâmica do fósforo no solo depende diretamente das propriedades físico-químicas, mineralógicas e principalmente das atividades de microrganismos os quais imobilizam, mineralizam e solubilizam o P no solo (Figura 2). Estes dois últimos processos liberam íons ortofosfato para absorção nas plantas (ROY, 2017; RICHARDSON et al., 2011). A planta absorve P sob a forma de ânions H_2PO_4 (ortofosfato primário), principalmente em solos ácidos e HPO_4 (ortofosfato secundário), principalmente em solos alcalinos (OLANDER; VITOUSEK, 2004).

Para melhor entendimento, pode-se dividir o fósforo do solo em dois grandes grupos: Fósforo inorgânico (Pi) e Fósforo orgânico (Po). O Pi dependendo da natureza do composto que está ligado. Pode ser dividido em fósforo dos minerais primários e fósforo adsorvido (OHTAKE et al., 2019; NOVAES et al., 2007). Pode ser encontrado na forma de íons fosfatos na solução do solo (P-solução), adsorvidas aos oxihidróxidos de Fe e Al, precipitadas com Al^{+3} , Fe^{+2} e Ca^{+2} e nas formas estruturais dos minerais fosfatados (COSTA, 2007). O Po tem origem nos resíduos vegetais adicionados ao solo, na biomassa microbiana do solo e dos produtos de sua decomposição (DAMON et al., 2014). As principais formas de fósforo orgânico no solo identificadas são: Fosfatos de inositol (estimado entre 10 a 80% de Po total), fosfolípidios (0,5 a 7% Po total), ácidos nucleicos (~3%) e outros ésteres-fosfato (>5%).

As reações de sorção de Pi ocorrem naturalmente a partir das ligações de íons de P (adsorvato) com a fase sólida do solo ou colóides minerais (óxidos, hidróxidos, argilominerais, matéria orgânica), chamados de adsorventes (ROY, 2017; SHEN et al., 2011). A natureza e a energia dessas ligações permitem classificá-las em adsorção, fixação e precipitação, as quais juntas formam o complexo de sorção (SCHOLZ et al., 2014). A etapa inicial do processo de adsorção ocorre quando o íon fosfato é sorvido (ligado) aos seus adsorventes. Esta ligação pode ocorrer com a formação de complexos de esfera externa, no qual existe a participação de uma molécula de água interpondo a ligação, tornando-a pouco estável comparada as demais (SIMPSON et al., 2011).

Quando ocorre a saída de água, o íon fosfato liga-se diretamente ao adsorvente, transformando a ligação que era de esfera externa para esfera interna (BUNEMANN et al., 2011). Desse modo, o P se liga às hidroxilas dos adsorventes, ocorrendo o estágio de fixação do P pela maior força de atração entre o adsorvato e adsorvente através da ligação covalente (COSTA, 2007; NOVAIS et al., 2007). A partir dessa etapa ocorre a formação de um novo produto, como os fosfatos de ferro, alumínio e cálcio que apresentam composição definida e baixa solubilidade. Esse último processo é conhecido como precipitação do P (SHEN et al., 2011).

Do ponto de vista da fertilidade do solo, a disponibilidade de P pode ser classificada de acordo com a facilidade de reposição de íons fosfato na solução do solo (COSTA, 2007). Desse modo, o conjunto de compostos capazes de repor P rapidamente na solução do solo, quando este é absorvido pelas plantas e microrganismos, representa a fração lábil de P (P-lábil), também chamado de P disponível (NOVAES; SMITH, 1999; PAUL, 2017).

Quando o teor de P da solução movimenta-se para níveis de maior estabilidade, aumentando a interação com os sítios de adsorção, o P passa a ter um comportamento cada vez menos lábil, portanto, passam a ser chamados de frações moderadamente lábeis e pouco

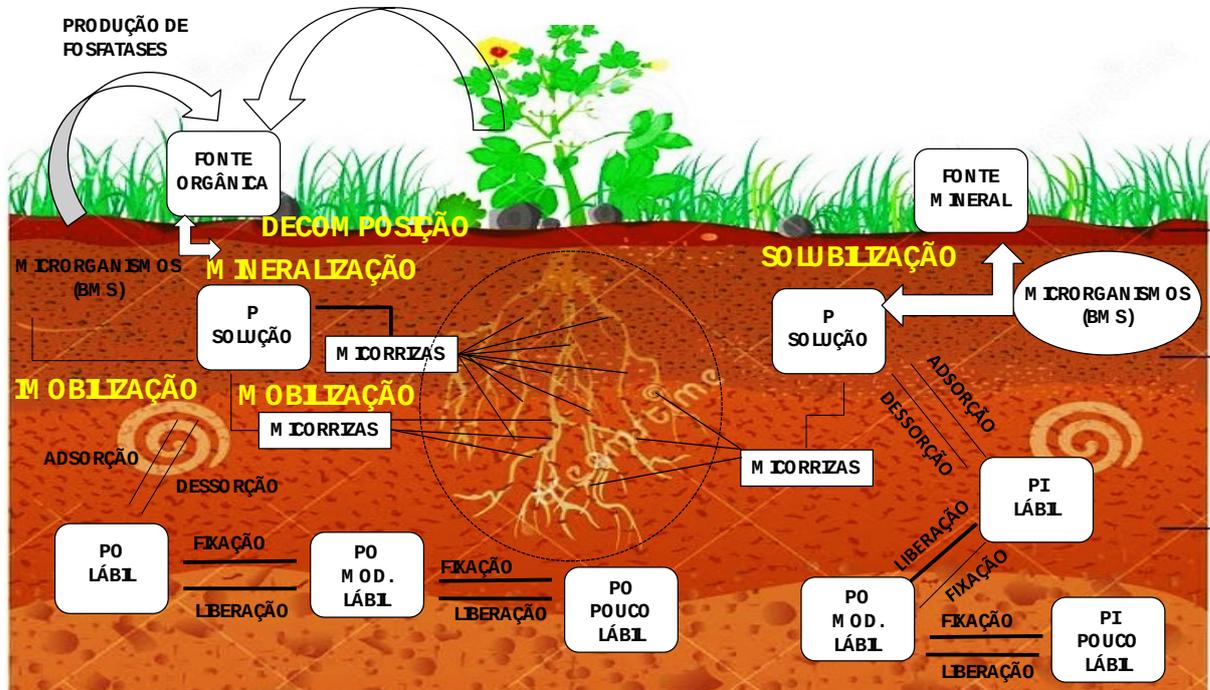
lábeis (Figura 2), isto é, menos P disponíveis para os vegetais, desse modo, quanto maior a intensidade de energia das ligações entre os fosfatos e os sítios de adsorção, menos lábil será o P (BUNEMANN et al., 2011; SCHOLZ et al., 2014). Por isso a disponibilidade de P no solo é geralmente medida a partir do grau de labilidade desse nutriente (NOVAES; SMITH, 1999; SIMPSON et al., 2011).

O sistema de cultivo pode afetar a distribuição de P ao longo do perfil do solo, além de alterar o ambiente dos microrganismos, que são responsáveis pelos processos de mineralização e solubilização de P. De maneira geral, quando o manejo inclui adição de resíduos orgânicos, ocorre aumento do “Pool” de Po no solo. Por outro lado, em sistemas intensivos de cultivo, com baixa reposição de P pela matéria orgânica vegetal, tem-se diminuição do Po (REDDY et al. 2000)

Nos sistemas de cultivo convencionais, o revolvimento do solo faz com que haja exposição a novos sítios de adsorção, contribuindo para retenção de P com maior energia (BUNEMANN et al., 2011; ROY, 2017), já nos sistemas de cultivos alternativos que promovem aumento da MOS, como os SAFs, contribuem para o incremento de formas mais lábeis de P, pois os ácidos orgânicos, oriundos da decomposição da MO, bloqueiam sítios de adsorção por recobrimento dos óxidos de Fe e de Al (RICHARDSON et al., 2011; SIMPSON et al., 2011). Os sistemas alternativos de cultivo, apresentam como característica o aumento da atividade microbiana nas camadas superficiais do solo, o que resulta na formação de um estoque temporário de P microbiano, prevenindo a rápida adsorção do P inorgânico pela fração mineral (DAMON et al., 2014). Além disso, esses sistemas favorecem o aumento da colonização micorrízica, ampliando a capacidade das plantas na absorção de P (RICHARDSON; SIMPSON, 2011). Por outro lado, no sistema convencional, devido aos distúrbios do solo e uso de agroquímicos, ocorre impacto direto na atividade microbiana do solo (OHTAKE et al., 2019; SIMONSSON et al., 2018), reduzindo o papel dos

microrganismos nos processos de mineralização e solubilização de P, além de afetar negativamente na colonização micorrízica.

Figura 2- Dinâmica de P no solo no sistema solo-planta-microrganismos.



Fonte: Figura adaptada de Bunemann et al. (2011).

1.1.8 A importância dos FMAs na mobilização do P no solo

O fósforo é o segundo macronutriente mais exigido em termos de grande quantidade pelas plantas e um dos nutrientes mais difíceis de serem adquiridos devido à sua baixa solubilidade e mobilidade no solo (BUNEMANN et al., 2011). A associação simbiótica entre FMAs e plantas desempenha um papel importante na absorção de fósforo, muitas experiências mostraram que as micorrizas arbusculares são capazes de alterar a mobilização de fósforo no solo de suas plantas hospedeiras (LALITHA et al., 2017).

O aumento da captação de P nas plantas micorrizadas é devido, principalmente, à absorção e translocação de P em áreas distantes, que são inacessíveis ao alcance das raízes das plantas, mas acessíveis a rede de micélio das micorrizas arbusculares (SMITH et al., 2011). As hifas absorvem P na forma de ortofosfato e transportam ativamente como polifosfatos (PLASSARD; DELL, 2010). A fina espessura das hifas (diâmetro entre 5 a 30 μm e com

centímetros de comprimento) tem dupla vantagem sobre os pelos radiculares (diâmetro entre 50 a 100 μm e com milímetros de comprimento). A primeira vantagem é a facilidade em entrar nos poros do solo que não podem ser penetrados através dos pelos radiculares e a segunda é a rápida absorção da forma solúvel de P que leva a uma mudança no equilíbrio em direção à liberação do P ligado as reservas do solo (LALITHA et al., 2017). De acordo com Bolan (1991), as hifas apresentam maior afinidade pelos íons fosfato com menor concentração limiar para absorção do que as raízes das plantas.

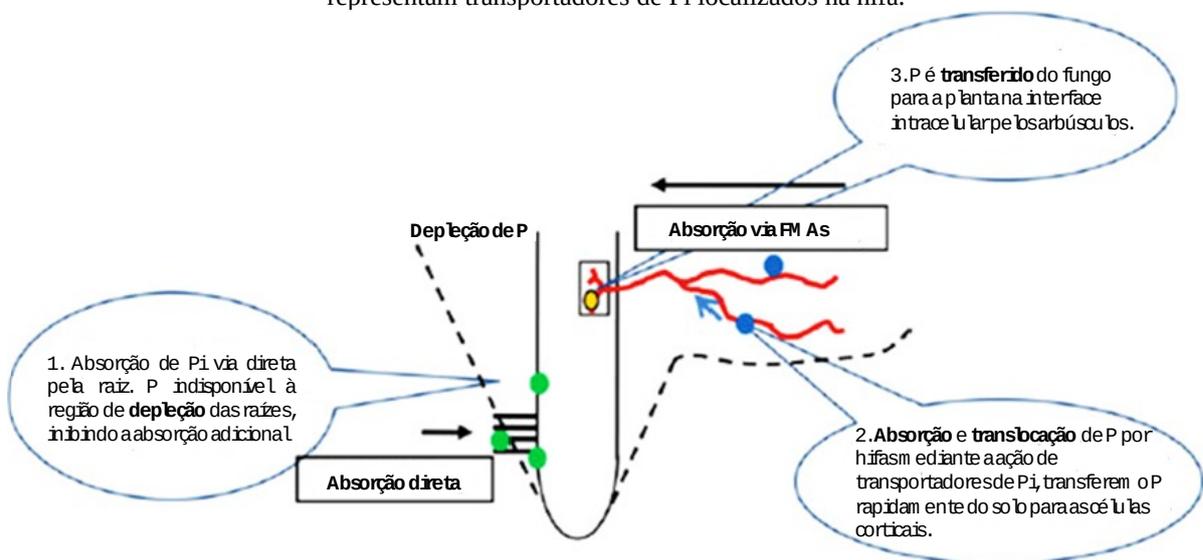
Segundo Varma et al. (2017a), as plantas absorvem fósforo do solo de duas maneiras: Pela via direta e por simbiose com FMAs (Figura 3). Pela via direta, as plantas absorvem fósforo na forma de íons H_2PO_4^- , que aumentam o potencial elétrico negativo dentro da membrana celular em relação a solução do solo (RICHARDSON et al., 2011). Por isso, é necessária uma energia metabólica adicional para a captação de P_i e a planta precisa de proteínas transportadoras de alta afinidade (BUNEMANN et al., 2011). Logo, essa via é mais eficaz no ápice da raiz, que possui proteínas transportadoras de alta afinidade na epiderme. Porém após um certo período de tempo, podem ocorrer dois problemas: O primeiro é quando se inicia a perda de pelos radiculares e a atividade da proteína transportadora diminui e o segundo ocorre quando as concentrações de P_i na rizosfera radicular diminuem, causando uma zona de depleção (BALZERGUE et al., 2011; SMITH; SMITH 2011;).

Desse modo as plantas desenvolveram uma outra estratégia para ampliar a absorção de P no solo que é via simbiose com FMAs (LALITHA et al., 2017). O P é absorvido da solução do solo através das hifas por um processo ativo, onde são transformados em grânulos de polifosfato transportado por corrente citoplasmática até os arbúsculos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Nos arbúsculos são hidrolisados pelas fosfatases, liberando P_i , que é transferido passivamente para o hospedeiro (Figura 4) e posteriormente translocado via xilema para as folhas onde serão usados nas reações metabólicas da fotossíntese que sustenta

o crescimento e a atividade metabólica do fungo na raiz e no solo, garantindo, assim, o funcionamento da relação micorrízica (SMITH; READ, 2008).

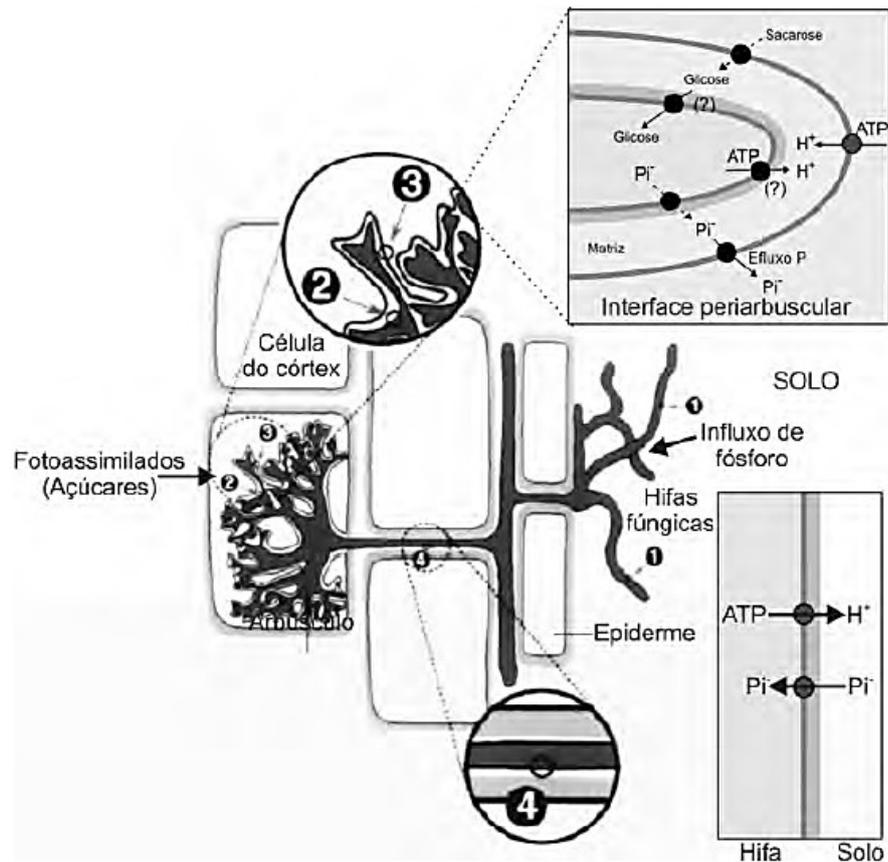
É importante destacar a participação de algumas proteínas, como as transportadoras específicas de fósforo que apresentam elevada afinidade ao Pi e estão presentes nas hifas extracelulares, no espaço periarbuscular e na membrana da planta (Figura 4). Os transportadores fúngicos de Pi são específicos das micorrizas arbusculares e são muito mais numerosos em comparação aos transportadores do sistema radicular (SMITH et al., 2011).

Figura 3- Absorção de fósforo por via direta (sistema radicular) e por via simbiótica através dos FMAs. Círculos verdes simbolizam os transportadores de Pi localizados na epiderme e pelos radiculares e círculos azuis representam transportadores de Pi localizados na hifa.



Fonte: Adaptado de Varma et al. (2017a).

Figura 4- Absorção e transferência de P e carboidratos nas raízes colonizadas. Onde: (1) representa absorção de P via hifa extracelular; (2) Efluxo de P pela membrana do arbúsculo; (3) Absorção de P pela membrana periarbuscular e (4) Sítios de absorção de glicose no fungo.



Fonte: Moreira e Siqueira (2006).

1.2 Objetivo geral

Avaliar os efeitos dos Sistemas Agroflorestais (SAFs) sobre a colonização micorrízica no cultivo de palma de óleo e sobre a disponibilidade de fósforo no solo no município de Tomé-Açu, Pará.

1.3 Objetivos específicos

Verificar o efeito dos sistemas agroflorestais manejados organicamente e com diferente diversidade de plantas na Porcentagem de Colonização Micorrízica (PCM) da palma de óleo em comparação aos monocultivos.

verificar se a colonização micorrízica varia espacialmente (i.e., entre zonas de manejo da palma de óleo).

Avaliar as frações lábeis e moderadamente lábeis (orgânico e inorgânico) no solo do cultivo de palma de óleo inserido em dois SAFs orgânicos, com diferente diversidade de plantas e comparar com monocultivo.

Verificar as influências das zonas de manejo (pilha, base da planta e SAF) na disponibilidade de P dos tratamentos estudados.

1.4 Estrutura da Tese

A pesquisa avaliou o efeito dos Sistemas Agroflorestais no cultivo de palma de óleo em relação a dois componentes (biológico e químico), de reconhecida importância para o solo na agricultura Amazônica. O primeiro capítulo: “A colonização micorrízica na palma de óleo é maior quando cultivada em Sistemas Agroflorestais do que no monocultivo”, mostra o efeito positivo dos SAFs na ampliação da colonização micorrízica em cultivos consorciados como a palma de óleo. A partir da ampliação na colonização micorrízica, a planta aumenta sua capacidade na absorção de nutrientes, como o fósforo. Este último é tema de estudo do segundo capítulo da tese intitulado: “Cultivo de palma de óleo em Sistemas agroflorestais orgânicos aumenta o reservatório de P moderadamente lábil no solo em relação ao monocultivo na Amazônia”, nesse capítulo é abordado qual é a contribuição dos SAFs na disponibilidade de cada fração de P (lábil e moderadamente lábil).

Desse modo optou-se por dividir em dois capítulos, o primeiro abordando a colonização micorrízica arbuscular em cultivos de palma de óleo inseridas em seis tipos de Sistemas Agroflorestais com composições de espécies vegetais diferentes situados em três propriedades rurais, comparado a dois monocultivos de palma de óleo. No primeiro capítulo o objetivo foi avaliar o efeito dos tratamentos e local de amostragem (base da planta e pilha da poda). Nesse capítulo discutiu-se principalmente as prováveis influências dos SAFs no aumento da colonização micorrízica da palma de óleo que foi considerado o principal resultado desse estudo.

O segundo capítulo abordou o efeito dos SAFs com palma de óleo sobre a disponibilidade de P no solo em três pontos de coleta diferentes (Base da palma de óleo, pilha da poda e SAF), para isso foi realizado a técnica de fracionamento de P. Foram avaliadas seis frações diferentes de P distribuídas em P lábil e P moderadamente lábil. Como a metodologia do fracionamento é bastante demorada e minuciosa optou-se por utilizar apenas uma propriedade (UD2) com dois SAFs bem distintos na composição vegetal e comparar os resultados com o monocultivo. A partir de uma ampla análise das frações de P no solo, foi possível entender que os SAFs aumentam as frações de P lábil e moderadamente lábil, apresentando maior “pool” de P moderadamente lábil no solo em relação ao monocultivo. Esse resultado é importante para fomentar discussões sobre o papel dos SAFs na problemática da limitação da produção agrícola na Amazônia em virtude da deficiência de P no solo.

Os dois capítulos apresentam um importante ponto de integração, uma vez que o fósforo tem como característica a baixa mobilidade e disponibilidade no solo e nesse caso é atribuído ao fungo micorrízico arbuscular o papel de conceder maior mobilidade e acessibilidade deste nutriente as plantas. Portanto, a tese buscou melhorar a compreensão dos serviços ambientais oferecidos pelos SAFs na disponibilidade e acessibilidade do P no cultivo de palma de óleo na Amazônia.

CAPÍTULO 2 A COLONIZAÇÃO MICORRÍZICA NA PALMA DE ÓLEO É MAIOR QUANDO CULTIVADA EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS DO QUE NO MONOCULTIVO

Rodrigo da Silva Maia¹ Steel Silva Vasconcelos²

Resumo

A palma de óleo (*Elaeis guineensis*) tem sido bastante cultivada na Amazônia brasileira, mas apresenta um sistema radicular com características desfavoráveis para absorção de nutrientes, como raízes adventícias cilíndricas espessas e a não produção de pelos radiculares, o que pode favorecer a colonização micorrízica nesta planta. Porém poucos estudos relataram a ocorrência de micorrizas arbusculares na palma de óleo em condições de campo. Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) apresentam características que contribuem para a ampliação da colonização micorrízica arbuscular nos cultivos consorciados, através do desenvolvimento da rede de micélio no solo. Porém, existem poucas informações sobre a influência dos SAFs na colonização micorrízica em cultivos perenes nos agrossistemas tropicais. O objetivo deste estudo foi avaliar a colonização micorrízica arbuscular na palma de óleo plantada em SAFs biodiversos e monocultivos na Amazônia brasileira. Foi avaliada a colonização micorrízica de raízes finas (diâmetro ≤ 2 mm) na palma de óleo cultivada em seis SAFs com diferentes composições vegetais e comparadas com a palma de óleo cultivada em dois monocultivos com a mesma condição edafoclimática. As raízes foram coletadas em diferentes períodos sazonais (chuvoso e seco) e zonas de manejo (base da planta e pilha de poda das folhas). A colonização micorrízica foi de modo geral 3,5 vezes maior na palma de óleo cultivada nos SAFs em relação ao monocultivo. A dominância de espécies hospedeiras nos SAFs como *Gliricidia sepium* e *Inga edulis* podem ter sido mais importantes para o aumento da colonização micorrízica na palma de óleo do que a diversidade de plantas. A colonização micorrízica foi maior na pilha nos dois SAFs que apresentaram a menor concentração de P nesta zona de manejo. A adoção de SAFs no cultivo de palma de óleo na Amazônia é uma prática promissora para aumentar a colonização micorrízica nessa espécie.

Palavras-chave: Amazônia, diversificação da palma de óleo, manejo do solo, serviços ambientais, solo, agricultura alternativa

¹ Instituto Federal do Pará (IFPA), Laboratório de Microbiologia e Parasitologia, Rua Porto Colômbia, 12, Tucuruí, Pará, CEP 68464-000, Brasil. E-mail: rodrigo.maia@ifpa.edu.br

² Embrapa Amazônia Oriental, Laboratório de Análise de Sistemas Sustentáveis, Tv. Dr. Enéas Pinheiro, s/no, Belém, Pará, CEP 66095-100, Brasil. E-mail: steel.vasconcelos@embrapa.br

Abstract

Oil palm (*Elaeis guineensis*) has been widely cultivated in the Brazilian Amazon, but has a root system with unfavorable nutrient absorption characteristics, such as thick cylindrical adventitious roots and no root hair production, which may favor mycorrhizal colonization in this plant. However, few studies have reported the occurrence of arbuscular mycorrhizae in oil palm under field conditions. The agroforestry systems have characteristics that contribute to the expansion of arbuscular mycorrhizal colonization in intercropped crops through the development of the soil mycelium network. However, there is little information on the influence of agroforestry on mycorrhizal colonization in perennial crops in tropical agrosystems. Our objective was to evaluate arbuscular mycorrhizal colonization in oil palm planted in biodiverse and monoculture agroforestry systems in the Brazilian Amazon. We evaluated the fine root mycorrhizal colonization (diameter ≤ 2 mm) in oil palm grown in six agroforestry systems with different plant composition and compared it with oil palm grown in two monocultures with the same edaphoclimatic condition. The roots were collected at different seasonal periods (rainy and dry) and management zones (plant base and leaf pile). Mycorrhizal colonization was generally 3.5 times higher in oil palm grown in agroforestry than in monoculture. The dominance of host species in agroforestry such as *Gliricidia sepium* and *Inga edulis* may have been more important for increasing mycorrhizal colonization in oil palm than plant diversity. We conclude that agroforestry in oil palm cultivation in the Amazon is a promising practice to increase mycorrhizal colonization in this species.

Key words: Amazonia, oil palm diversification, soil, alternative agriculture

2.1 Introdução

Nos ecossistemas tropicais, a associação de plantas com Fungos Micorrízicos Arbusculares (FMAs) é uma importante estratégia das plantas para maximizar a absorção de água e nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo (BERRUTI et al., 2016), e contribui para o aumento da produtividade vegetal (CARDOSO; KUYPER, 2006; JEFFRIES et al., 2003). Muitos estudos mostraram que as micorrizas arbusculares não interagem somente com uma única espécie de planta hospedeira e sim com grande parte da comunidade vegetal, afetando a maneira de como as plantas absorvem nutrientes e se comunicam entre si (VAN DER HEIJDEN et al., 2015).

Em sistemas agrícolas, o fluxo de nutrientes via associação micorrízica pode ser potencializado quando as plantas estão consorciadas com outras espécies em sistemas diversificados em relação aos monocultivos (HODGE, 2003). Os Sistemas Agroflorestais (SAFs) são exemplos de sistemas diversificados adotados na Amazônia que podem desempenhar um papel importante na construção e a manutenção da rede de hifas em relação aos sistemas anuais de cultivo (CARVALHO et al., 2010; INGLEBY et al., 2007),

Apesar dos SAFs contribuírem para o aumento da biomassa de FMAs no sistema solo-planta (SIMARD et al., 2012; VAN DER HEIJDEN et al., 2009), poucos estudos mostraram a influência da variedade ou densidade de espécies hospedeiras nos SAFs com manejo orgânico na colonização micorrízica dos cultivos consorciados nos agrossistemas tropicais (BERRUTI et al., 2016; RODRIQUEZ; SANDERS, 2015).

É importante compreender o desempenho de FMAs em SAFs sob adubação orgânica, em que a disponibilidade de P geralmente é limitada e a simbiose entre FMA e plantas deve exercer um papel importante no aumento da absorção desse nutriente (KAHILUOTO et al., 2009).

A contribuição dos FMAs para o aumento da absorção de nutrientes nas plantas é particularmente relevante em sistemas com baixa entrada de nutrientes em comparação com cultivos convencionais, geralmente de alta entrada de nutrientes (BERRUTI et al., 2016; BAIRD et al., 2010). Logo uma elevada taxa de colonização micorrízica no solo onde a disponibilidade de P é baixa, pode aumentar o acesso de P do solo para as plantas por meio das extensas redes de hifas (RICHARDSON et al., 2011; WALDER et al., 2012).

A palma de óleo (*Elaeis guineensis*) é uma das culturas para as quais há muito interesse em expandir o conhecimento sobre relações micorrízicas. Esta cultura é uma das principais *commodities* usadas no mundo, apresentando os maiores rendimentos econômicos por hectare entre plantas oleaginosas (CORLEY; TINKER, 2016). A presença de raízes adventícias cilíndricas espessas e a ausência de produção de pelos radiculares (CORLEY; TINKER, 2016) desfavorecem a absorção de nutrientes pela palma de óleo, o que tornaria essa cultura mais dependente da colonização micorrízica durante o ciclo produtivo (PHOSRI et al., 2010). No entanto, há poucos estudos que testaram essa hipótese, porque a maior parte das pesquisas correlatas têm abordado os efeitos da inoculação dos FMAs na fase de semente ou muda (GALINDO-CASTEÑEDA; ROMERO, 2013; MENDEZ et al., 2013; CHU, 1997) e não na fase adulta, produtiva, ou durante o desenvolvimento da palma de óleo em condições de campo.

Estudos de solo em plantios de palma de óleo, incluindo estudos de micorrizas, devem considerar a forte variação espacial de condições de solo resultante principalmente do manejo da cultura. Geralmente características químicas, físicas e biológicas do solo diferem espacialmente entre as zonas de manejo (COHEN et al., 2008). Como a disponibilidade de nutrientes é um dos principais componentes que regulam a simbiose fungo-planta (JANSA et al., 2006), a variação espacial de nutrientes entre zonas de manejo, especialmente de fósforo, pode provocar resposta diferente da planta à colonização micorrízica (SAYER et al., 2012).

O objetivo deste estudo foi avaliar se a palma de óleo apresenta variação em colonização micorrízica quando plantada em sistema diversificado (sistemas agroflorestais) em relação ao sistema simplificado (monocultivo) e verificar se a colonização micorrízica varia espacialmente (i.e., entre zonas de manejo da palma de óleo). A hipótese principal é de que a palma de óleo apresentaria maior colonização micorrízica quando plantada em sistemas agroflorestais em relação ao monocultivo, em função da maior diversidade potencial de plantas hospedeiras nos sistemas agroflorestais. A outra hipótese deste estudo considera que a colonização micorrízica da palma de óleo seria maior nas zonas de manejo com menor disponibilidade de nutrientes, especialmente de fósforo.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em três propriedades rurais (UD-1, UD-2 e UD-3) localizadas em Tomé-Açu (2° 40' 54''S e 48° 16' 11'' W), Estado do Pará, Amazônia oriental. O solo da região é classificado como Latossolo Amarelo Argiloso (BAENA; FALESI, 1999). O clima da área de estudo é do tipo Ami, de acordo com o sistema de classificação de Köppen, com temperatura média anual do ar de 26,2 °C e precipitação anual de 2400 mm (PACHECO; BASTOS, 2008).

Em cada propriedade, foram avaliados dois sistemas agroflorestais em que a palma de óleo é uma das culturas-chave no sistema (Tabela 6). Os SAFs foram implantados em áreas previamente cobertas com um pomar abandonado a 10 anos (UD-1), floresta secundária de aproximadamente 10 anos (UD-2) e pastagem abandonada de 25 anos (UD-3). A floresta secundária foi formada após repetidos ciclos de corte e queima, que são práticas normalmente utilizadas na agricultura familiar da Amazônia. Em outubro de 2007, 6 ha de floresta secundária foram derrubados e triturados manual (2 ha) e mecanicamente (4 ha) para a

instalação dos SAFs; a trituração mecânica foi realizada por meio de um protótipo mecânico (FM600, AHWI, Herdwangen, Alemanha), acoplado a um trator. Em fevereiro de 2008, mudas do híbrido intraespecífico Tenera foram plantadas com espaçamento de 7,5 m entre linhas e 9,0 m entre plantas.

Cada SAF apresenta uma área de 2 ha, composto por 11 faixas de linhas duplas de palma de óleo, intercaladas com faixa de 15 m (Figura 5A), com diferentes composições de espécies vegetais consorciadas com a palma de óleo (Tabela 6). Os SAFs foram classificados de acordo o local da propriedade rural aonde estão inseridos e a quantidade de espécies vegetais consorciadas (Tabela 6). Desse modo nas propriedades UD-1 e UD-2 existem dois tipos de SAFs, respectivamente: SAF oriundo de pomar abandonado com baixa diversidade de plantas ($\text{SAF}_{\text{Pomar-BD}}$) e SAF oriundo de pomar abandonado com alta diversidade de plantas ($\text{SAF}_{\text{Pomar-AD}}$), SAF oriundo de floresta secundária com baixa diversidade de plantas ($\text{SAF}_{\text{Flosec-BD}}$) e SAF oriundo de floresta secundária com alta diversidade de plantas ($\text{SAF}_{\text{Flosec-AD}}$). Na UD-3 os SAFs não apresentam diferenças acentuadas quanto ao número de espécies consorciadas (Tabela 6), sendo classificados como: SAF oriundo de pastagem 1 ($\text{SAF}_{\text{Past-1}}$) e SAF oriundo de pastagem 2 ($\text{SAF}_{\text{Past-2}}$).

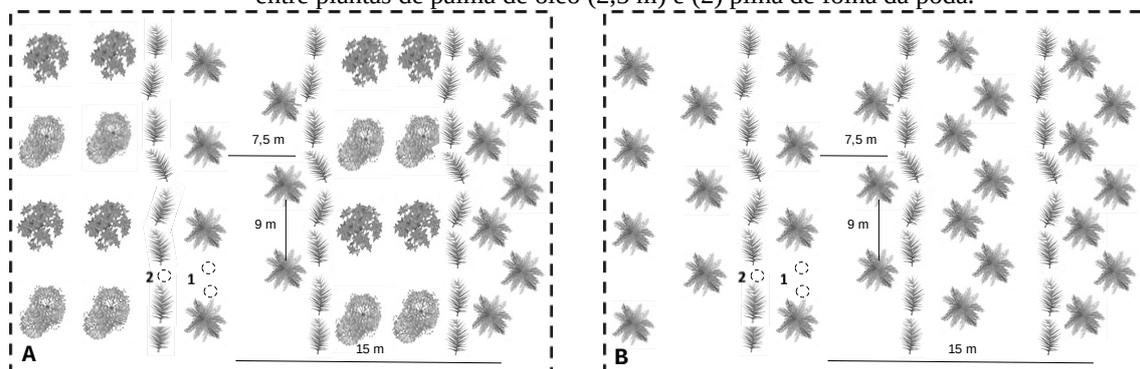
A adubação nos SAFs foi realizada de maneira orgânica a partir da adição de 1 kg de farinha de osso (2 % de N; 20 % de P_2O_5 e 0.12 % de K_2O), 1 kg de torta de mamona (5.44 % de N; 1.91 % de P_2O_5 e 1.54 % de K_2O) e 0.3 kg de fosfato de rocha reativo por planta (CARVALHO et al., 2014). Além disso, anualmente ocorreu a adição de composto orgânico (8 kg planta^{-1} : 1.2 % de N; 0.1 % de P e 0.4 % de K_2O) e periodicamente foi adicionada fitomassa oriunda do manejo da poda da palma de óleo e de outras espécies presentes nos SAFs. Não houve nenhuma aplicação de produtos químicos sintéticos nesses tratamentos, tais como adubos, herbicidas e fungicidas.

Para comparar com os SAFs, foram selecionados dois monocultivos de palma de óleo, denominados monocultivo I que foi comparado a UD-1 e UD-2 e monocultivo II que foi comparado a UD-3, os monocultivos estão localizados em áreas com históricos de uso e condições edafoclimáticas semelhantes às das UD. Os monocultivos foram instalados no final do ano de 2006 com plantio de mudas de palma de óleo em cova, no qual foram aplicados 800 g de superfosfato triplo. Em 2007 foram aplicados 200 g de ureia, 100 g de cloreto de potássio, 100 g de sulfato de magnésio, 13 g de bórax e 8 g de micronutrientes, em cobertura na coroa da planta no início e no final do período chuvoso. Atualmente a adubação é mecanizada, 3 a 4 vezes ao ano, na coroa da palma (raio de 2,4 metros) utilizando-se 1 kg da formulação 12-2-20 de NPK. As folhas da palma de óleo também são podadas após cada colheita e depositadas sobre o solo entre as linhas duplas.

2.2.2 Descrição do experimento

Nas áreas experimentais foram estabelecidos aleatoriamente 6 parcelas (30 m x 30 m). Cada parcela incluiu uma linha dupla de palma de óleo, a pilha da poda das folhas da palma de óleo e as espécies vegetais consorciadas (Figura 5A). No monocultivo, as parcelas incluíram 4 linhas de palma de óleo (Figura 5B). Para avaliar a variação espacial da colonização micorrízica, foram coletadas amostras de solo e raízes em duas zonas de manejo: (1) sob a projeção da copa das plantas de palma de óleo (a aproximadamente 0,6 m da base do estipe) que foram reunidas com amostras entre as plantas de palma de óleo (a aproximadamente 2,5 m da base do estipe) e (2) na pilha de folhas da poda.

Figura 5- Croqui representativo do local de coleta nos Sistemas Agroflorestais (A) e nos monocultivos (B). Os círculos em destaque indicam os locais de coleta das amostras na parcela, onde: (1) Base da planta (0,6 m) e entre plantas de palma de óleo (2,5 m) e (2) pilha de folha da poda.



Nome Científico	Familia	UD-1				UD-2				UD-3															
		SAF _{Pomar} -BD				SAF _{Pomar} -AD				SAF _{Florec} -BD				SAF _{Florec} -AD				SAF _{Past-1}			SAF _{Past-2}				
		d abs	DAP média	h média	Nº ind	d abs	DAP média	h média	Nº ind	d abs	DAP média	h média	Nº ind	d abs	DAP média	h média	Nº ind	d abs	DAP média	h média	Nº ind	d abs	DAP média	h média	Nº ind
<i>Acacia mangium Willd</i>	Fabaceae												5,56	15,55	10,05	2	44,44	13,15	4,71	16	2,78	13,50	8,90	1	
<i>Adenantha pavonina</i>	Fabaceae					2,78	6,40	4	1				2,78	17,40	8,60		83,33	11,48	3,64	30					
<i>Bertholletia excelsa bonpl</i>	Lecythydaceae					8,33	9,40	2,95	3																
<i>Calophyllum brasiliensis</i>	Calophyllaceae												33,33	5,61	6,98	12									
<i>Carapa guineenses Aubl.</i>	Meliaceae	16,67	4,30	3,38	6	5,56	18,39	12,48	2				25,00	18,31	9,26	9	41,67	10,39	7,14	15					
<i>Elaeis guineensis Jacq.</i>	Arecaceae	63,89	88,96	3,85	23	72,22	86,08	4,14	26	75,00	87,93	3,60	27	75,00	76,39	4,06	27	77,78	96,93	3,97	28	75,00	93,60	4,64	27
<i>Euterpe oleracea</i>	Arecaceae					94,44	10,21	5,24	34				244,44	9,72	6,30	88	2,78	3,30	0,40	1					
<i>Gliricidia sepium</i>	Fabaceae	358,33	6,23	4,59	129					438,89	8,30	4,49	158					386,11	5,54	5,75	139	372,22	7,14	5,39	134
<i>Inga edulis</i>	Fabaceae	30,56	7,01	2,17	11	8,33	17,99	6,93	3	177,78	6,87	2,60	64	8,33	7,18	1,08	3	100,00	8,21	3,57	36	25,00	11,53	6,07	9
<i>Jacaranda copaia (Aubi.)</i>	Bignoniaceae												2,78	54,40	19,20	1									
<i>Lecythis pisonis</i>	Lecythydaceae																2,78	9,55	3,21	1					
<i>Mangifera indica L.</i>	Anacardiaceae					13,89	5,18	2,36	5				16,67	5,04	2,95	6	111,11	9,92	5,53	40					
<i>Oenocarpus bacaba</i>	Arecaceae					8,33	5,01	1,35	3																
<i>Sclerolobium paniculatum</i>	Fabaceae												11,11	30,39	16,18	4									
<i>Swietenia macrophylla King</i>	Meliaceae					2,78	21,03	10,16	1												13,89	25,40	11,60	5	
<i>Tabebuia spp.</i>	Bignoniaceae	11,11	6,78	4,85	4	47,22	15,77	7,65	17				47,22	21,19	9,40	17									
<i>Theobroma cacao</i>	Malvaceae	158,	3,86	2,44	57	594,	9,61	4,17	214				447,	9,54	4,63	16	130,56	3,18	2,02	47	588,8	6,36	4,08	21	

Tabela 6- Espécies vegetais consorciadas com palma de óleo em sistemas agroflorestais da área de estudo, no município de Tomé-Açu (PA).

d abs = densidade absoluta (número de indivíduos/ hectare); DAP (diâmetro à altura do peito); h (altura) e Nº ind (Número total de indivíduos presentes na área). Os valores de DAP e h são médias.

Fonte: (BARROS, 2019).

2.2.3 Coleta do material de estudo

Em cada parcela, foram coletadas com trado (5 cm de diâmetro) duas amostras compostas de solo e raízes, na camada 0-10 cm, por zona de manejo, durante a estação menos chuvosa (novembro/2017) e a estação chuvosa (março/2018). Cada amostra composta resultou da reunião de seis amostras simples. As raízes foram armazenadas sob refrigeração a $\sim 6^{\circ}\text{C}$ até o processamento em laboratório.

No laboratório, foram peneiradas (2 mm) as amostras para separar raízes e, após lavá-las em água corrente, foram separadas e identificadas morfológicamente as raízes finas (diâmetro ≤ 2 mm) da palma de óleo (CORLEY; TINKER, 2016; JOURDAN, 2000; JOURDAN; REY, 1997). A abundante produção de raízes finas (principalmente terciárias e quaternárias) próximo da superfície do solo, a morfologia (monocotiledônia, raiz fasciculada, não produção de pelos radiculares) e aspectos peculiares como cor escura e maleabilidade (CORLEY; TINKER, 2016), permitiram distinguir as raízes da palma de óleo das raízes das outras espécies presentes na área experimental. Foram conservadas cerca de 1 g das raízes selecionadas em etanol a 60% até a análise da colonização micorrízica.

2.2.4 Avaliação da Colonização Micorrízica

Para avaliar a Percentagem de Colonização Micorrízica (PCM), as raízes foram submetidas a um processo de clareamento e coloração, de acordo com Phillips e Hayman (1970). Foram analisadas em microscópio óptico (Motic Digital BA310 Binocular), de acordo com método da ampliação das intersecções proposto por McGonigle et al. (1990), 100 pedaços de 1 cm de raízes de palma de óleo escolhidos aleatoriamente por amostra; nessa análise foram contabilizadas quaisquer estruturas fúngicas (hifas, arbúsculos, vesículas e esporos) presentes em cada pedaço de raiz.

Análise das propriedades físico-químicas do solo

A determinação de Ca^{+2} , Mg^{+2} , pH, P total e K^{+} foi realizada conforme Embrapa (2017). Após a extração com KCl, os teores de Ca^{+2} e Mg^{+2} foram determinados por absorção atômica. O pH em água foi medido com eletrodo combinado. Após extração com Mehlich, o teor de K^{+} foi determinado por absorção atômica e o teor de P por colorimetria. Os resultados dessas variáveis de solo estão descritos na Tabela 7.

Tabela 7- Características físico-químicas do solo nos tratamentos da área de estudo.

Tratamento	UD 1									
	pH		Ca		Mg		K		P	
	Base da planta	Pilha	Base da planta	Pilha	Base da planta	Pilha	Base da planta	Pilha	Base da planta	Pilha
	----H ₂ O-----		-----		cmol _c .dm ⁻³ -----		-----		----mg.dm ⁻³ ----	
SAF _{Pomar} -BD	5.89a	5.92a	4.31a	4.03a	1.20a	0.93b	0.32a	0.23b	17.75a	8.08b
SAF _{Pomar} -AD	5.83a	5.91a	4.13a	3.56a	0.86a	0.70a	0.27a	0.21a	29.83a	21.17a
Monocultivo I	5.20a	5.42a	2.76b	4.33a	0.51b	0,79a	0.15a	0.99b	29.75a	6.50b

Tratamento	UD 2									
	pH		Ca		Mg		K		P	
	Base da planta	Pilha	Base da planta	Pilha	Base da planta	Pilha	Base da planta	Pilha	Base da planta	Pilha
	----H ₂ O-----		-----		cmol _c .dm ⁻³ -----		-----		----mg.dm ⁻³ ----	
SAF _{Flosec} -BD	6.25a	6.37a	4.83a	4.74a	1.18a	1.14a	0.22a	0.22a	27.17a	6.25b
SAF _{Flosec} -AD	6.13a	6.33a	4.71a	5.70a	1.08a	1.24a	0.21a	0.19a	16.08a	10.33a
Monocultivo I	5.20a	5.42a	2.76b	4.33a	0.51b	0,79a	0.15a	0.99b	29.75a	6.50b

Tratamento	UD 3									
	pH		Ca		Mg		K		P	
	Base da planta	Pilha	Base da planta	Pilha	Base da planta	Pilha	Base da planta	Pilha	Base da planta	Pilha
	----H ₂ O-----		-----		cmol _c .dm ⁻³ -----		-----		----mg.dm ⁻³ ----	
SAF _{Past} -1	5.92a	5.96a	3.43a	4.00a	1.25a	1.26a	0.20a	0.18a	20.17a	17.25a
SAF _{Past} -2	5.89a	5.81a	2.98a	3.15 ^a	1.05a	0.99a	0.13a	0.11a	22.58a	18.20a
Monocultivo II	5.26a	5.52a	1.93b	2.89 ^a	0.56a	0,84a	0.12a	0.07a	21.50a	7.75b

2.2.5 Análise estatística

Foi usado One e Two-way ANOVA para testar o efeito de sistemas e de sistemas e locais, respectivamente, sobre PCM e variáveis químicas do solo. Essas análises foram executadas separadamente por UD. Foi testada a normalidade dos dados com o teste Kolmogorof-Smirnoff e comparadas as médias com o teste Tukey ($p < 0,05$). As análises foram realizadas nos programas estatísticos Bioestat 5.3 e SigmaPlot® versão 12.0 (SYSTAT SOFTWARE. INC., EUA, 2006) para a análise estatística.

2.3 Resultados

Colonização Micorrízica na palma de óleo cultivada em SAFs e monocultivo

Em todas as UD's, a porcentagem de colonização micorrízica (PCM) da palma de óleo foi significativamente maior ($p < 0,01$) nos sistemas agroflorestais do que no monocultivo e não houve diferença entre os tipos de SAFs (Figura 6) dentro de cada UD.

Efeito de local de amostragem sobre a disponibilidade de nutrientes e colonização micorrízica

Houve variação na disponibilidade de nutrientes, especialmente fósforo, entre as zonas de manejo dos sistemas estudados (Tabela 7). Nos sistemas agroflorestais, apenas o SAF_{Pomar}-BD apresentou maior concentração de Mg na base da planta em relação a pilha. Nos monocultivos, o monocultivo I mostrou maior concentração de Ca, Mg e K na pilha em relação a base da planta e o monocultivo II mostrou maior concentração de Ca na pilha.

Em relação a disponibilidade de fósforo nas zonas de manejo, o SAF_{Pomar}-BD apresentou aproximadamente o dobro de P na base da planta em relação a pilha ($p = 0,0039$) e o SAF_{Flosec}-BD mostrou concentração de P aproximadamente 3 vezes maior na base da planta em relação a pilha ($p < 0,01$). Nos monocultivos a concentração de P na base da planta também foi significativamente maior em relação a pilha. Para o monocultivo I houve um incremento de aproximadamente 4 vezes ($p < 0,01$) e monocultivo II aproximadamente 3 vezes ($p < 0,01$).

Com exceção do monocultivo I, em todos os outros sistemas em que o teor de P variou entre zonas de manejo, também houve variação da PCM (Tabela 8), que aumentou significativamente na pilha onde a disponibilidade de P foi menor. No SAF_{Pomar}-BD houve um aumento de PCM em aproximadamente 20% ($p = 0,034$) e no SAF_{Flosec}-BD a PCM aumentou

em 32% ($p=0,016$). No monocultivo II a PCM na pilha aumentou 52% em relação a base da planta ($p=0,034$).

Figura 6- Porcentagem de Colonização Micorrízica (PCM) nos tratamentos: Sistemas Agroflorestais e Monocultivos. (A) Tratamentos localizados na UD1. (B) Tratamentos localizados na UD2. (C) Tratamentos localizados na UD3. Dados são médias \pm desvio padrão, $n=12$. A diferença significativa foi avaliada pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

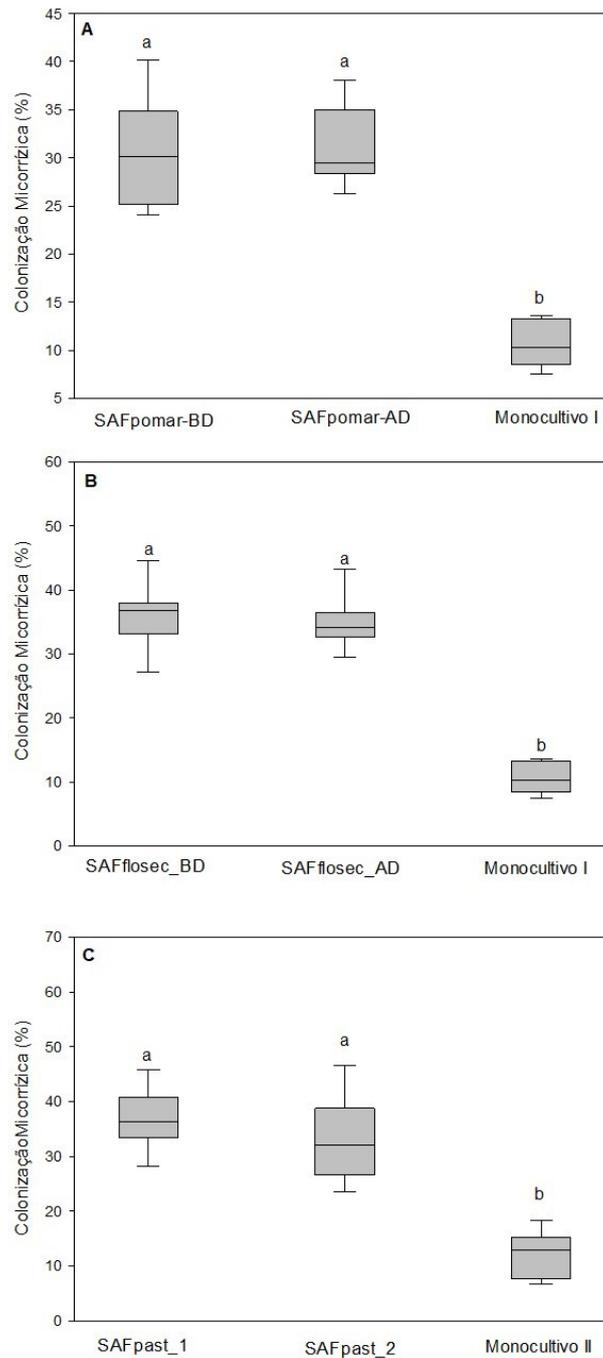


Tabela 8- Colonização micorrízica (%) nas zonas de manejo dos sistemas nas UD's 1, 2 e 3.

Sistemas	UD 1		Sistemas	UD 2		Sistemas	UD 3	
	Ponto de coleta			Ponto de coleta			Ponto de coleta	
	Base da planta	Pilha		Base da planta	Pilha		Base da planta	Pilha
SAF _{Pomar} -BD	29.25Ab±10.3 3	35.42A a±8.27	SAF _{Flosec} - BD	32.67Ab±7.24	43.17A a±7.24	SAF _{Past} -1	29.83Aa±13.9 7	36.50Aa±1 0.31
SAF _{Pomar} -AD	29.83Aa±5.73	30.42A a±7.86	SAF _{Flosec} - AD	31.83Aa±13.4 2	38.75A a±9.49	SAF _{Past} -2	33.17Aa±8.17	31.42Aa±1 0.10
Mono I	10.42Ba±5.58	10.75Ba ±5.91	Mono I	10.42Ba±5.58	10.75Ba ±5.91	Mono II	9.75Bb±4.33	14.83Ba±7. 47

Letra maiúscula indica diferença significativa dos locais de amostragem em sistemas diferentes e minúscula nos locais de amostragem no mesmo sistema. Dados são médias ± desvio padrão, n=6. A diferença significativa foi avaliada pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

2.4 Discussão

Colonização micorrízica em palma de óleo é maior nos SAFs do que no monocultivo

Os resultados sugerem que as condições para a colonização micorrízica da palma de óleo foram mais favoráveis nos sistemas agroflorestais do que no monocultivo. De fato, a colonização micorrízica na palma de óleo foi aproximadamente 3,5 vezes maior nos SAFs do que no monocultivo (Figura 6). Esse padrão de maior colonização micorrízica nos SAFs ocorreu independentemente da diferença de histórico de uso da terra entre os sítios e das zonas de manejo (Tabela 8). O presente estudo sugere que o favorecimento à colonização micorrízica nos SAFs pode estar associado à influência de (a) diversidade de espécies e/ou (b) manejo do solo.

A diversidade de espécies influencia a micorrização por meio do maior volume de raízes em diferentes profundidades do solo (KUYPER et al., 2004) e pela maior probabilidade de ocorrência de plantas com elevada susceptibilidade à colonização micorrízica (URCELAY;

DÍAZ, 2003). Uma maior variedade de espécies vegetais hospedeiras nos sistemas agroflorestais (Tabela 6) pode exercer um importante papel na manutenção de propágulos ativos de FMAs no solo, funcionando como um banco *in vivo* de inóculos (RICALDE; DHILLION, 2003). Assim, em um sistema mais diversificado, a colonização micorrízica torna-se mais dinâmica, aumentando as chances de compartilhamento de rede de hifas com outras espécies de plantas vizinhas, como culturas consorciadas (INGLEBY et al., 2007; WALDE et al., 2012), incluindo espécies perenes, como a palma de óleo neste estudo. Várias pesquisas vêm destacando o papel da rede de hifas como um elemento chave na interconexão das raízes das plantas no solo, o que gera aumento da colonização micorrízica e do fluxo de transferência de nutrientes entre as raízes das plantas (SIMARD et al., 2012; VAN DER HEIJDEN et al., 2009).

A hipótese deste estudo na qual a palma de óleo apresentaria maior PCM em sistemas com maior diversidade de espécies plantadas. De fato, foi confirmada nas 3 UD's, nos quais foi encontrado maior PCM nos SAFs do que nos monocultivos. Consistentemente com esta hipótese, deveria também ter encontrado diferenças em PCM entre o SAF com alta diversidade de plantas e o SAF com baixa diversidade de plantas na UD 2, onde claramente havia uma maior diferença de diversidade vegetal entre SAFs. O índice de diversidade Shannon-Weaver (H') variou largamente entre SAFs da UD 2 (SAF_{Flosec}-BD: $H' = 0,88$ e SAF_{Flosec}-AD: $H' = 1,59$) (BARROS, 2019).

Contudo, a ausência de diferença significativa entre os sistemas diversificados nos sítios experimentais UD-1 e UD-2 sugere que a PCM pode depender mais do papel de espécies específicas do que da diversidade como um todo. Valores altos de PCM no SAF_{Pomar}-BD e SAF_{Flosec}-BD podem ser atribuídos à presença de espécies-chave reconhecidamente micotróficas, como *Gliricidia sepium* (JALONEN et al., 2013; OKON et al., 1996) e *Inga edulis* (IGLESIAS et al., 2011). A inserção de espécies micotróficas nos sistemas de cultivo

tem mais sucesso na manutenção e multiplicação de propágulos de FMAs em relação as espécies pouco micotróficas (PLENCHETTE et al., 2004).

O manejo do solo pode também ter sido outro fator importante na diferença de PCM entre SAFs e monocultivos. Vários estudos demonstraram que o manejo orgânico do solo resulta em aumento do potencial de colonização nas raízes quando comparado a cultivos convencionais (OEHL et al., 2004; GRYNDLER et al., 2009). O manejo orgânico do solo nos SAFs pode ter estimulado a PCM por meio de efeitos diretos e indiretos.

O efeito direto está relacionado ao baixo impacto negativo sobre micorrizas em relação ao manejo convencional, que geralmente utiliza produtos químicos (herbicidas, pesticidas e fungicidas) reconhecidamente supressores da colonização micorrízica e do potencial infectivo no solo (JAMIOLKOWSKA et al., 2018; JANSA et al., 2006). Estudos recentes têm mostrado que manejos menos intensivos do solo, como o orgânico, em geral preservam mais a diversidade dos FMAs e melhoram o potencial da colonização micorrízica em relação aos cultivos convencionais (GOTTSHALL et al., 2017).

O efeito indireto do manejo orgânico está relacionado à melhoria nas condições de solo que, por sua vez, favoreceriam a PCM. Por exemplo, a adição de matéria orgânica no solo aumenta a porosidade e reduz a resistência mecânica no solo, favorecendo a ampliação da rede de hifas (JONER; JAKOBSEN, 1995).

Variação da disponibilidade de nutrientes e PCM entre zonas de manejo

O estudo mostrou que o processo de adubação nas três UD's produziu resultados diferentes na disponibilidade de nutrientes entre as zonas de manejo nos sistemas SAFs (SAF_{Pomar}-BD e SAF_{Fiose}-BD) e nos monocultivos. Exceto no monocultivo I, nos demais sistemas em que houve variação de nutrientes entre zonas de manejo, houve também variação da PCM (Tabela 7 e 8).

Os FMAs podem ser sensíveis à variação na disponibilidade de nutrientes. De modo geral, a colonização micorrízica é inibida em condições de alta fertilidade do solo e favorecida pela baixa fertilidade do solo (JANSA et al., 2006). A variação da concentração de Ca, Mg e K no solo, em geral, apresenta pouco efeito regulatório sobre a colonização micorrízica, sobretudo quando o solo não apresenta déficit desses nutrientes (CLARK; ZETO, 2000), como é o caso das áreas de manejo desse estudo (Tabela 7).

O P é o macronutriente que apresenta maior capacidade de regular a micorrização nas plantas (JOHNSON, 1993) e pode ter exercido um papel importante na variação de PCM entre as zonas de manejo dos sistemas SAF_{Pomar}-BD, SAF_{Flose}-BD e monocultivo II. Esses sistemas apresentaram menor disponibilidade de P na pilha em relação à base da planta (Tabela 7) e maior PCM na pilha em relação à base da planta (Tabela 8).

A colonização micorrízica geralmente é reduzida quando a planta não é limitada pela disponibilidade de P no solo (GOSS et al., 2017; KAHILUOTO et al., 2009). No caso da palma de óleo, as doses ótimas de P no solo para o crescimento da planta, em geral, são maiores que 10 mg dm⁻³ (CORLEY; TINKER, 2016; PHOSRI et al., 2010). Portanto, possivelmente a baixa disponibilidade de P na pilha em relação a base da planta, estimulou o aumento da colonização micorrízica na raiz da palma de óleo nesta zona de manejo em SAF_{Pomar}-BD, SAF_{Flose}-BD e monocultivo II.

No monocultivo I, apesar da diferença significativa de P e outros nutrientes nas zonas de manejo, não foi observada diferença de PCM entre a pilha e a base da planta. Possivelmente, outros fatores controladores da simbiose micorrízica, como histórico da área, presença de biocidas, pouca presença de raízes e erosão do solo, podem ter influenciado a micorrização neste sistema.

Os resultados deste estudo podem auxiliar pesquisas futuras sobre o papel da composição de espécies dos SAFs na colonização micorrízica da palma de óleo em condições

de campo e na adoção de modelos mais sustentáveis de manejo desse cultivo para a Amazônia.

2.5 Conclusões

A colonização micorrízica na palma de óleo é favorecida nos SAFs em relação ao monocultivo, possivelmente devido à rede de micélio fúngico e à presença de espécies hospedeiras nos sistemas agroflorestais. A maior diversidade de espécies de plantas nos SAFs do que no monocultivo provavelmente não foi o principal fator isoladamente *per se* a favorecer a colonização micorrízica na palma de óleo, mas, sim, a presença de espécies hospedeiras (e.g., *Gliricidia sepium* e *Inga edulis*).

Nas zonas de manejo das áreas de estudo, a menor disponibilidade de P na pilha em relação à base da planta pode ter estimulado o aumento da colonização micorrízica nas raízes da palma de óleo localizadas naquela zona de manejo. O cultivo de palma de óleo em sistemas agroflorestais é importante para a manutenção e melhor desenvolvimento da colonização micorrízica durante a fase adulta dessa espécie.

Agradecimentos

Agradecemos aos agricultores Sr. Jailson Takamatsu, Sr. Ernesto Suzuki e Sr. Cláudio Sugaya por concederem permissão para a pesquisa nas áreas experimentais. À equipe do Laboratório de Análises de Sistemas Sustentável (LASS) da Embrapa Amazônia Oriental e as instituições: Natura Inovação e Tecnologia de Produtos Ltda, Cooperativa Agrícola Mista de Tomé-Açu (CAMTA) e Embrapa Amazônia Oriental responsáveis pela elaboração e manutenção do Projeto “Dendê em Sistemas Agroflorestais na agricultura familiar” e a Agência Americana para o Desenvolvimento Internacional (United States Agency for International Development, USAID) responsável pelo apoio financeiro deste projeto e da

pesquisa. Ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa de SSV (processo 312038/2015-1).

Referências

BAENA, A., R. C., FALESI, I. C. **Avaliação do potencial químico e físico dos solos sob diversos sistemas de uso da terra na Colônia Agrícola de Tomé-Açu, Estado do Pará.** Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1999. 22p.

BAIRD, J.; WALLEY, F.L.; SHIRTLIFE, S.J. Arbuscular Mycorrhizal Fungi Colonization and Phosphorus Nutrition in Organic Field Pea and Lentil. **Mycorrhiza**, v. 20, n. 8, Nov. 2010.

BARROS, P.C. **Produtividade primária líquida de sistemas agroflorestais com palma de óleo no Nordeste Paraense.** Orientador: Steel Silva Vasconcelos. 2019. Tese (Doutorado em Ciências Ambientais) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Belém, 2019.

BERRUTI, A.; LUMINI, E.; BALESTRINI, R.; Bianciotto, V. Arbuscular mycorrhizal fungi as natural biofertilizers: Let's benefit from past successes. **Frontiers in Microbiology**, v. 6, n. 1559, Jan. 2016.

CARDOSO, I.; KUYPER, T. Mycorrhizas and Tropical Soil Fertility. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. v. 116, p. 72–84, Ago. 2006.

CHU, E.Y. **Influência dos fungos micorrízicos arbusculares e níveis de adubação do solo no crescimento inicial de mudas de dendê.** Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1997. 20 p.

CLARK, R.B.; ZETO, S.K. Mineral Acquisition by Arbuscular Mycorrhizal Plants. **Journal of Plant Nutrition**. v. 23, n. 7, p. 867–902, Jul. 2000.

COHEN, M.J.; DUNNE, E.J.; BRULAND, G.L. Spatial Variability of Soil Properties in Cypress Domes Surrounded by Different Land Uses. **Wetlands**. v. 28, n. 2, p. 411-22, Jun. 2008.

CORLEY, R.H.V.; TINKER, P.B. **The Oil Palm**. 4 ed. Oxfor: Blackwell Science, Ltd. 2016. *E-book* (592 p.). ISBN: 978-0-470-75036-0. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-br/The+Oil+Palm,+4th+Edition-p-9780470750360>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 3. ed. Brasília,DF: Informação Tecnológica, 2017. 628 p.

GALINDO-CASTAÑEDA, T.; ROMERO, H. M. Mycorrhization in oil palm (*Elaeis guineenses* and *E. oleifera* x *E. guineenses*) in the pre-nursery stage. **Agronomía Colombiana**, v. 31, n. 1, p. 95-102, 2013. ISSN 0120-9965. Disponível em: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S0120-99652013000100012

GOSS, M. J., CARVALHO, M.; BRITO, I. Functional diversity of mycorrhiza and sustainable agriculture: management to overcome biotic and abiotic stresses. [S.l.]: Elsevier/Academic Press, 2017.

GOTTSHALL, C. B.; COOPER, M.; EMERY, S. M. Activity, diversity and function of arbuscular mycorrhizae vary with changes in agricultural management intensity. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. v. 241, n. 1, p. 142–149, Abr. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880917301329>

GRYNDLER, M.; HRSELOVÁ, H.; CAJTHAML, T.; HAVRANKOVA, M.; REZACOVA, V.; GRYNDLEROVA, H.; LARSEN, J. Influence of soil organic matter decomposition on arbuscular mycorrhizal fungi in terms of asymbiotic hyphal growth and root colonization. **Mycorrhiza**, v. 19, n. 4, p. 255–266, Abr. 2009. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00572-008-0217-y>.

HODGE, A. Plant nitrogen capture from organic matter as affected by spatial dispersion, interspecific competition and mycorrhizal colonization. **New Phytologist**. v. 157, p. 303–314. 2003.

INGLEBY, K.; WILSON, J.; MUNRO, R. C.; CAVERS, S. Mycorrhizas in agroforestry: spread and sharing of arbuscular mycorrhizal fungi between trees and crops: complementary use of molecular and microscopic approaches. **Plant and Soil**, v. 294, n. 1, p. 125–136. mai. 2007.

IGLESIAS, L.; SALAS, E.; LEBLANC, H. A.; NYGREN, P. Response of *Theobroma cacao* and *Inga edulis* seedlings to cross-inoculated populations of arbuscular mycorrhizal fungi. **Agroforestry Systems**, v. 83, n. 63, p. 63–73, Abr. 2011.

JAMIOLKOWSKA, A.; KSIEZNIAK, A.; GALAZKA, A.; HETMAN, B.; KOPACKI, M.; SKWARYLO-BEDNARZ, B. Impact of abiotic factors on development of the community of arbuscular mycorrhizal fungi in the soil: a review. **International agrophysics**, v. 32, n. 1, p. 133-140, 2018.

JALONEN, R.; TIMONEN, S.; SIERRA, J.; NYGREN, P. Arbuscular mycorrhizal symbioses in a cut-and-carry forage production system of legume tree *Gliricidia sepium* and fodder grass *Dichanthium aristatum*. **Agroforestry Systems**. v. 87, n. 2, p. 319–330, Abr. 2013.

JANSA, J.; WIEMKEN, A.; FROSSARD, E. The effects of agricultural practices on arbuscular mycorrhizal fungi. **Geological Society**, v. 266, p. 89–115, Jan. 2006.

JEFFRIES, P.; GIANINAZZI, S.; PEROTTO, S.; TURNAU, K.; BAREA, J. The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. **Biology and Fertility of Soils**, v. 37, n. 1, p. 1-16, Jan. 2003.

JOHNSON, N.C. Can fertilization of the soil select less mutualistic mycorrhizae? **Ecological Applications**. v. 3, n. 4, p. 749-757, Jan. 1993.

JONER, E.J.; JAKOBSEN, I. Growth and extra cellular phosphatase activity of arbuscular mycorrhizal hyphae as influenced by soil organic matter. **Soil Biol Biochem**, v. 27, n. 9, p. 1153-1159, Set. 1995.

JOURDAN, C. Root system architecture and gravitropism in the oil palm. **Annals of Botany**, v. 85, n. 6, p. 861–868, Jun. 2000.

JOURDAN, C.; REY, H. Modelling and simulation of the architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. **Plant and Soil**, v. 190, p. 217–233, Mar. 1997.

KAHILUOTO, H.; KETOJA, E.; VESTBERG, M. Contribution of arbuscular mycorrhiza to soil quality in contrasting cropping systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. v. 134, p. 36-45, Jun. 2009.

KUYPER, T.W.; CARDOSO, I.M.; ONGUENE, N.A.; NOORDWIJK, M.M. Managing mycorrhiza in tropical multispecies agroecosystems. In: NOORDWIJK, M.; CADISCH, G.; ONG, C.K. (ed.). **Below-ground interactions in tropical agroecosystems: concepts and models with multiple plant components**. Wallingford: CABI Publishing, 2004. p.243-258.

KUZYAKOV, YAKOV. Priming Effects: Interactions between Living and Dead Organic Matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 9 p. 1363–1371, Set. 2010.

MCGONIGLE, T.P.; MILLER, M.H.; EVANS, D.G.; FAIRCHILD, G.L.; SWAN, J.A. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytologist**, v. 115, p. 495-501, Jul. 1990.

MÉNDEZ, Y.D.; ACEVEDO, R.; ROMERO, E.C. Efecto de la micorrización arbuscular sobre el crecimiento y desarrollo de plántulas de palma de aceite en etapa de previvero. **Ceniavances**, v. 175, p. 1-4, Nov. 2013.

OEHL, F.; SIEVERDING, E.; MÄDER, P.; DUBOIS, D.; INEICHEN, K.; BOLLER, T.; WIEMKEN, A. Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. **Oecologia**, v. 138, n. 4, p. 574–583, mar. 2004.

OKON, I.E.; OSONUBI, O.; SANGINGA, N. Vesicular-arbuscular mycorrhiza effects on *Gliricidia sepium* and *Senna siamea* in a fallowed alley cropping system. **Agroforestry Systems**, v. 33, n. 2, p. 165–175, Fev. 1996.

PACHECO, N.A.; BASTOS, T.X. Freqüência diária de chuva em Tomé-Açu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., 2008, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo: SBMET, 2008. Disponível em: <https://www.ainfo.cnptia.embrapa.br/> Acesso em: 05/04/2018

PHILLIPS, J.M.; HAYMAN, D.S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. **Transactions of British Mycological Society**, v. 55, p. 158-162, Ago. 1970.

PHOSRI, C.; RODRIGUEZ, A.; SANDERS, I. R.; JEFFRIES, P. The role of mycorrhizas in more sustainable oil palm cultivation. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 135, n. 3, p. 187–193. jan. 2010.

PLENCHETTE, C.; CLERMONT-DAUPHIN, C.; MEYNARD, J.M.; FORTIN, J. A. Managing arbuscular mycorrhizal fungi in cropping systems. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 85, p. 31–40, Jan. 2004.

RICALDE, S.L.; DHILLION, S.S. Endemic *Mimosa* species can serve as mycorrhizal “resource islands” within semiarid communities of the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. **Mycorrhiza**, v. 13, p. 129-136, Out. 2003.

RICHARDSON, ALAN E. *et al.* “Plant and Microbial Strategies to Improve the Phosphorus Efficiency of Agriculture”. **Plant and Soil**, v. 349, n 1–2, p. 121–56, Dez. 2011. *DOI.org (Crossref)*, doi:10.1007/s11104-011-0950-4.

RODRIGUEZ, A.; SANDERS, I.R. The role of community and population ecology in applying mycorrhizal fungi for improved food security. **ISME Journal**, v. 9, n. 5, p. 1053–1061, Mai. 2015.

SAYER, E.J.; JOSEPH, S.; WRIGHT, S.T.; TANNER, S.J. Variable responses of lowland tropical forest nutrient status to fertilization and litter manipulation. **Ecosystems**. v. 15, p. 387-400, Jan. 2012.

SIMARD, S. W.; BEILER, K. J.; BINGHAM, M. A.; DESLIPPE, J.R.; PHILIP, L.J.; TESTE, F.P. Mycorrhizal networks: Mechanisms, ecology and modelling. **Fungal Biology Reviews**, v. 26, n. 1, p. 39–60, 2012.

URCLEY, C.; DÍAZ, S. The Mycorrhizal Dependence of Subordinates Determines the Effect of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on Plant Diversity: Arbuscular Mycorrhizas and Plant Diversity. **Ecology Letters**. v. 6, n. 5, p. 388–91, Mai. 2003.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; HORTON, T. R. Socialism in soil? The importance of mycorrhizal fungal networks for facilitation in natural ecosystems. **Journal of Ecology**, v. 97, p. 1139–1150, Out. 2009.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; MARTIN, F. M.; SELOSSE, M.A.; SANDERS, I. R. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. **New Phytologist**, v. 205, n. 4, p. 1406–1423, Mar. 2015.

VAN NOORDWIJK, M.; LAWSON, G.; SOUMANÉ, A.; GROOT J.J.R.; HAIRIAH, K. Root distribution of trees and crops: competition and/or complementarity. *In*: ONG, C. K.; BLACK R.C.; WILSON, J. (org.) **Tree-crop interactions: a physiological approach**. 2 ed. Wallingford: CAB International, 1996. p. 319–364.

WALDER, F.; NIEMANN, H.; NATARAJAN, M. Mycorrhizal Networks: Common Goods of Plants Shared under Unequal Terms of Trade. **Plant Physiology**. v. 159, p. 789–797, Jun. 2012.

CAPÍTULO 3 CULTIVO DE PALMA DE ÓLEO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS ORGÂNICOS AUMENTA O RESERVATÓRIO DE P MODERADAMENTE LÁBIL NO SOLO EM RELAÇÃO AO MONOCULTIVO NA AMAZÔNIA

Resumo

O fósforo (P) é o nutriente mais limitante para a produção agrícola nos trópicos, devido ao processo denominado adsorção no qual a maior parte do fosfato presente no solo fica retido nos óxidos de ferro e alumínio. Na Amazônia a baixa disponibilidade de P tem afetado a produção agrícola familiar. Os Sistemas Agroflorestais (SAFs), podem ser uma alternativa sustentável e de baixo custo econômico para o fornecimento e manutenção das reservas de P no solo nos sistemas agrícolas amazônicos. Porém, existe pouca informação sobre a contribuição dos SAFs na distribuição e labilidade de P nesse ecossistema. O objetivo deste estudo foi avaliar as frações lábeis e moderadamente lábeis de P (orgânico e inorgânico) no solo em cultivo de palma de óleo (*Elaeis guineensis*), inserida em dois SAFs orgânicos com diferente composição vegetal comparado com cultivo convencional (monocultura). As frações de P foram determinadas através do método sequencial de extração. Os resultados mostraram que os SAFs não diferiram do monocultivo no fornecimento de P lábil e apresentaram maior reservatório de P moderadamente lábil, esses resultados foram atribuídos à capacidade dos SAFs em aumentar as concentrações de Po lábil (Po NaHCO₃) e moderadamente lábil (Po NaOH 0,1) no solo. O SAF com maior diversidade vegetal apresentou aumento nas frações lábeis de P (P resina e Pi NaHCO₃) e moderadamente lábil (Po NaOH 0,1) em sua zona de manejo. A inserção de Sistemas Agroflorestais orgânicos no cultivo de palma de óleo na Amazônia representa um tipo de manejo promissor tanto para o fornecimento de P disponível quanto para a manutenção de reservas de P no solo.

Palavras-chave: Fracionamento de fósforo, manejo do solo, agricultura amazônica.

Abstract

Phosphorus (P) is the most limiting nutrient for crop production in weathered tropical soils, due to the adsorption in which most of the phosphate present in the soil is retained in iron and aluminum oxides. In the Amazon, the low availability of P has affected agriculture crops.

Agroforestry Systems (AS) can be a sustainable and economical alternative to supply and keep soil P reserves in Amazonian agriculture crops. However, there is little information about the contribution of AS to P distribution and lability in this ecosystem. The aim of this study was to evaluate the labile and moderately labile fractions of P (organic and inorganic) in the soil of oil palm cultivation (*Elaeis guineensis*), inserted in two organic AS with different plant composition and compare with conventional treatment (monoculture). The P fractions were determined by the sequential extraction method. The results showed that Agroforestry Systems did not differ from monoculture in the supply of labile P and have a larger pool of moderately labile P, these results were attributed to the ability of AS to increase the concentrations of labile (NaHCO₃-Po) and moderately labile (NaOH 0,1-Po) in the soil. The AS with higher plant diversity showed increase in the labile fractions of P (P resin and NaHCO₃-Pi) and moderately labile (NaOH 0.1-Po) in their management zone. The insertion of organic agroforestry in oil palm cultivation in the Amazon represents a promising type of management both for the supply of available P and sustain of soil P reserves.

Key words: Phosphorus fractionation, soil management, Amazonian agriculture.

3.1 Introdução

O fósforo (P) constitui um dos elementos essenciais a vida e para a produção de alimentos no mundo, porém em muitas áreas agrícolas especialmente nos trópicos o P é o elemento mais limitante para a produção (NZIGUHEBA et al., 2016; SCHOLZ et al., 2014). O elevado grau de intemperismo na maioria dos solos tropicais, faz com que a maior parte do P esteja indisponível para a planta, devido ao fenômeno da adsorção que é o processo pelo qual o P fica retido na superfície das partículas do solo (BUNEMANN et al., 2011; ROY, 2016), obrigando os produtores a aplicar maiores quantidades de fosfatos. Ressalta-se que no Brasil as minas de rochas fosfáticas são limitadas e por isso cerca de 60% dos fertilizantes inorgânicos de P usados na agricultura são importados (WITHERS et al., 2018), além disso um outro problema futuro será a escassez das reservas minerais mundiais de P, cuja a longevidade estimada está até 80 ou 90 anos (BUNEMANN et al., 2011).

O cultivo de palma de óleo (*Elaeis guineensis*), necessita uma alta demanda de fertilizantes fosfatado, especialmente nos estágios iniciais da planta (PHORSI et al., 2010). Nas últimas décadas, na região amazônica ocorreram fortes pressões com a entrada da palma de óleo, caracterizada principalmente pela monocultura (HOMMA, 2016). O alto valor econômico agregado a essa *commoditie*, vem aumentando ainda mais a procura pelo cultivo dessa espécie, especialmente na região nordeste do estado do Pará, conhecido como polo do dendê (CORDOBA et al., 2019).

O estado do Pará é o maior produtor de palma de óleo do país, em 2016 foi responsável por 88% da produção nacional (MAPA, 2018). Neste mesmo ano foram cultivadas no estado uma área de aproximadamente 207.253 ha, e as projeções para 2020 é de que essa área seja de aproximadamente 330.000 ha (MAPA, 2018). Alguns estudos mostraram que o modelo produtivo de palma de óleo, baseado na monocultura convencional, ameaça a conservação da floresta, a biodiversidade e afetam o meio de vida das comunidades tradicionais locais (BACKHOUSE, 2015; VIJAY et al., 2016).

A inserção da palma de óleo em Sistemas Agrofloretais (SAFs) pode configurar um modelo produtivo mais sustentável e de baixo custo para o produtor na Amazônia em relação ao monocultivo convencional. Os SAFs podem ser uma alternativa para reduzir a dependência do P importado e garantir maior eficiência na agricultura amazônica, cuja a deficiência do P limita a produção agrícola em até 90% (MCGRATH et al., 2001), devido à baixa fertilidade natural dos solos e elevada capacidade de adsorção de P pela presença de óxidos de ferro e alumínio.

Poucos trabalhos mostraram a contribuição dos sistemas agrofloretais na disponibilidade de P no solo dos agroecossistemas amazônicos. Sabe-se que os SAFs podem contribuir para uma ciclagem mais eficiente de P nos solos intemperizados da Amazônia, através da maior absorção de P pela presença da extensa rede de raízes no solo e pelo maior

aporte de matéria orgânica vegetal, responsável pela liberação de P através dos processos de decomposição e mineralização (MCGRATH et al. 2000, 2001).

A disponibilidade de P em solos da região amazônica está bastante associada à mineralização de P orgânico, por isso a liberação de P nesses solos depende muito da qualidade do material orgânico que é retornada para o sistema solo-planta (LEHMANN et al., 2001; MARKEWITZ et al., 2004). A contribuição do P retornado ao solo pelos resíduos vegetais dos SAFs ainda não foi bem esclarecida nos agrossistemas tropicais (DAMON et al., 2014).

A distribuição de P nos sistemas agrícolas pode variar de acordo com a área de manejo, uma vez que transformações e disponibilidade de P no solo dependem da ação da atividade microbiana e concentração de matéria orgânica (OLANDER; VITOUSEK, 2004), que podem variar em uma escala local (DIETER et al., 2010). No entanto, poucos trabalhos abordaram a influência das zonas de manejo na disponibilidade de P nos agroecossistemas tropicais. O entendimento da participação dos SAFs e suas áreas de manejo na distribuição das frações de P no solo podem ajudar na adoção de estratégias que visam melhorar a disponibilidade de P na agricultura amazônica.

O objetivo desse estudo foi (1) avaliar as frações lábeis e moderadamente lábeis de P orgânico (Po) e P inorgânico (Pi) do solo no cultivo de palma de óleo inserido em dois tipos de SAFs, manejados organicamente, mas com diferente composição vegetal e comparar com um cultivo convencional de palma de óleo (monocultura) e (2) verificar quais as zonas de manejo (pilha, base da planta e SAF) apresentam diferença na disponibilidade de P dos tratamentos estudados. A hipótese do estudo é que (1) sistemas agroflorestais manejados organicamente contribuem tanto como fonte de P disponível, através P orgânico lábil, quanto estoque de P, através do P orgânico moderadamente lábil e (2) a maior diferença na

disponibilidade de P entre os tratamentos ocorre nas zonas de manejo da pilha da poda das árvores e SAF, devido ao maior aporte de matéria orgânica oriunda dos resíduos vegetais.

3.2 Material e métodos

3.2.1 Área do estudo

O estudo foi realizado em uma propriedade rural, localizada no município de Tomé-Açú (2° 40' 54'' S e 48° 16' 11'' W), no Estado do Pará. O solo da região é classificado como Latossolo Amarelo argiloso (BAENA; FALESI, 1999). O clima é do tipo Ami, conforme a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 26,2 °C e precipitação média anual de 2400 mm (PACHECO; BASTOS, 2008).

Na propriedade foram estudados dois Sistemas Agroflorestais em que a palma de óleo (*Elaeis guineensis*) é uma das culturas-chave no sistema (Tabela 9). Os SAFs foram implantados em área ocupada anteriormente por floresta secundária de aproximadamente 10 anos. Em fevereiro de 2008, mudas do híbrido intraespecífico Tenera foram plantadas com espaçamento de 7,5 m entre linhas e 9,0 m entre plantas.

Cada sistema apresenta uma área de 2 ha, composto por 11 faixas de linhas duplas de palma de óleo, intercaladas com faixa de 15 m (Figura 7A), com diferentes composições de espécies vegetais consorciadas com a palma de óleo (Tabela 9). O SAF que apresenta baixa diversidade vegetal, com apenas duas espécies de plantas (*Gliricidia sepium* e *Inga edulis*), consorciadas com a palma de óleo, foi denominado neste estudo como SAF-Adubadeira. O SAF que apresenta maior diversidade vegetal (13 espécies de plantas diferentes), consorciadas com a palma de óleo, foi chamado de SAF-Biodiverso.

A adubação nos SAFs foi realizada de maneira orgânica a partir da adição de 1 kg de farinha de osso (2 % de N; 20 % de P₂O₅ e 0.12 % de K₂O), 1 kg de torta de mamona (5.44 % de N; 1.91 % de P₂O₅ e 1.54 % de K₂O) e 0.3 kg de fosfato de rocha reativo (ARAD), por

planta (CARVALHO et al., 2014), além disso, periodicamente foi adicionada fitomassa oriunda do manejo da poda da palma de óleo e de outras espécies presentes nos SAFs. Ressalta-se que não houve nenhuma aplicação de produtos químicos sintéticos nesses tratamentos, tais como adubos químicos, herbicidas e fungicidas.

Para efeito comparativo das variáveis estudadas nos SAFs, foi selecionado no mesmo município, um monocultivo de palma de óleo. O monocultivo foi instalado no final do ano de 2006 com plantio de mudas de palma de óleo em cova, no qual foram aplicados 800 g de superfosfato triplo. Em 2007 foram aplicados 200 g de ureia, 100 g de cloreto de potássio, 100 g de sulfato de magnésio, 13 g de bórax e 8 g de micronutrientes, em cobertura na coroa da planta no início e no final do período chuvoso. Atualmente a adubação é mecanizada, 3 a 4 vezes ao ano, na coroa da palma (raio de 2,4 metros) utilizando-se 1 kg da formulação 12-2-20 de NPK. As folhas da palma de óleo também são podadas após cada colheita e depositadas sobre o solo entre as linhas duplas.

3.2.2 Descrição do experimento

Nas áreas experimentais foram estabelecidas aleatoriamente 6 parcelas (30 m x 30 m). Cada parcela incluiu uma linha dupla de palma de óleo, a pilha da poda das folhas da palma de óleo e as espécies vegetais consorciadas (Figura 7A). No monocultivo, as parcelas incluíram 4 linhas de palma de óleo (Figura 7B). Para avaliar a variação espacial da disponibilidade de P, foram coletadas amostras de solo em três zonas de manejo: (1) sob a projeção da copa das plantas de palma de óleo (a aproximadamente 0,6 m da base do estipe) que foram reunidas com amostras entre as plantas de palma de óleo (a aproximadamente 2,5 m da base do estipe), (2) na pilha de folhas da poda e (3) entre as linhas de plantio e entre plantas dos SAFs (Figura 7A).

3.2.3 Coleta do material de estudo

Em cada parcela, foram coletadas com trado (5 cm de diâmetro), três amostras compostas de solo, na camada 0-10 cm, por zona de manejo, no mês de novembro de 2017. Cada amostra composta resultou da reunião de seis amostras simples. No laboratório, as amostras foram secas ao ar, destorradas e passadas em peneira de malha de 2 mm, posteriormente foram colocadas em sacos plásticos identificados até a análise do fracionamento sequencial de P e das propriedades físico-químicas.

3.2.4 Fracionamento sequencial de P

O fracionamento de P foi realizado de acordo com Hedley et al. (1982), modificado por Condon et al. (1985), a partir de 0,5 g de amostras de solo (terra fina seca ao ar - TFSA) em que foram extraídas sequencialmente 6 frações de P a partir de 3 extratores: (1) Resina Trocadora de Ânions (AMI-7001S Membranes International, New Jersey USA), com medida de 1 x 5 cm e 10 mL de solução de HCl 0,5 mol L⁻¹ (fração Pi resina), (2) 10 mL de solução de NaHCO₃ 0,5 mol L⁻¹ com pH a 8.5 (frações Pi NaHCO₃ e Po NaHCO₃) e (3) 10 mL de NaOH 0,1 mol L⁻¹ (frações Pi NaOH 0,1 e Po NaOH 0,1). O Pi dos extratos alcalinos de NaHCO₃ e NaOH foi determinado de acordo com Dick e Tabatai (1977), o P total nos extratos alcalinos foi analisado a partir da digestão com persulfato de amônio e ácido sulfúrico em autoclave conforme USEPA (1971) e o Po foi obtido pela diferença entre P total e P inorgânico. Para avaliar o P dos extratos ácidos foi usada a metodologia proposta por Murphy e Riley (1962).

As frações de P neste estudo foram agrupadas em formas lábeis (P resina, Pi NaHCO₃ e Po NaHCO₃) e moderadamente lábeis (Pi NaOH 0,1, Po NaOH 0,1 e Pi HCl), esse agrupamento é um parâmetro didático utilizado para entender qual fração de P apresenta maior ou menor disponibilidade no solo para a planta (RODRIGUES et al., 2016).

3.2.5 Análise das propriedades físico-químicas do solo

A determinação de Ca^{+2} , Mg^{+2} , Al^{+3} , P total, K^+ , Fe, Zn, Mn, C orgânico, N total, Capacidade de Troca Catiônica (CTC), granulometria e umidade gravimétrica foram conforme a metodologia proposta pela Embrapa (2017), com os seguintes procedimentos: Ca^{+2} , Mg^{+2} e Al^{+3} extraídos por KCl e determinados por absorção atômica (Ca^{+2} e Mg^{+2}) e por titulação (Al^{+3}). Os teores de P, K^+ , Fe, Zn e Mn foram analisados a partir da extração com Mehlich e determinados por absorção atômica (K^+ , Fe, Zn e Mn) e o P por colorimetria. O pH em água foi medido com eletrodo combinado e a CTC foi determinada pela soma do total de bases trocáveis e alumínio. As propriedades físicas em relação às proporções de areia, silte e argila foram determinadas pelo método da pipeta (Embrapa, 2017). Os resultados dessas variáveis estão descritos na tabela 10.

3.2.6 Análise estatística

Foi utilizada two-way ANOVA de medidas repetidas para testar os efeitos dos tratamentos e locais de manejo nas 6 frações de P. O teste Tukey a 5% de significância, foi utilizado para evidenciar as diferenças estatisticamente significativas dos componentes de cada fração de P entre os tratamentos e as zonas de manejo. Antes das análises estatísticas os dados foram testados quanto a homogeneidade e normalidade usando o teste de Kolmogorov – Smirnov e quando necessário foram transformados em log para corrigir desvios das suposições. As análises e gráficos foram realizados nos programas estatísticos Bioestat 5.3 e no SigmaPlot® versão 12.0 (SYSTAT SOFTWARE. INC., EUA, 2006).

Nome Científico	Família	SISTEMAS AGROFLORESTAIS							
		ADUBADEIRA				BIODIVERSO			
		d abs	DAP médi a	h médi a	Nº ind	d abs	DAP médi a	h médi a	Nº ind
<i>Acacia mangium</i> Willd	<i>Fabaceae</i>					5,56	15,55	10,05	2
<i>Adenantha pavonina</i>	<i>Fabaceae</i>					2,78	17,40	8,60	
<i>Bertholletia excelsa bonpl</i>	<i>Lecythidaceae</i>								
<i>Bixa orellana</i> L.	<i>Bixaceae</i>								
<i>Calophyllum brasiliensis</i>	<i>Calophyllaceae</i>					33,33	5,61	6,98	12
<i>Carapa guineenses</i> Aubl.	<i>Meliaceae</i>					25,00	18,31	9,26	9
<i>Elaeis guineensis</i> Jacq.	<i>Arecaceae</i>	75,00	87,93	3,27	27	75,00	76,39	4,06	27
<i>Euterpe oleracea</i>	<i>Arecaceae</i>					244,44	9,72	6,30	88
<i>Gliricidia sepium</i>	<i>Fabaceae</i>	438,89	8,30	4,49	158				
<i>Inga edulis</i>	<i>Fabaceae</i>	177,78	6,87	2,60	64	8,33	7,18	1,08	3
<i>Jacaranda copaia</i> (Aubi.)	<i>Bignoniaceae</i>					2,78	54,40	19,20	1
<i>Lecythis pisonis</i>	<i>Lecythidaceae</i>								
<i>Mangifera indica</i> L.	<i>Anacardiaceae</i>					16,67	5,04	2,95	6
<i>Oenocarpus bacaba</i>	<i>Arecaceae</i>								
<i>Platonia insignis</i> Mart.	<i>Clusiaceae</i>								
<i>Sclerolobium paniculatum</i>	<i>Fabaceae</i>					11,11	30,39	16,18	4
<i>Spondias lutea</i> L.	<i>Anacardiaceae</i>					5,56	26,15	15,50	2
<i>Swietenia macrophylla</i> King	<i>Meliaceae</i>								
<i>Tabebuia</i> spp.	<i>Bignoniaceae</i>					47,22	21,19	9,40	17
<i>Theobroma cacao</i>	<i>Malvaceae</i>					447,22	9,54	4,63	161
<i>Theobroma grandiflorum</i> (Willd. ex Spreng)	<i>Malvaceae</i>					5,56	8,40	3,95	2
Vegetação espontânea	Desconhecida	2,78	3,07	1,85	1				

Tabela 9- Espécies vegetais consorciadas com palma de óleo nos Sistemas Agroflorestais da área de estudo, no município de Tomé-Açu (PA).

d abs = densidade absoluta (número de indivíduos/ hectare); DAP (diâmetro à altura do peito); h (altura) Nº ind (Número total de indivíduos presentes na área). Os valores de DAP e h são médias.

Figura 7- Croqui representativo do local de coleta nos Sistemas Agroflorestais (A) e no monocultivo (B). Os círculos em destaque indicam os locais de coleta das amostras na parcela, onde: (1) Base da planta (0,6 m) e entre plantas de palma de óleo (2,5 m), (2) pilha de folha da poda e (3) entre as linhas de plantio e entre plantas dos SAFs.

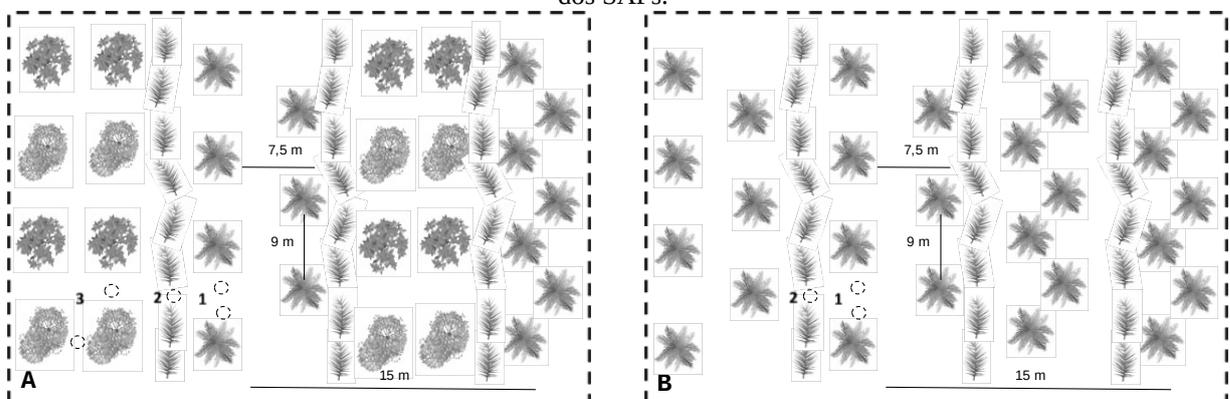


Tabela 10- Características físico-químicas do solo nos tratamentos da área de estudo.

Tratamento	Ca	Mg	Al	H+Al	CTC	K	Fe	Mn	Zn	P	C org	N	pH	Areia	Silte	Argila
	----- cmol _c .dm ⁻³ -----					----- mg.dm ⁻³ -----					----- g.kg -----		H ₂ O	-----g.kg-----		
Adubadeira	3.70	1.09	0.00	6.69	10.29	56.66	85.70	20.41	1.91	6.20	37.46	2.10	6.69	333	134	199
Biodiverso	3.80	0.96	0.00	6.47	10.27	50.54	108.27	24.14	1.86	5.60	33.31	2.03	6.47	329	138	203
Monocultivo	2.70	0.50	0.04	6.00	7.72	82.25	158.87	28.12	1.58	17.20	30.97	3.52	5.96	303	141	253

CTC = Capacidade de Troca Catiônica.

3.3 Resultados

Efeito dos sistemas agroflorestais e do monocultivo nas frações e distribuições de P no solo nos cultivos de palma de óleo

Frações de P lábil

Nas frações de P-lábil, o tratamento SAF-Adubadeira apresentou a menor concentração de P-resina (Figura 8) em relação ao SAF-Biodiverso e monocultivo, por outro lado foi o tratamento com maior concentração de Po lábil (Figuras 8 e 11A e B). O SAF-Biodiverso apresentou maior Pi lábil (Pi NaHCO₃) em relação ao SAF-Adubadeira (Figura 8). A concentração de Pi lábil (Pi NaHCO₃) foi significativamente maior no monocultivo em relação aos SAFs. Não houve diferença significativa na concentração do Plábil (Pi + Po) nos tratamentos (Figura 10).

Frações de P moderadamente lábil

A maior concentração de Pi (Pi NaOH 0,1) foi no monocultivo (Figura 10), porém os SAFs apresentaram maiores concentrações de Po (Po NaOH 0,1). Os SAFS apresentaram maior P moderadamente lábil em relação ao monocultivo (Figura 10). As concentrações de Po NaOH 0,1 e Pi NaOH 0,1 representaram a maior parte do P moderadamente lábil nos SAFs e no monocultivo, respectivamente (Figura 11).

Figura 8- Efeito dos tratamentos nas frações lábeis de fósforo. Dados são médias, n=6. Letras indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

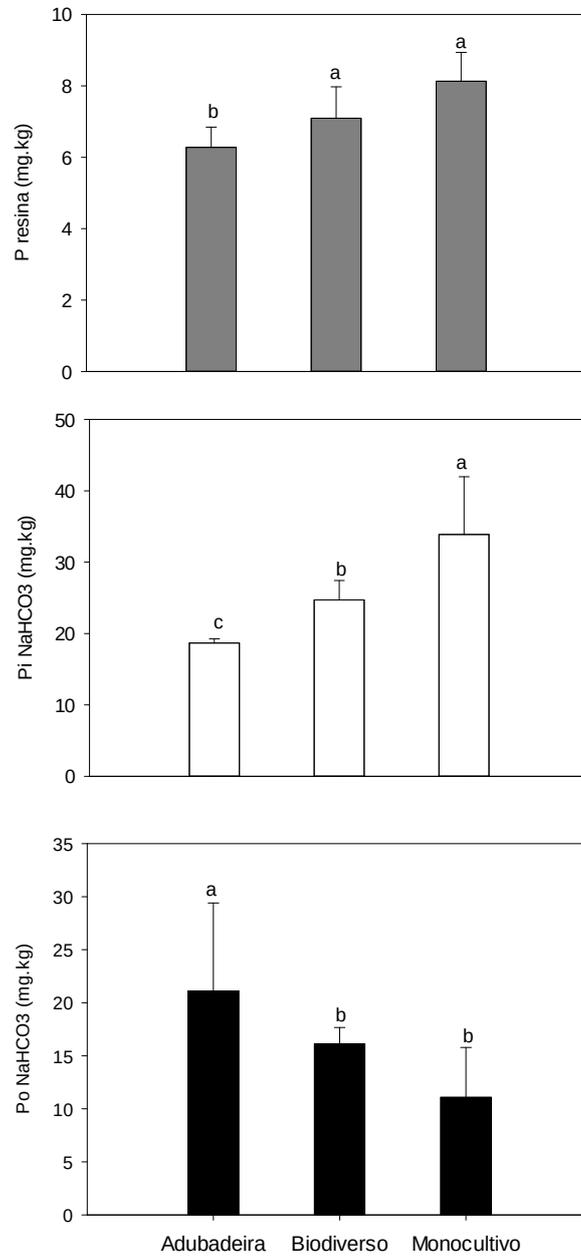


Figura 9- Efeito dos tratamentos nas frações moderadamente lábeis de fósforo. Dados são médias, n=6. Letras indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

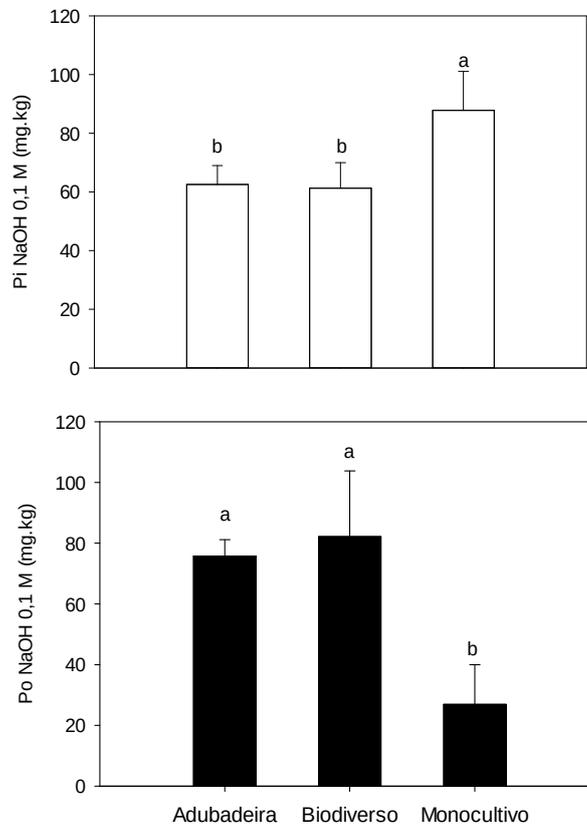


Figura 10- Distribuição das frações totais (Pi e Po) lábeis e moderadamente lábeis entre os tratamentos. Dados são médias, n=12. Letras indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

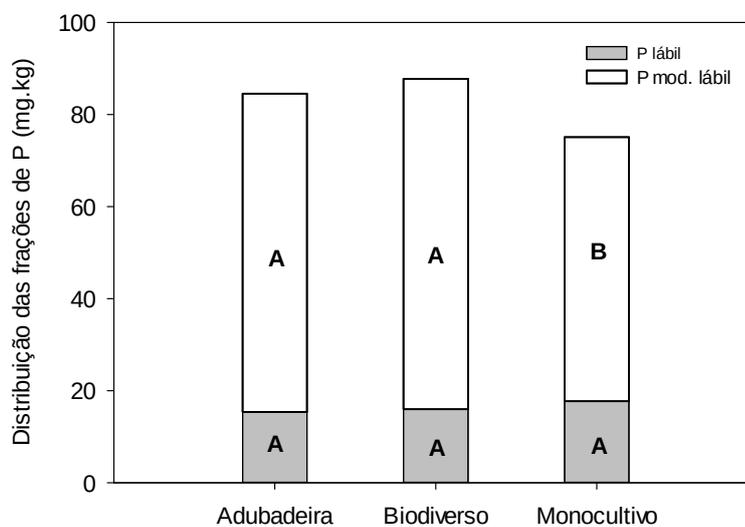
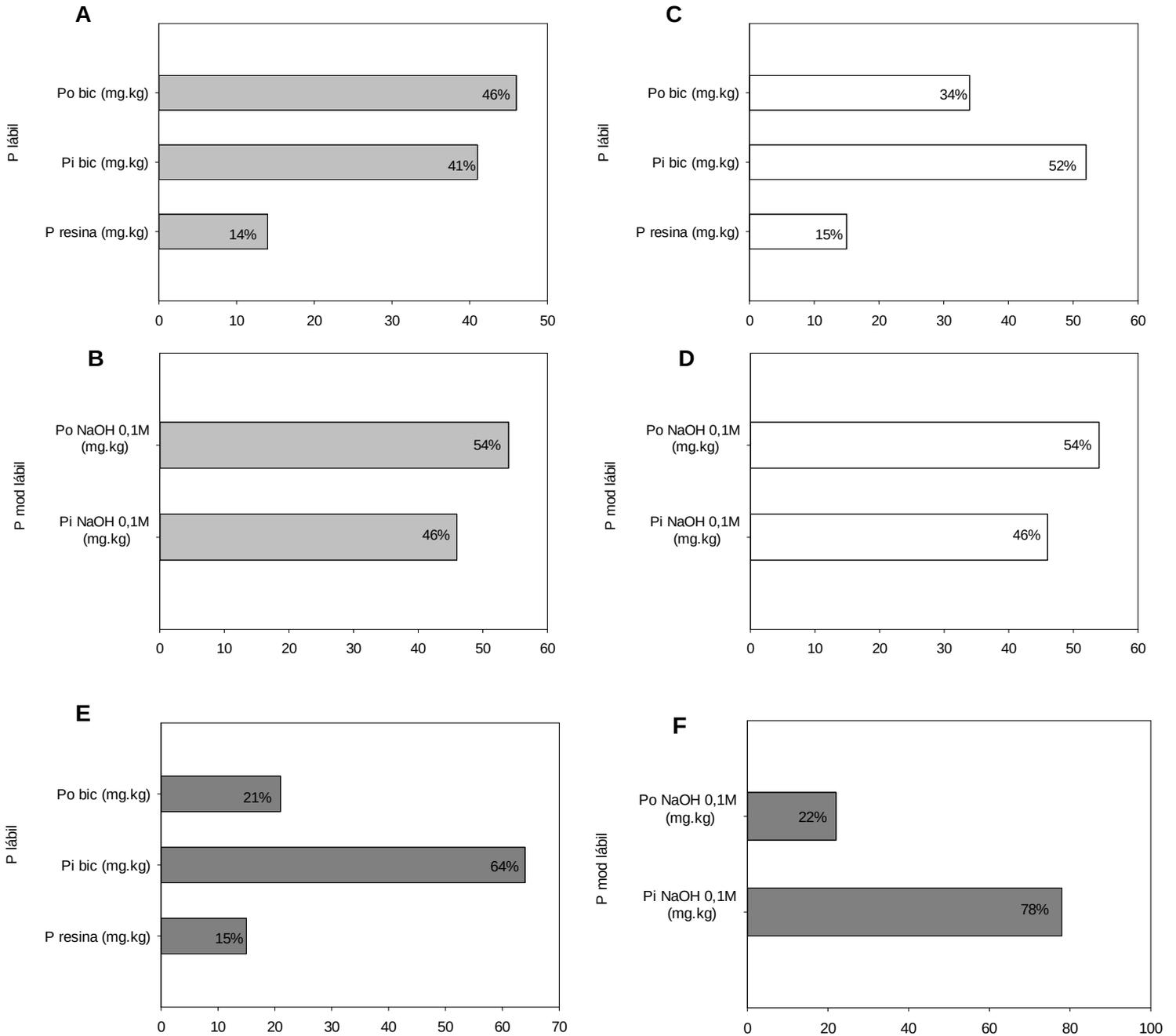


Figura 11- Contribuição percentual das frações lábeis (P lábil) e moderadamente lábeis (P mod lábil), respectivamente nos tratamentos: Adubadeira (A e B), Biodiverso (C e D) e Monocultivo (E e F).



Efeito das zonas de manejo dos tratamentos na distribuição das frações de P no solo

Frações de P lábil

O tratamento Adubadeira apresentou menor concentração de P-resina na zona de manejo da pilha em relação ao monocultivo ($p=0.0259$) e na faixa do SAF em relação ao Biodiverso ($p=0.0259$), o mesmo ocorreu com a fração Pi NaHCO₃ que foi menor

significativamente ($p=0.0038$) na pilha e na base da planta ($p=0.0162$) em relação ao monocultivo e menor significativamente ($p=0.0172$) na faixa do SAF em relação ao Biodiverso. Em relação a fração $Po NaHCO_3$ houve diferença apenas na base da planta dos tratamentos Adubadeira e monocultivo, no qual foi maior significativamente ($p=0.0047$) a fração $Po NaHCO_3$ do tratamento Adubadeira (Tabela 11).

Frações de P moderadamente lábil

O tratamento monocultivo apresentou fração de $Pi NaOH 0,1$ maior significativamente na zona da base da planta ($p=0.0173$) e na zona da pilha ($p=0.0006$) em relação aos SAFs (tabela 11). A fração de $Po NaOH 0,1$ foi maior significativamente nos SAFs em relação ao monocultivo, nas zonas de manejo da base da planta ($p=0.0047$) e na pilha ($p=0.0004$). O Biodiverso apresentou maior fração de $Po NaOH 0,1$ ($p=0.0228$) na zona do SAF em relação a Adubadeira (Tabela 11).

Tratamentos	P resina (mg.kg)			P lábil do solo Pi NaHCO ₃ (mg.kg)			Po NaHCO ₃ (mg.kg)		
	Base da planta	Pilha	SAF	Base da planta	Pilha	SAF	Base da planta	Pilha	SAF
Adubadeira	7.15 a	5.94 b	5.74 b	19.45 b	16.50 b	25,85 b	23.68 a	19.85 a	19.80 a
Biodiverso	7.41 a	7.19 ab	6.68 a	23.37 ab	25.85 ab	34,25 a	16.31 ab	15.03 a	17.07 a
Monocultivo	8.70 a	7.56 a	-----	33.47 a	34.25 a	-----	9.62 b	12.55 a	-----

Tratamentos	Pi NaOH 0,1M (mg.kg)			P moderadamente lábil do solo Po NaOH 0,1M (mg.kg)		
	Base da planta	Pilha	SAF	Base da planta	Pilha	SAF
Adubadeira	64.25 b	61.80 b	61.65 a	79.20 a	80.58 a	72.23 b
Biodiverso	64.15 b	59.58 b	60.17 a	65.73 a	64.47 a	93.69 a
Monocultivo	89.36 a	87.46 a	-----	27.56 b	26.30 b	-----

Tabela 11- Distribuição das frações de fósforo de acordo com as zonas de manejo dos tratamentos estudados.

Dados são médias \pm desvio padrão, $n=6$. Letras indicam diferença significativa avaliada pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

3.4 Discussão

Efeito dos Sistemas Agroflorestais e do monocultivo nas frações e distribuições de P no solo nos cultivos de palma de óleo

A maior concentração da fração P-resina e $P_i \text{NaHCO}_3$ no monocultivo em relação ao SAF-Adubadeira (Figura 8), é resultado do uso de fertilizantes fosfatados, apresentando como efeito direto o aumento do pool de P lábil no solo, conforme mostrou Maranguit et al. (2017) ao comparar frações lábeis de P_i em monocultivo de palma de óleo (*Elaeis guineenses*) com fertilização (NPK) e um SAF sem adição de NPK na Indonésia.

Entre os SAFs foi observado diferença significativa na concentração das frações P-resina e $P_i \text{NaHCO}_3$ (Figura 8), o que pode indicar maior taxa de mineralização no SAF-Biodiverso, formando mais P lábil a partir do P_o da matéria orgânica do solo, contribuindo, dessa forma, para o aumento de P-resina e $P_i \text{NaHCO}_3$ nesse tratamento em relação ao SAF-Adubadeira.

Silva et al. (2016), encontrou maior efluxo de CO_2 e maior carbono da biomassa microbiana no SAF-Biodiverso em relação ao SAF-Adubadeira no mesmo sítio experimental do presente estudo, o que demonstra maior atividade microbiana nesse tratamento. A estimulação da biomassa microbiana para mineralizar o P_o do solo, é um reconhecido “efeito priming” do solo e uma estratégia importante para o suprimento de P_i nos cultivos agrícolas (DAMON et al., 2014; SIMPSON et al., 2011). A mineralização de P orgânico é um dos principais processos que contribuem para a disponibilidade de P em solos da região amazônica (LEHMANN et al., 2001).

A maior proporção de $P_o \text{NaHCO}_3$ em relação ao $P_i \text{NaHCO}_3$ encontrada no SAF-Adubadeira (Figura 11A) na fração P lábil do solo, sugere que os SAFs, mesmo com baixa diversidade de plantas, podem contribuir para a manutenção de P lábil nos solos tropicais, sob a forma da fração orgânica, sobretudo quando a adubação fosfatada é suprimida. Resultado

semelhante foi mostrado por Aleixo (2017), ao avaliar a diferença nas frações de $P_o \text{NaHCO}_3$ e $P_i \text{NaHCO}_3$ em diversos tipos de SAFs com *Theobroma cacao* na mata atlântica brasileira.

Os resultados do presente estudo, portanto, confirmam a hipótese de que os SAFs contribuem para o fornecimento de P lábil, principalmente através da fração $P_o \text{NaHCO}_3$ (Figura 11), não apresentando diferença significativa quanto a distribuição total de P lábil, em relação ao sistema convencional dependente da fertilização química (Figura 10). Conclusão semelhante encontrada por Cardoso (2003), ao comparar frações lábeis no cultivo de café inserido em SAF com monocultivo de café no sudeste brasileiro, verificaram que os SAFs podem ser mais eficientes para manutenção das frações disponíveis de P, através de P orgânico, para as culturas.

No monocultivo de palma de óleo o uso de fertilizantes químicos como NPK, pode ser apontado como o principal fator que influenciou o aumento de P_i lábil (Figura 8) e P_i moderadamente lábil (Figura 9) em relação aos SAFs, apresentando concentração superior a 60% na fração de P lábil (Figura 11E) e superior a 70% na fração moderadamente lábil (Figura 11F), como o solo amazônico apresenta elevada capacidade de adsorção, a agricultura convencional é dependente do uso de fertilizantes químicos fosfatados para suprir a demanda de P lábil e moderadamente lábil nos cultivos (NEGASSA; LEINWEBER, 2009).

Embora a adição de fertilizantes químicos fosfatados mantem a fertilidade do solo a curto prazo nos cultivos convencionais, esse tratamento não garante o suprimento de P a médio prazo, devido a limitação das outras frações de reserva, como o P_o moderadamente lábil (Figura 9), a baixa deposição de litterfall no monocultivo em relação aos SAFs (COSTA, 2017), pode ter sido um dos fatores que contribuíram para a redução de P_o moderadamente lábil nesta área de estudo.

O presente estudo mostrou que os SAFs aumentaram significativamente o reservatório de P moderadamente lábil do solo em relação ao monocultivo (Figura 10), através da maior

concentração de Po NaOH 0,1 na fração moderadamente lábil. Nos Sistemas Agroflorestais o conteúdo de P orgânico correspondeu a 54% da fração moderadamente lábil de P (Figura 11B e 11D), por outro lado o monocultivo apresentou menor conteúdo de Po e maior participação do Pi, correspondendo a 78% da fração moderadamente lábil (Figura 11F). O Po moderadamente lábil apresenta uma importante contribuição na formação de reserva de P no solo (MARANGUIT et al., 2017).

Esses resultados colaboram para a confirmação da hipótese deste estudo no qual os SAFs contribuem para o estoque de P no solo, neste caso, apresentam maior contribuição para as reservas de P moderadamente lábeis do que o cultivo convencional. A contribuição dos SAFs para o aumento das reservas de P no solo, provavelmente está ligada a deposição e decomposição da biomassa vegetal das espécies de plantas consorciadas nesses sistemas (ZAMUNER et al., 2008). Vários estudos em solos tropicais intemperizados mostraram a contribuição do litterfall para o aumento de disponibilidade de P (GEORGE et al., 2002; LEHMANN et al., 2001; MCGRATH et al., 2000). A fração de Po pode contribuir com até 80% do total de P no solo (ANDERSON, 1980).

McGrath et al. (2000), ao avaliar a contribuição dos SAFs para a disponibilidade de P na Amazônia em relação a áreas agrícolas sem plantas de cobertura, observaram que o aumento da biodisponibilidade de P está relacionado a concentração de P no litter dos SAFs e na rápida decomposição e liberação de P associada principalmente a baixa relação C-P do litterfall. George et al. (2002) mostraram elevada correlação entre o declínio de litterfall no SAF com a diminuição de Po NaOH 0,1 em latossolo (Oxisol) localizado no oeste do Quênia, sugerindo que a disponibilidade de Po é dependente da ciclagem de nutrientes a partir do litterfall.

Influência do manejo orgânico dos Sistemas Agroflorestais e convencional do monocultivo na disponibilidade de P no solo nos cultivos de palma de óleo

A disponibilidade de P também pode ser influenciada pelas práticas de manejo do solo (ZAMUNER et al., 2008), especialmente em latossolos (NEUFELDT et al., 2000). O presente estudo considera que o efeito do manejo orgânico nos SAFs influenciou positivamente na disponibilidade de P, principalmente as frações de P lábil e moderadamente lábil, em relação ao manejo convencional da monocultura.

Vários estudos mostraram efeitos significativos no aumento de P através da deposição da biomassa vegetal, associada a maior atividade microbiana nos processos de decomposição e mineralização de P no solo nos sistemas manejados organicamente (DAMON et al., 2014; KWABIAH et al., 2003). A entrada de matéria orgânica, rotação de culturas e incorporação de resíduos vegetais são fatores chaves responsáveis pelo aumento de P na agricultura orgânica (MAHARJAN et al., 2018).

Por outro lado, nos monocultivos com manejo convencional do solo, a aplicação de pesticidas pode afetar negativamente a biomassa e a atividade microbiana no solo, prejudicando a ciclagem de P (OBERSON et al., 1996). O uso de fertilizantes inorgânicos, leva a dependência de apenas uma forma de P, que não garante o suprimento a médio-longo prazo para o cultivo (MARANGUIT et al., 2017) e a diminuição e/ou ausência do litterfall, causa redução na disponibilidade de P_o (VINCENT et al., 2011) e deixa o solo mais vulnerável a erosão, o que resulta na redução de P no solo (MAHARJAN et al., 2018).

Variação das frações de P no solo sob as zonas de manejo dos tratamentos

Nas zonas de manejo base da planta e pilha, houve uma tendência de manutenção do mesmo padrão de variação das frações de P entre os tratamentos, exceto a fração P resina na pilha e $P_o NaHCO_3$ na base da planta que foram maiores no monocultivo e SAF-Adubadeira, respectivamente, todas as demais frações dos tratamentos apresentaram respostas semelhantes

nessas duas zonas de manejo (Tabela 11). O que pode estar relacionado a proximidade das duas zonas, apresentando uma influência da borda.

Na zona de manejo SAF a maior concentração de P resina e Pi NaHCO₃ no SAF-Biodiverso em relação ao SAF-Adubadeira pode estar relacionada a maior biomassa microbiana (750 ± 66 mg C kg⁻¹) e maior atividade microbiana (1,81 ± 0,15 mg de C-CO₂ kg⁻¹ solo hora⁻¹) encontrada nesta zona de manejo no tratamento biodiverso (SILVA et al., 2016). O aumento da biomassa e da atividade microbiana do solo melhora a taxa de solubilização e mineralização de P, influenciando diretamente na disponibilidade de P lábil no solo (SIMPSON et al., 2011).

A maior concentração das frações Po NaOH 0,1 na zona biodiversa em relação a adubadeira, também pode estar relacionada a elevada biomassa microbiana e ao conteúdo de P no litter das diversas espécies deste SAF, especialmente, *Theobroma cacao*, que apresenta elevada densidade nesta zona de manejo (Tabela 9) e reconhecida importância no estoque e liberação de P através do litter (FONTES et al., 2014), embora essa diferença não tenha afetado a disponibilidade de P moderadamente lábil (Figura 10 e 11) entre os dois SAFs da área de estudo. Possivelmente porque no SAF-Adubadeira a elevada densidade de *Gliricidia sepium* (Tabela 9), também pode estar desempenhando um papel importante para o fornecimento de Po a partir da decomposição da biomassa vegetal (AKINNIFESI et al., 2007; BEEDY et al., 2010), atenuando as diferenças na disponibilidade de P entre os SAFs.

3.5 Conclusões

Os SAFs manejados organicamente contribuem para o suprimento de P-lábil no solo de maneira semelhante ao monocultivo com manejo intensivo, provavelmente devido a maior concentração da fração $P_o NaHCO_3$ no solo desses sistemas. A contribuição dos SAFs para o aumento do reservatório de P moderadamente lábil no solo, principalmente através da fração $P_o NaOH 0,1$, garante não apenas maior disponibilidade de P a médio prazo em relação ao monocultivo, como também indica que esse sistema é importante na manutenção das reservas de P no solo.

A faixa biodiversa foi a zona de manejo que mais se destacou na disponibilidade de P, possivelmente pela maior biomassa e atividade microbiana nessa zona de manejo. A maior concentração de P orgânico em todas as frações de P nos SAFs da área de estudo, mostra o importante impacto desse tratamento na disponibilidade de P no solo. Sugerindo que sistemas de manejos orgânicos que priorizam a manutenção da cobertura vegetal, devem ser melhor explorados como alternativa ao monocultivo intensivo de palma de óleo na agricultura familiar na Amazônia.

Agradecimentos

Agradecemos ao agricultor Sr. Ernesto Suzuki por conceder permissão para a pesquisa na área experimental. À equipe do Laboratório de Análises de Sistemas Sustentável (LASS) da Embrapa Amazônia Oriental e as instituições: Natura Inovação e Tecnologia de Produtos Ltda, Cooperativa Agrícola Mista de Tomé-Açu (CAMTA) e Embrapa Amazônia Oriental responsáveis pela elaboração e manutenção do Projeto “Dendê em Sistemas Agroflorestais na agricultura familiar” e a Agência Americana para o Desenvolvimento Internacional (United States Agency for International Development, USAID) responsável pelo apoio financeiro deste projeto e da pesquisa. Ao CNPq pela bolsa de produtividade em pesquisa de SSV (processo 312038/2015-1).

Referências

ANDERSON, G. Assessing organic phosphorus in soil. *In*: KHASAWNEH, F.E., SAMPLE, E.C., KAMPRATH, E.J. (eds.). **The role of phosphorus in agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1980. WI, p. 411 - 431.

AKINNIFESI, F. K.; MAKUMBA, W.; SILESHI, G.; AJAYI, O. C.; MWETA, D. Synergistic effect of inorganic N and P fertilizers and organic inputs from *Gliricidia sepium* on productivity of intercropped maize in Southern Malawi. **Plant and Soil**, v. 294, n. 1–2, p. 203–217, 2007.

ALEIXO, S.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; COSTA, M. G.; SALES, M. V. S.; GAMARODRIGUES, E. F. ; MARQUES, J. R. B. P transformations in cacao agroforests soils in the Atlantic forest region of Bahia, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 91, n. 3, p. 423–437, 2017.

BACKHOUSE, M., GREEN GRABBING — the case of palm oil expansion in so-called degraded areas in the eastern Brazilian Amazon. *In*: Dietz, K., Engels, B., Pye, O., Brunnengraber, A. (Eds.), **The Political Ecology of Agrofuels**. Routledge, Abingdon, p. 167–185, 2015.

BAENA, A. R. C.; FALESI, I. C. **Avaliação do potencial químico e físico dos solos sob diversos sistemas de uso da terra na Colônia Agrícola de Tomé-Açu, Estado do Pará**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1999. 23 p.

BEEDY, T. L.; SNAPP, S. S.; AKINNIFESI, F. K.; SILESHI, G. W. Impact of *Gliricidia sepium* intercropping on soil organic matter fractions in a maize-based cropping system. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, v. 138, n. 3–4, p. 139–146, 2010.

BÜNEMANN, E.; OBERSON, A.; FROSSARD, E. (org.). **Phosphorus in action: biological processes in soil phosphorus cycling**. Heidelberg: Springer, 2011.

CARDOSO, I. M. *et al.* Phosphorus pools in Oxisols under shaded and unshaded coffee systems on farmers' fields in Brazil. **Agroforestry Systems**, v.58, n.1, p.55-64, 2003.

CARVALHO, W. R. *et al.* Short-Term Changes in the Soil Carbon Stocks of Young Oil Palm-Based Agroforestry Systems in the Eastern Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 88, n. 2, p. 357–68, Abr. 2014. DOI:10.1007/s10457-014-9689-2.

CONDRON, L; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, Oxford, v 36, p.199-207, 1985.

CÓRDOBA, D., *et al.* Understanding Local Perceptions of the Impacts of Large-Scale Oil Palm Plantations on Ecosystem Services in the Brazilian Amazon. **Forest Policy and Economics**, v. 109. dez. 2019. Doi:10.1016/j.forpol.2019.102007.

COSTA, A. N. M. **Efluxo de CO₂ do solo em sistemas de produção de palma de óleo na Amazônia Oriental. Orientador: Steel Silva Vasconcelos.** 2017. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Belém, 2017.

DAMON, P. M.; BOWDEN, B.; ROSE, T.; RENGEL, Z. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. *Soil **Biology and Biochemistry***, v. 74, p. 127–137, 2014.

DIETER, D.; ELSENBEER, H.; TURNER, B. L. Phosphorus fractionation in lowland tropical rainforest soils in central Panama. *CATENA*, v. 82, n. 2, p. 118–125. 2010.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. *Journal of Environmental Quality*, Madison, v 6, p. 82-85, 1977.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** 3 ed. Brasília: Informação Tecnológica, 2017. 628 p.

FONTES, A. G.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; *et al.* Nutrient stocks in litterfall and litter in cocoa agroforests in Brazil. *Plant and Soil*, v. 383, n. 1–2, p. 313–335, 2014.

GEORGE, T. S.; GREGORY, P. J.; ROBINSON, J. S.; BURESH, R. J.; JAMA, B. Utilisation of soil organic P by agroforestry and crop species in the field, western Kenya. *Plant and Soil*, v. 246, n. 1, p. 53–63, 2002.

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v 46, p. 970-976, 1982.

HOMMA, A.K.O. **Cronologia do cultivo de dendezeiro na Amazônia.** Belém-Pa: Embrapa Amazônia Oriental, 2016. 48p.

KWABIAH, A. B.; PALM, C. A.; STOSKOPF, N. C.; VORONEY, R. P. Response of soil microbial biomass dynamics to quality of plant materials with emphasis on P availability. *Soil Biology and Biochemistry*, v. 35, n. 2, p. 207–216, 2003.

LEHMANN, J.; CRAVO, M. DA S.; VASCONSELOS DE MACÊDO, J. L.; MOREIRA, A.; SCHROTH, G. **Phosphorus management for perennial crops in central Amazonian upland soils.** *Plant and Soil*, v. 237, n. 2, p. 309–319, 2001.

MAHARJAN, Menuka, *et al.* “Phosphorus Fractions in Subtropical Soils Depending on Land Use”. *European Journal of Soil Biology*, vol. 87, , p. 17–24. mai.2018. *DOI.org (Crossref)*, doi:10.1016/j.ejsobi.2018.04.002.

MARANGUIT, D.; GUILLAUME, T.; KUZYAKOV, Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. *CATENA*, v. 149, p. 385–393, 2017.

MARKEWITZ, D.; DAVIDSON, E.; MOUTINHO, P.; NEPSTAD, D. Nutrient loss and redistribution after forest clearing on a highly weathered soil in amazonia. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, p. 177–199, 2004.

MCGRATH, D. A.; COMERFORD, N. B.; DURYEY, M. L. Litter dynamics and monthly fluctuations in soil phosphorus availability in an Amazonian agroforest. **Forest Ecology and Management**, v. 131, n. 1–3, p. 167–181, 2000.

MCGRATH, D. A.; SMITH, C. K.; GHOLZ, H. L.; OLIVEIRA, F. DE A. Effects of Land-Use Change on Soil Nutrient Dynamics in Amazônia. **Ecosystems**, v. 4, n. 7, p. 625–645, 2001.

MINISTERIO DA AGRICULTURA, PECUARIA E ABASTECIMENTO (MAPA). **Diagnóstico da produção sustentável da palma de óleo**. Brasília,DF: MAPA, 2018. Disponível em:http://www.abrapalma.org/pt/wpcontent/uploads/2018/06/DIAGNOSTICO_PALMA1.pdf

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v.27. p.31-36, 1962.

NEGASSA, W.; LEINWEBER, P. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 3, p. 305–325, 2009.

NEUFELDT, H., *et al.* “Land-use effects on phosphorus fractions in Cerrado oxisols”. **Biology and Fertility of Soils**, v. 31, n. 1. p. 30–37. abr.2000 DOI.org (Crossref), doi:10.1007/s003740050620.

NZIGUHEBA.G.; *et al.* Phosphorus in smallholder farming systems of sub-Saharan Africa: implications for agricultural intensification. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** v. 104, p. 321–340, 2016.

OBERSON, A.; BESSON, J.M.; MAIRE, N.; STICHER, H. Microbiological processes in soil organic phosphorus transformations in conventional and biological cropping systems, **Biol. Fertil. Soils**. v. 21. p. 138–148, 1996.

OLANDER, L. P.; VITOUSEK, P. M. Biological and Geochemical Sinks for Phosphorus in Soil from a Wet Tropical Forest. **Ecosystems**, v. 7, n. 4, 2004. <http://link.springer.com/10.1007/s10021-004-0264-y>. Acesso em: 02, set. 2019.

PACHECO, N.A.; BASTOS, T.X. Frequência diária de chuva em Tomé-Açu. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., 2008, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo: SBMET, 2008. Disponível em: <https://www.ainfo.cnptia.embrapa.br/> Acesso em: 05/04/2018

PHOSRI, C.; RODRIGUEZ, A.; SANDERS, I. R.; JEFFRIES, P. The role of mycorrhizas in more sustainable oil palm cultivation. Agriculture, **Ecosystems & Environment**. v. 135. n.3. p. 187-193, 2010. Doi: 10.1016/j.agee.2009.09.006

ROY, E. Phosphorus recovery and recycling with ecological engineering: a review. **Ecological engineering**, v. 98, p. 213-227, 2016.

RODRIGUES, M., PAVINATO, P.S., WITHERS, P.J.A., *et al.*, Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Sci. Total Environ.** v. 542, p. 1050–1061, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.118>.

SCHOLZ, R. W.; ROY, A. H.; BRAND, F. S.; HELLUMS, D. T.; ULRICH, A. E. (orgs.). **Sustainable phosphorus management**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014.

SILVA, C. M., *et al.* Variação temporal do efluxo de CO₂ do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia Oriental. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 46, n. 1, p. 1-12, mar. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php>

SIMPSON, R. J.; OBERSON, A.; CULVENOR, R. A.; *et al.* Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. **Plant and Soil**, v. 349, n. 1–2, p. 89–120, 2011.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Methods of chemical analysis for water and wastes**. Cincinnati: USEPA, 1971.

VINCENT, A. G.; TURNER, B. L.; TANNER, E. V. J. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist forest. **European Journal of Soil Science**, v. 61, n. 1, p. 48–57, 2010.

WITHERS, P. *et al.* Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific reports**, v. 8, p. 1, 2018.

VIJAY, V., PIMM, S., JENKINS, C., SMITH, S., The impacts of oil palm on recent deforestation and biodiversity loss. **PLoS One** 11 v. 7. 2016.

ZAMUNER, E.C.; PICONE, L.I.; ECHEVERRIA, H.E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices, **Soil Tillage**. v. 99 p. 131–138, 2008 <http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2007.12.006>.

CAPÍTULO 4 CONCLUSÃO GERAL

Os Sistemas agroflorestais com palma de óleo desempenham um papel importante na disponibilidade de P no solo, através do aumento da concentração de P_o lábil ($\text{NaHCO}_3\text{-P}_o$) e moderadamente lábil ($\text{NaOH } 0,1\text{-P}_o$), ampliando a colonização micorrízica na raiz da palma de óleo em comparação ao monocultivo.

A diversidade de espécies de plantas nos SAFs exerceu pouca influência no aumento da colonização micorrízica na palma de óleo e na disponibilidade de P no solo. O manejo orgânico do solo foi um outro fator importante que pode ter contribuído para o aumento da colonização micorrízica nos cultivos palma de óleo e maior disponibilização de P no solo.

Os SAFs manejados organicamente demonstraram ser um sistema mais promissor para o fornecimento, estoque e mobilidade de P no solo. Os resultados do presente estudo, portanto, podem ajudar pesquisas futuras a entender melhor o papel dos SAFs manejados organicamente no aproveitamento de P nos cultivos consorciados e contribuir para a adoção de modelos mais sustentáveis para o cultivo de palma de óleo na região amazônica.

4.1 Resultados Chaves: Impactos e implicações

A partir dos resultados do presente estudo, podemos inferir que os SAFs podem desenvolver um papel importante no fluxo de nutrientes, a partir do aumento da colonização micorrízica em relação ao monocultivo. Muitos autores vêm estudando sobre a importância da rede de micélio extracelular, conhecida como “Mycorrhizal Networks” que mantem as plantas conectadas através da hifa micorrízica, ajudando no acesso de informações e compartilhamento de nutrientes no ambiente, um sistema conhecido como “wood wide web”.

Em relação a ciclagem de nutrientes, o presente estudo mostrou que os SAFs oferecem uma alternativa para redução do uso de fertilizantes fosfatados inorgânicos e melhor aproveitamento do P orgânico, através das práticas de manejo e manutenção da cobertura

vegetal. Desse modo, os resultados deste estudo contribuem para pesquisas futuras sobre o papel dos SAFs na dinâmica do P nos solos tropicais, especialmente na região amazônica.

4.2 Prioridades para pesquisas futuras

Pesquisas futuras devem investigar não apenas a colonização micorrízica na espécie-chave do sistema agroflorestal que no caso do presente estudo foi a palma de óleo, mas também é importante a utilização de métodos de extração e quantificação do micélio extra radicular de FMAs, como filtração por membrana aquosa (BODDINGTON et al., 1999) e identificação de hifas de FMAs no solo por PCR (HUNT *et al.*, 2004), além de métodos que avaliam o transporte de nutrientes via micélio de FMAs (SCHWEIGER; JAKOBSEN 2000; STADDON et al., 2003).

Para melhorar a compreensão da participação dos SAFs na ciclagem de P nos cultivos de palma de óleo, pesquisas futuras poderão avaliar não apenas as frações orgânicas e inorgânicas de P no solo, mas também a concentração de P no litterfall das espécies presentes nos SAFs em diferentes zonas de manejo, a concentração de P nas folhas e nas raízes da espécie-chave do sistema, avaliar o P da biomassa microbiana, as enzimas relacionadas as transformações de P no solo, como a fosfatase ácida e a taxa de mineralização de Po.

4.3 Considerações Finais

A colonização micorrízica na palma de óleo inserida nos SAFs é maior que no monocultivo, possivelmente devido à rede de micélio fúngico e à presença de espécies hospedeiras nos sistemas agroflorestais como *Gliricidia sepium* e *Inga edulis*. O manejo orgânico do solo pode ser considerado um fator importante que melhora a colonização micorrízica nos cultivos.

Os SAFs manejados organicamente contribuem para o suprimento de P-lábil e P-moderadamente lábil no solo através da maior concentração de P orgânico nessas duas

frações em comparação ao monocultivo. O que garante não apenas o fornecimento de P a curto prazo (P-lábil) de modo semelhante ao monocultivo, como também apresentam maior participação no fornecimento de P a médio prazo (P moderadamente lábil) em relação ao monocultivo, indicando que esse sistema pode ser mais eficiente na manutenção das reservas de P no solo em relação ao cultivo convencional.

Os resultados do presente estudo permitem concluir que os Sistemas Agroflorestais orgânicos devem ser melhor explorados na agricultura amazônica para garantir maior mobilidade, disponibilidade e estoque de P no solo, diminuindo a dependência de fertilizantes fosfatados.

REFERÊNCIAS

- AKINNIFESI, F. K.; MAKUMBA, W.; SILESHI, G.; AJAYI, O. C.; MWETA, D. Synergistic effect of inorganic N and P fertilizers and organic inputs from *Gliricidia sepium* on productivity of intercropped maize in Southern Malawi. **Plant and Soil**, v. 294, n. 1–2, p. 203–217, 2007.
- ALEIXO, S.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; COSTA, M. G.; SALES, M. V. S.; GAMARODRIGUES, E. F.; MARQUES, J. R. B. P transformations in cacao agroforests soils in the Atlantic forest region of Bahia, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 91, n. 3, p. 423–437, 2017.
- ANDERSON, G. Assessing organic phosphorus in soil. In: KHASAWNEH, F.E.; SAMPLE, E.C.; KAMPRATH, E.J. (Eds.). **The role of phosphorus in agriculture**. American Society of Agronomy, 1980. WI, p. 411-431.
- ATANGANA, A. *et al.* **Tropical agroforestry**. Netherlands: Springer, 2014. DOI.org (Crossref), doi:10.1007/978-94-007-7723-1.
- BACKHOUSE, M.; GREEN GRABBIN — the case of palm oil expansion in so-called degraded areas in the eastern Brazilian Amazon. In: DIETZ, K., *et al.* (eds.). **The political ecology of agrofuels**. Routledge: Abingdon, 2015. p. 167–185.
- BAENA, A. R. C.; FALESI, I. C. **Avaliação do potencial químico e físico dos solos sob diversos sistemas de uso da terra na Colônia Agrícola de Tomé-Açu, Estado do Pará**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 1999. 23 p.
- BAKARR, M.I; JANOS, D.P. Mycorrhizal associations of tropical legume trees in Sierra Leone, West Africa. **For Ecol Manag**, v. 89, p.89–92, 1996.
- BALAKRISHNA, A. N.; LAKSHMIPATHY, R.; BAGYARAJ, D. J.; ASHWIN, R. Influence of alley cropping system on AM fungi, microbial biomass C and yield of finger millet, peanut and pigeon pea. **Agroforestry Systems**, v. 91, n. 3, p. 487–493, 2017.
- BALZERGUE, C.; PUECH PAGES, V.; BECARD, G.; ROCHANGE, S.F. The regulation of arbuscular mycorrhizal symbiosis by phosphate in pea involves early and systemic signalling events. **J Exp Bot**, v. 62, p. 1049–1060, 2011.
- BEEDY, T. L.; SNAPP, S. S.; AKINNIFESI, F. K.; SILESHI, G. W. Impact of *Gliricidia sepium* intercropping on soil organic matter fractions in a maize-based cropping system. Agriculture, **Ecosystems & Environment**, v. 138, n. 3–4, p. 139–146, 2010.
- BEILER, K. J.; SIMARD, S. W.; DURALL, D. M. Topology of tree-mycorrhizal fungus interaction networks in xeric and mesic Douglas-fir forests. (M. van der Heijden, Org.) **Journal of Ecology**, v. 103, n. 3, p. 616–628, 2015.
- BERRUTI, A.; LUMINI, E.; BALESTRINI, R.; BIANCIOTTO, V. Arbuscular mycorrhizal fungi as natural biofertilizers: let's benefit from past successes. **Frontiers in Microbiology**, v. 6, jan. 2016. Doi: [10.3389/fmicb.2015.01559](https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01559).

BOLAN, N.S. A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants. **Plant Soil.**, v.134, p.189–207, 1991.

BÜNEMANN, E.; OBERSON, A.; FROSSARD, E. (org.). **Phosphorus in action: biological processes in soil phosphorus cycling.** Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2011.

CARDOSO, E.J.B.N.; NOGUEIRA, M.A.; ZANGARO, W. Importance of Mycorrhizae in Tropical Soils. *In*: AZEVEDO, J.; QUECINE, M. (ed.). **Diversity and benefits of microorganisms from the tropics.** Springer, 2017.

CARDOSO, I. M. *et al.* Phosphorus pools in oxisols under shaded and unshaded coffee systems on farmers' fields in Brazil. **Agroforestry Systems**, v.58, n.1, p.55-64, 2003.

CARDOSO, I.; KUYPER, T. Mycorrhizas and tropical soil fertility. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 116, n. 1–2, p. 72–84, 2006.

CARVALHO, A. *et al.* Associação simbiótica de bactérias diazotróficas e fungos micorrízicos arbusculares em mudas de dendzeiro (*elaeis guineensis* jaquim.). **Agrotrópica**, v. 11, n. 3, p. 169-174, 1999.

CARVALHO, A. M. X.; TAVARES, R. C.; CARDOSO, I. M.; KUYPER, T.W. Mycorrhizal associations in agroforestry systems. *In*: DION, P. (ed). **Soil biology and agriculture in the tropics.** Quebec City, Canada: Springer, 2010. v. 21, p. 185–208. (Soil Biology, v.21).

CARVALHO, W. R. *et al.* Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm-based agroforestry systems in the Eastern Amazon. **Agroforestry Systems**, v. 88, n. 2, p. 357–68, Abr. 2014. DOI:10.1007/s10457-014-9689-2.

CAVALCANTE, U. M. T.; GOTO, B. T. ; MAIA, L. C. Aspectos da simbiose micorrízica arbuscular. **Anais da Academia Pernambucana de Ciência Agronômica**, v. 6, p.180-208, 2009.

CHACON, N., DEZZEO, N. Phosphorus fractions and sorption processes in soil samples taken in a forest-savanna sequence of the Gran Sabana in Southern Venezuela. **Biol. Fertil. Soils**, v. 40, p. 14–19, 2004

CHEN, M.; GRAEDEL, T.E. A half-century of global phosphorus flows, stocks, production, consumption, recycling, and environmental impacts. **Global Environ. Change**, v. 36, p. 139–152, 2016.

CHU, E.Y. **Influência dos fungos micorrízicos arbusculares e níveis de adubação do solo no crescimento inicial de mudas de dendê.** Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 1997. 20p.

CONDON, L; GOH, K.M.; NEWMAN, R.H. Nature and distribution of soil phosphorus as revealed by a sequential extraction method followed by ³¹P nuclear magnetic resonance analysis. **Journal of Soil Science**, Oxford, v 36, p.199-207, 1985.

CÓRDOBA, D., *et al.* Understanding Local Perceptions of the Impacts of Large-Scale Oil Palm Plantations on Ecosystem Services in the Brazilian Amazon. **Forest Policy and Economics**, v. 109, Dez. 2019. Doi:10.1016/j.forpol.2019.102007.

CORLEY R.H.V. Fifteen years experience with oil palm clones – a review of progress. In: BASIRON, Y., *et al.* (ed.) **Proc. Int. Oil Palm Conf. Agriculture**. Palm Oil Res. Inst. Malaysia, Kuala Lumpur, p. 69–81, 1993.

CORLEY, R. H. V. TINKER, P. B. **The oil palm**. 5 ed. John Wiley & Sons, 2016. 674 p.

CORLEY, R.H.V.; TINKER, P.B. **The Oil Palm**. 4 ed. Oxfor: Blackwell Science, Ltd. 2008. *E-book* (592 p.). ISBN: 978-0-470-75036-0. Disponível em: <https://www.wiley.com/en-br/The+Oil+Palm,+4th+Edition-p-9780470750360>

COSTA, A. N. M. **Efluxo de CO₂ do solo em sistemas de produção de palma de óleo na Amazônia Oriental**. Orientador: Steel Silva Vasconcelos. 2017. 63 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Paraense Emílio Goeldi, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Belém, 2017.

COSTA, A. S. V. **O fósforo no sistema solo-planta**. 1 ed. Governado Valadares - MG, 2007.

CUENCA, G.; MENESES, E. Diversity patterns of arbuscular mycorrhizal fungi associated with cacao in Venezuela. **Plant and Soil**, v. 183, n.2, p. 315–322, 1996

DAMON, P. M.; BOWDEN, B.; ROSE, T.; RENGEL, Z. Crop residue contributions to phosphorus pools in agricultural soils: A review. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 74, p. 127–137, 2014.

DAMON, PAUL M., *et al.* “Crop Residue Contributions to Phosphorus Pools in Agricultural Soils: A Review”. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 74, p. 127–37, Jul.2014. *DOI.org (Crossref)*, Doi:10.1016/j.soilbio.2014.03.003.

DICK, W. A.; TABATABAI, M. A. Determination of orthophosphate in aqueous solutions containing labile organic and inorganic phosphorus compounds. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v 6, p. 82-85, 1977.

DIETER, D.; ELSENBEER, H.; TURNER, B. L. Phosphorus fractionation in lowland tropical rainforest soils in central Panama. **CATENA**, v. 82, n. 2, p. 118–125, 2010.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 3 ed. Brasília: Informação Tecnológica, 2017. 628 p.

FAGBOLA, O., OSONUBI, O., MULONGOY, K., ODUNFA, S.A. Effects of drought stress and arbuscular mycorrhiza on the growth of *Gliricidia sepium* (Jacq). Walp, and *Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit. in simulated eroded soil conditions. **Mycorrhiza** v. 11, p. 215–223, 2001

FINLAY, R. D.; LINDAHL, B. D.; TAYLOR, A. F. S. Responses of mycorrhizal fungi to stress. **British Mycological Society Symposia Series**, v. 27, p. 201–219, 2008.

FONTES, A. G.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; *et al.* Nutrient stocks in litterfall and litter in cocoa agroforests in Brazil. **Plant and Soil**, v. 383, n. 1–2, p. 313–335, 2014.

GADKAR, V, DAVID-SCHWARTZ, R, KUNIK, T, KAPULNIK, Y. Arbuscular mycorrhizal fungal colonization. Factors involved in host recognition. **Plant Physiol** v. 127, p.1493–1499, 2011

GALINDO-CASTAÑEDA, T.; ROMERO, H. Mycorrhization in oil palm (*Elaeis guineenses* and *E. oleifera* x *E. guineenses*) in the pre-nursery stage. **Agronomía Colombiana**. v. 31, n. 1, p. 95-102, 2013.

GEORGE, T. S.; GREGORY, P. J.; ROBINSON, J. S.; BURESH, R. J.; JAMA, B. Utilisation of soil organic P by agroforestry and crop species in the field, western Kenya. *Plant and Soil*, v. 246, n. 1, p. 53–63, 2002.

GOTTSHALL, C. B.; COOPER, M.; EMERY, S. M. Activity, diversity and function of arbuscular mycorrhizae vary with changes in agricultural management intensity. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. v. 241, n. 1, p. 142–149, Abr. 2017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0167880917301329> Acesso em: 12/06/2018

GRAY B.S. **A study of the influence of genetic, agronomic and environmental factors on the growth, flowering and bunch production of the oil palm on the west coast of West Malaysia**. 1969. Tese (Doutorado em Agronomia) - University of Aberdeen., Aberdeen, 1969.

GRIERSON, P.F; SMITHSON, P.; NZIGUHEBA, G.; RADERSMA, S.; COMERFORD, N.B. Phosphorus dynamics and mobilization by plants. In: NOORDWISK, M.; CADISCH, G.; ONG C.K. (eds). **Belowground interactions in tropical agroecosystems: concepts and models with multiple plant components**. Wallingford: CABI International, 2004. p. 127–142.

GROPPO, J.D., LINS, S.R.M., CAMARGO, P.B., ASSAD, E.D., PINTO, H.S., MARTINS, S.C., SALGADO, P.R., EVANGELISTA, B., VASCONCELLOS, E., SANO, E.E., PAVAO, E., LUNA, R., MARTINELLI, L.A., Changes in soil carbon, nitrogen and phosphorus due to land-use changes in Brazil. **Biogeosciences** v. 12, p. 2533–2571, 2015.

GRYNDLER, M.; HRSELOVÁ, H.; CAJTHAML, T.; HAVRANKOVA, M.; REZACOVA, V.; GRYNDLEROVA, H.; LARSEN, J. Influence of soil organic matter decomposition on arbuscular mycorrhizal fungi in terms of asymbiotic hyphal growth and root colonization. **Mycorrhiza**, v. 19, n. 4, p. 255–266, Abr. 2009. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00572-008-0217-y>. Acesso em: 21/07/2017

HEDLEY, M. J.; STEWART, J. W. B.; CHAUHAN, B. S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by laboratory incubations. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v 46, p. 970-976, 1982.

HENSON I.E. Adaptation to light environment by leaves of oil palm (*Elaeis guineensis*). **Palm Oil Res. Inst. Malaysia, Bull.**, v. 22, p. 1–8, 1991.

HENSON I.E.; CHANG K.C. Oil palm productivity and its component processes. In: BASIRON, Y.; JALANI, B.S.; CHAN, K.W (ed.). **Advances in oil palm research, Malaysian Palm Oil Board, Kuala Lumpur**. 1 v. 2007. p. 97–145.

HIJRI, M.; AMADOU B. Mycorrhiza in tropical and neotropical ecosystems. **Frontiers Media SA**, 2018. Doi: 10.3389/978-2-88945-544-7.

HODGE, A. Plant nitrogen capture from organic matter as affected by spatial dispersion, interspecific competition and mycorrhizal colonization. **New Phytologist**. v. 157, p. 303–314, 2003.

HOMMA, A.K.O. **Cronologia do cultivo de dendezeiro na Amazônia**. Belém-PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2016. 48p.

HOMMA, A.K.O. Organização da produção e comercialização de produtos agropecuários: o caso da colônia agrícola nipo-brasileira de Tomé-Açu, Pará *In*: VILCAHUAMÁN, L.J.M.; RIBASKI, J.; MACHADO, A.M.B. **Sistemas agroflorestais e desenvolvimento com proteção ambiental: perspectivas, análise e tendências**. [S.l.]: Embrapa Florestas, 2006. p. 51-77.

HUNT, J.; BODDY, L.; RANDERSON, P.F.; ROGERS, H.J. An Evaluation of 18S RDNA Approaches for the Study of Fungal Diversity in Grassland Soils. **Microbial Ecology**, v. 47, n. 4, p. 385-95, 2004.

IGLESIAS, L.; SALAS, E.; LEBLANC, H. A.; NYGREN, P. Response of theobroma cacao and inga edulis seedlings to cross-inoculated populations of arbuscular mycorrhizal fungi. **Agroforestry Systems**, v. 83, n. 1, p. 63–73, 2011.

INGLEBY, K.; WILSON, J.; MUNRO, R. C.; CAVERS, S. Mycorrhizas in agroforestry: spread and sharing of arbuscular mycorrhizal fungi between trees and crops: complementary use of molecular and microscopic approaches. **Plant and Soil**. v. 294, n.2, p. 125–136, 2007, Doi: 10.1007/s11104-007-9239-z

JALONEN, R.; TIMONEN, S.; SIERRA, J.; NYGREN, P. Arbuscular mycorrhizal symbioses in a cut-and-carry forage production system of legume tree *Gliricidia sepium* and fodder grass *Dichanthium aristatum*. **Agroforestry Systems**. v. 87, n. 2, p. 319–330, Abr. 2013.

JAMIOLKOWSKA, A.; KSIEZNIAK, A.; GALAZKA, A.; HETMAN, B.; KOPACKI, M.; SKWARYLO-BEDNARZ, B. Impact of abiotic factors on development of the community of arbuscular mycorrhizal fungi in the soil: a review. **International agrophysics**, v. 32, n. 1, p. 133-140, 2018.

JANOS, D.P. Mycorrhizas, succession and the rehabilitation of deforested lands in the humid tropics. *In*: FRANKLAND, J.C.; MAGAN, N.; GADD, G.M. (eds.). **Fungi and environmental change**: british mycological society symposium. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1996. v. 20, p. 129-162.

JANSA, J.; WIEMKEN, A.; FROSSARD, E. The effects of agricultural practices on arbuscular mycorrhizal fungi. London: Geological Society, 2006. p. 89–115. (Special Publications, v. 266, n. 1).

JEFFRIES, P.; GIANINAZZI, S.; PEROTTO, S.; TURNAU, K.; BAREA, J. The contribution of arbuscular mycorrhizal fungi in sustainable maintenance of plant health and soil fertility. **Biology and Fertility of Soils**, v. 37, n. 1, p. 1-16, Jan. 2003.

JONER, E.J.; JAKOBSEN, I. Growth and extra cellular phosphatase activity of arbuscular mycorrhizal hyphae as influenced by soil organic matter. **Soil Biol Biochem**, v. 27, n. 9, p. 1153-1159, Set. 1995.

JOSE, S. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. **Agroforest System**, v.71, p.1-10, 2009.

JOURDAN, C. Root System Architecture and Gravitropism in the Oil Palm. **Annals of Botany**, v. 85, n. 6, p. 861–868, Jun. 2000.

JOURDAN, C.; REY, H. Modelling and simulation of the architecture and development of the oil-palm (*Elaeis guineensis* Jacq.) root system. **Plant and Soil**, v. 190, p. 217–233, Mar. 1997.

KATO, O.R.; LUNZ, A. M.; BISPO, C.J.C.; CARVALHO, C.J.R.; MIRANDA, I.S.; TAKAMATSU, J.; MAUÉS, M. M.; GERHARD, P.; AZEVEDO, R.; VASCONCELOS, S.S.; HONHWALD, S.; LEMOS, W.P. Projeto dendê: sistemas agroflorestais na agricultura familiar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS, 7., 2009, Luziânia-Go. **Anais [...]**. Luziânia-Go: [SBSAF], 2009.

KUZYAKOV, Yakov. Priming effects: interactions between living and dead organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 9 p. 1363–1371, Set. 2010.

KWABIAH, A. B.; PALM, C. A.; STOSKOPF, N. C.; VORONEY, R. P. Response of soil microbial biomass dynamics to quality of plant materials with emphasis on P availability. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 35, n. 2, p. 207–216, 2003.

LALITHA, M. *et al.* “Role of vesicular-arbuscular mycorrhizae in mobilization of soil phosphorus”. In: MEENA, Vijay Singh *et al.* (org.). **Agriculturally important microbes for sustainable agriculture**. Singapore: Springer, 2017. p. 317–31. DOI.org (Crossref), doi:10.1007/978-981-10-5589-8_15.

LAMBERS, H. *et al.* **Plant physiological ecology**. 2 ed. [S.l.]: Springer, 2008.

LEHMANN, J.; CRAVO, M. DA S.; VASCONSELOS DE MACÊDO, J. L.; MOREIRA, A.; SCHROTH, G. Phosphorus management for perennial crops in central Amazonian upland soils. **Plant and Soil**, v. 237, n. 2, p. 309–319, 2001.

LOURENCO DE BARROS, A. V.; HOMMA, A.K.O. Evolução dos sistemas agroflorestais praticados pelos agricultores nipo-brasileiros do município de Tomé-açu, Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE SISTEMAS AGROFLORESTAIS, 7., 2009, Luziânia-Go. **Anais [...]**. Luziânia-Go: [SBSAF], 2009.

MAHARJAN, Menuka, *et al.* “Phosphorus Fractions in Subtropical Soils Depending on Land Use”. **European Journal of Soil Biology**, vol. 87, , p. 17–24. mai.2018. DOI.org (Crossref), doi:10.1016/j.ejsobi.2018.04.002.

MANOHARAN, L.; ROSENSTOCK, N. P.; WILLIAMS, A.; HEDLUND, K. Agricultural management practices influence AMF diversity and community composition with cascading effects on plant productivity. **Applied Soil Ecology**, v. 115, p. 53–59, 2017.

MINISTERIO DA AGRICULTURA, PECUARIA E ABASTECIMENTO-MAPA. **Diagnóstico da produção sustentável da palma de óleo.** Brasília,DF: MAPA, 2018. Disponível

em:http://www.abrapalma.org/pt/wpcontent/uploads/2018/06/DIAGNOSTICO_PALMA1.pdf

MARANGUIT, D.; GUILLAUME, T.; KUZYAKOV, Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. **CATENA**, v. 149, p. 385–393, 2017.

MARKEWITZ, D.; DAVIDSON, E.; MOUTINHO, P.; NEPSTAD, D. Nutrient loss and redistribution after forest clearing on a highly weathered soil in amazonia. **Ecological Applications**, v. 14, n. 4, p. 177–199, 2004.

MAZOYER, M.; ROUDART, L. **História das agriculturas no mundo: do neolítico à crise contemporânea.** Trad. Cláudia F. Falluh Balduino Ferreira. São Paulo: Editora UNESP; Brasília, DF: NEAD, 2010. 568 p.

MCGONIGLE, T.P.; MILLER, M.H.; EVANS, D.G.; FAIRCHILD, G.L.; SWAN, J.A. A new method which gives an objective measure of colonization of roots by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. **New Phytologist**, v. 115, p. 495-501, Jul. 1990.

MCGRATH, D. A.; COMERFORD, N. B.; DURYEA, M. L. Litter dynamics and monthly fluctuations in soil phosphorus availability in an Amazonian agroforest. **Forest Ecology and Management**, v. 131, n. 1–3, p. 167–181, 2000.

MCGRATH, D. A.; SMITH, C. K.; GHOLZ, H. L.; OLIVEIRA, F. DE A. Effects of Land-Use Change on Soil Nutrient Dynamics in Amazônia. **Ecosystems**, v. 4, n. 7, p. 625–645, 2001.

MÉNDEZ, Y. D. R.; ACEVEDO, E. C.; ROMERO, H. M.. Efecto de la micorrización arbuscular sobre el crecimiento y desarrollo de plántulas de palma de aceite en etapa de previvero. **Ceniavances**, v. 175, n. 4, 2013.

MONTEIRO, K. F. G.; HOMMA, A. K. O.; MENEZES, A.J.E.A.; SANTOS, J.C.; MOTA JUNIOR, K. J. A. A sustentabilidade socioambiental em sistemas agroindustriais com palma de óleo no Estado do Pará. **DELLOS: Desarrollo Local Sostenible**, v. 26, p. 1, p. 2-17, jun. 2016.

MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**, 2º ed. Lavras, 2006.

MOTTA, D.V.; MUNÉVAR, F.M. Response of oil palm seedlings to mycorrhization. **Palmas Journal** , v. 26, n. 11, 2005.

MURPHY, J.; RILEY, J.P. A modified single solution method for the determination of phosphate in natural waters. **Analytica Chimica Acta**, v.27. p.31-36, 1962.

NADARAJAH, P. Species of endogonaceae and mycorrhizal association of *Elaeis guineensis* and *Theobroma cacao*. In: MIKOLA, P. (Ed). **Tropical Mycorrhizal Research**. Oxford: Oxford University Press, 1980. p. 232-237.

NAHUM, J. S.; SANTOS, C. B. A dendeicultura na Amazônia paraense. Geousp – Espaço e

Tempo (Online) v. 20, n. 2, p. 281-294, 2016. Doi:10.11606/issn.2179-0892.geousp.2016.122591

NAHUM, J. S.; SANTOS, C.B. Impactos socioambientais da dendeicultura em comunidades tradicionais na Amazônia paraense. **Acta Geográfica** (UFRR), p. 63-80, 2013.

NAHUM, J. S.; MALCHER, A. T. C. Dinâmicas territoriais do espaço agrário na Amazônia: a dendeicultura na microrregião de Tomé-Açu (PA). **Confins**, n. 16, 2012.

NEGASSA, W.; LEINWEBER, P. How does the Hedley sequential phosphorus fractionation reflect impacts of land use and management on soil phosphorus: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 172, n. 3, p. 305–325, 2009.

NEUFELDT, H., *et al.* “Land-use effects on phosphorus fractions in Cerrado oxisols”. **Biology and Fertility of Soils**, v. 31, n. 1. p. 30–37, abr. 2000 DOI.org (Crossref), doi:10.1007/s003740050620.

NG, P.H.C.; CHEW, P.S.; GOH, K.J.; KEE, K.K. Nutrient requirements and sustainability in mature oil palms – an assessment. *Planter*, **Kuala Lumpur**, v. 75, p. 331–345, 1999.

NOVAIS, R.F.; SMITH, T.J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1999. 399p.

NOVAIS, R.F.; SMYTH, T.J.; NUNES, F.N. Fósforo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L (eds). **Fertilidade do solo**. Viçosa: SBCS, 2007. 1017p.

NZIGUHEBA.G.; *et al.* Phosphorus in smallholder farming systems of sub-Saharan Africa: implications for agricultural intensification. **Nutr. Cycl. Agroecosyst.** v. 104, p. 321–340, 2016.

OBERSON, A.; BESSON, J.M.; MAIRE, N.; STICHER, H. Microbiological processes in soil organic phosphorus transformations in conventional and biological cropping systems, **Biol. Fertil. Soils**. v. 21. p. 138–148, 1996. <http://dx.doi.org/10.1007/s003740050039>.

OEHL, F.; SIEVERDING, E.; MÄDER, P.; DUBOIS, D.; INEICHEN, K.; BOLLER, T.; WIEMKEN, A. Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. **Oecologia**, v. 138, n. 4, p. 574–583, mar. 2004.

OHTAKE, Hisao; TSUNEDA, Satoshi (eds). **Phosphorus recovery and recycling**. Singapura: Springer Singapore, 2019. Doi:10.1007/978-981-10-8031-9.

OKON, I.E.; OSONUBI, O.; SANGINGA, N. Vesicular-arbuscular mycorrhiza effects on *Gliricidia sepium* and *Senna siamea* in a fallowed alley cropping system. **Agroforestry Systems**, v. 33, n. 2, p. 165–175, Fev. 1996.

OLANDER, L. P.; VITOUSEK, P. M. Biological and Geochemical Sinks for Phosphorus in Soil from a Wet Tropical Forest. **Ecosystems**, v. 7, n. 4, 2004. <http://link.springer.com/10.1007/s10021-004-0264-y>. Acesso em: 02, set. 2019.

OSONUBI, O.; MULONGOY, K.; AWOTOYE, O.O.; ATAYESE, M.O.; OKALI, D.U.U. Effects of ectomycorrhizal and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi on drought tolerance of

four leguminous woody seedlings. **Plant Soil** v. 136, p.131–143, 1991.

PACHECO, N.A.; BASTOS, T.X. Frequência diária de chuva em Tomé-Açu. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 15., 2008, São Paulo. **Anais [...]** São Paulo: SBMET, 2008. Disponível em: <https://www.ainfo.cnptia.embrapa.br/> Acesso em: 05/04/2018

PAUL, E.A. **Soil microbiology, ecology and biochemistry**. 3 ed. [S.l.]: Academic Press, 2007. 400p.

PHILLIPS, J.M.; HAYMAN, D.S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. **Transactions of British Mycological Society**, v. 55, p. 158-162, Ago. 1970.

PHOSRI, C.; RODRIGUEZ, A.; SANDERS, I. R.; JEFFRIES, P. The role of mycorrhizas in more sustainable oil palm cultivation. **Agriculture, Ecosystems & Environment**. v. 135, n.3, p. 187–193, 2010, Doi: 10.1016/j.agee.2009.09.006

PIMENTEL, D., HARVEY, C., RESOSUDARMO, P., SINCLAIR, K., KURZ, D., MCNAIR, M., CRIST, S., SHPRITZ, L., FITTON, L., SAFFOURI, R., BLAIR, R.. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation. **Sci**. v. 267, p. 1117–1123, 1995.

PLASSARD, C.; DELL B. Phosphorus nutrition of mycorrhizal trees. **Tree Physiol**, v. 30, n. 9, p. 1129–1139, 2010. doi:10.1093/treephys/tpq063

PLENCHETTE, C.; CLERMONT-DAUPHIN, C.; MEYNARD, J.M.; FORTIN, J. A. Managing arbuscular mycorrhizal fungi in cropping systems. **Canadian Journal of Plant Science**, v. 85, p. 31–40, Jan. 2004.

PURVIS, C. The root system of the oil palm: its distribution, morphology and anatomy. **J. W. Afr. Inst. Oil Palm Res.**, v. 1, n.4, p. 61– 82. 1956

PUSHPARAJAH E.; CHEW P.S. **Integrated nutrient management for sustaining high yields of plantations treecrops in tropical Asia**. Montpellier: Proc. Soil Sci. Congr, 1998.

QIAO, S. M. Y. Distribution of inorganic and organic phosphorus fractions in two phosphorus deficient soils as affected by crop species and nitrogen applications. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.43, p.631-644, 2012.

REDDY, D.; SUBBARAO, A.; RUPA, T. R. Effects of continuous use of cattle manure and fertilizer phosphorus on crop yields and soil organic phosphorus in a Vertisol. **Bioresource Technology**, Nabibagh, v.75, p.113-118, 2000.

RICALDE, S.L.; DHILLION, S.S. Endemic *Mimosa* species can serve as mycorrhizal “resource islands” within semiarid communities of the Tehuacán-Cuicatlán Valley, Mexico. **Mycorrhiza**. v. 13, n. 3, p.129-136, 2003. Doi: 10.1007/s00572-002

RICHARDSON, A.E.; SIMPSON, R.J. Soil microorganisms mediating phosphorus availability. **Plant Physiology**. v.156, p. 989-996, 2011.

RICHARDSON, ALAN E., *et al.* “Plant and Microbial Strategies to Improve the Phosphorus Efficiency of Agriculture”. **Plant and Soil**, v. 349, n 1–2, p. 121–56, Dez. 2011. DOI.org

(Crossref), doi:10.1007/s11104-011-0950-4.

RODRIGUES, M., PAVINATO, P.S., WITHERS, P.J.A., *et al.*, Legacy phosphorus and no tillage agriculture in tropical oxisols of the Brazilian savanna. **Sci. Total Environ**, v. 542, p. 1050–1061, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.118>.

RODRIGUEZ, A.; SANDERS, I.R. The role of community and population ecology in applying mycorrhizal fungi for improved food security. **ISME J.** v. 9, p. 1053–1061, 2015. <http://dx.doi.org/10.1038/ismej.2014.207>.

ROSENBERG, N.J.; BLAD, B.L., VERMA, D.B. **Microclimate**: the biological environment, 3 ed. Nova York: Wiley and Sons, 1983.

ROY, E. D. Phosphorus recovery and recycling with ecological engineering: a review. **Ecological Engineering**, v. 98. p. 213–27, Jan. 2017 DOI.org (Crossref), doi:10.1016/j.ecoleng.2016.10.076.

SANCHEZ, P.A.; BANDY, D.E.; VILLACHICIA, J.H.; NICHOLAIDES, J.J. Amazon basin soils: management for continuous crop production. **Science**, v. 216, p. 821-827, 1982.

SCHNUG, E.; KOK, L. J. (org). **Phosphorus in agriculture**: 100 % zero. [S.l.]: Springer, 2016. Doi:10.1007/978-94-017-7612-7.

SCHOLZ, R. W.; ROY, A. H.; BRAND, F. S.; HELLUMS, D. T.; ULRICH, A. E. (orgs.). **Sustainable phosphorus management**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2014.

SCHWEIGER, P.F., AND JAKOBSEN, I. Laboratory and field methods for measurement of hyphal uptake of nutrients in soil. **Plant Soil**, v. 226, p. 237–244, 2000.

SELOSSE, M.A.; RICHARD, F.; HE, X.; SIMARD, S. W. Mycorrhizal networks: des liaisons dangereuses? **Trends in Ecology & Evolution**, v. 21, n. 11, p. 621–628, 2006.

SHARMA, M.; TAN, Y.P. Oil palm breeding programmes and the performance of D _ P planting materials at United Plantations Berhad. **Planter, Kuala Lumpur**, v. 73, p. 591– 610, 1997.

SHEN, J. *et al.* Phosphorus dynamics: from soil to plant. **Plant Physiology**, v. 156, n 3, p. 997–1005, Jul. 2011. DOI.org (Crossref), doi:10.1104/pp.111.175232.

SHEPHERD M.; NGUYEN L.; JONES, M.E.; NICHOLS, J.D.; CARPENTER, F.L. A method for assessing arbuscular mycorrhizal fungi group distribution in tree roots by intergenic transcribed sequence variation. **Plant Soil**, v. 290, p. 259–268, 2007.

SIDDIQUI, ZAKI ANWAR, *et al.* (org). **Mycorrhizae**: sustainable agriculture and forestry. Netherlands : Springer, 2008. DOI:10.1007/978-1-4020-8770-7.

SILVA, C. M., *et al.* Variação temporal do efluxo de CO₂ do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia Oriental. **Acta Amazônica**, Manaus, v. 46, n. 1, p. 1-12, mar. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php>. Acesso em: 18/08/2018

SILVA, T. O.; NETO, A. E. F.; CARNEIRO, V. P. Plantas de cobertura submetidas a diferentes fontes de fósforo em solos distintos. **Seminário: Ciências Agrárias**, Londrina, v.32, p.1315-1326, 2011.

SIMARD, S. W.; BEILER, K. J.; BINGHAM, M. A.; DESLIPPE, J.R.; PHILIP, L.J.; TESTE, F.P. Mycorrhizal networks: Mechanisms, ecology and modelling. **Fungal Biology Reviews**, v. 26, n. 1, p. 39–60, 2012.

SIMARD, S. W.; DURALL, D. M. Mycorrhizal networks: a review of their extent, function, and importance. **Canadian journal of botany**, v. 82, n. 8, p.1140–1165, 2004, Doi: [10.1139/b04-116](https://doi.org/10.1139/b04-116).

SIMONSSON, MAGNUS, *et al.* “Pools and Solubility of Soil Phosphorus as Affected by Liming in Long-Term Agricultural Field Experiments”. **Geoderma**, v. 315, p. 208–19, abr. 2018. DOI.org (Crossref), doi:10.1016/j.geoderma.2017.11.019.

SIMPSON, R. J.; OBERSON, A.; CULVENOR, R. A.; *et al.* Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. **Plant and Soil**, v. 349, n. 1-2, p. 89–120, 2011.

SIQUEIRA, J. O.; LAMBAIS, M. R.; STURMER, Sidney L.. Fungos micorrízicos arbusculares: Características, associação simbiótica e aplicação na agricultura. **Biociência e Desenvolvimento**, v. 25, p. 12-21, 2002.

SIQUEIRA, J. O.; SOUZA, F. A.; CARDOSO, E.J.B.N ; TSAI, S. M. **Micorrizas: 30 anos de pesquisa no Brasil**. 1 ed. Lavras: Editora UFLA, 2010. 716p.

SIQUEIRA, J.O.; SAGGIN-JUNIOR, O.J. The importance of mycorrhizae association in natural low-fertility soils. In: MACHADO, A.T.; MAGNAVACA, R.; PANDEY, S.; SILVA, A.F. (eds). **International symposium on environmental stress: maize in perspective**. México, CIMMVT/UNDP, 1995. 449p.

SMIL, V., Phosphorus in the environment: natural flows and human interferences. **Annu. Rev. Energy Environ**, v. 25, p. 53–88, 2000.

SMITH, E.; JAKOBSEN, I.; GRONLUND, M.; ANDREW, S. F. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant phosphorus nutrition: interactions between pathways of phosphorus uptake in arbuscular mycorrhizal roots have important implications for understanding and manipulating plant phosphorus acquisition. **Plant Physiol.**, v. 156, p. 1050–1057, 2011.

SMITH, S.E.; READ, D.J. **Mycorrhizal symbiosis**. 3 ed. Londres: Academic Press, 2008.

SMITH, S.E; SMITH, F.A. Roles of arbuscular mycorrhizas in plant nutrition and growth: new paradigms from cellular to ecosystems scales. **Annu. Ver. Plant. Biol.**, v. 63, p.227–250, 2011.

SOUZA, F.A.; SILVA, I.C.L.; BERBARA, R.L.L. Fungos Micorrízicos Arbusculares: Muito mais diversos do que se imaginava. In: MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O.; BRUSSAARD, L. **Biodiversidade do solo em ecossistemas brasileiros**. Lavras: Ed. UFLA, 2008.

SOUZA, Tancredo. **Handbook of arbuscular mycorrhizal fungi**. [S.l.]: Springer International Publishing, 2015. DOI:10.1007/978-3-319-24850-9.

STADDON, P.L., RAMSEY, C.B., OSTLE, N., INESON, P., AND FITTER, A.H. Rapid turnover of hyphae of mycorrhizal fungi determined by AMS microanalysis of ^{14}C . **Science (Washington, D.C.)**, v. 300, p. 1138–1140, 2003.

TINKER, P.B. Soil requirements of the oil palm. *In*: CORLEY, R.H.V.; HARDON, J.J.; WOOD, B.J. (ed.). **Solute movement in the rhizosphere**. Amsterdam: Elsevier, 1976. p. 165–181.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Methods of chemical analysis for water and wastes**. Cincinnati: USEPA, 1971.

VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; HORTON, T. R. Socialism in soil? The importance of mycorrhizal fungal networks for facilitation in natural ecosystems. **Journal of Ecology**, v. 97, n.6, p. 1139–1150, 2009, Doi: [10.1111/j.1365-2745.2009.01570.x](https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2009.01570.x).

VAN DER HEIJDEN, M. G. A.; MARTIN, F. M.; SELOSSE, M.-A.; SANDERS, I. R. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. **New Phytologist**. v. 205, n. 4, p. 1406–1423, 2015. Doi: 10.1111/nph.13288.

VAN NOORDWIJK, M.; LAWSON, G.; SOUMANÉ, A.; GROOT J.J.R.; HAIRIAH, K. Root distribution of trees and crops: competition and/or complementarity. *In*: ONG, C. K.; BLACK R.C.; WILSON, J. (org.) **Tree-crop interactions: a physiological approach**. 2 ed. Wallingford: CAB International, 1996. p. 319–364.

VARMA, A. *et al.* (org.). **Mycorrhiza: function, diversity, state of the art**. [S.l.]: Springer International Publishing, 2017a. DOI:10.1007/978-3-319-53064-2.

VARMA A. *et al.* **Mycorrhiza: nutrient uptake, biocontrol, ecorestoration**. [S.l.]: Springer International Publishing, 2017b. DOI:10.1007/978-3-319-68867-1.

VIJAY, V.; PIMM, S.; JENKINS, C.; SMITH, S. The impacts of oil palm on recent deforestation and biodiversity loss. **PLoS One** v. 11, n. 7, p. e0159668, 2016.

VINCENT, A. G.; TURNER, B. L.; TANNER, E. V. J. Soil organic phosphorus dynamics following perturbation of litter cycling in a tropical moist forest. **European Journal of Soil Science**, v. 61, n. 1, p. 48–57, 2010.

WIDIASTUTI, H.; TAHARDI, J.S. Effect of vesicular-arbuscular mycorrhizal inoculation on the growth and nutrient uptake of micropropagated oil palm. **Menara Perkebunan**, v. 61, p. 56–60, 1993.

WITHERS, P. *et al.* Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v. 8, p. 1, p. 1-13, 2018.

ZAMUNER, E.C.; PICONE, L.I.; ECHEVERRIA, H.E. Organic and inorganic phosphorus in

Mollisol soil under different tillage practices, **Soil Tillage**, v. 99, p. 131–138, 2008
<http://dx.doi.org/10.1016/j.still.2007.12.006>.

ZHENG, F.; H.E, X.; GAO, X.; ZHANG, C.; TANG, K. Effects of erosion patterns on nutrients. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 108, n. 1, p. 85-97, 2005.

APÊNDICES A - P

APÊNDICE A- SAF com baixa diversidade vegetal - Adubadeira (UD2).



APÊNDICE B- SAF com alta diversidade vegetal – Biodiverso (UD2).



APÊNDICE C- Faixa biodiversa do SAF, com destaque para a produção de serapilheira no local



Apêndice D- Monocultivo de palma de óleo.



APÊNDICE E- Locais de coleta nos SAFs (indicados pelo círculo em vermelho). Para a avaliação da PCM foram usados apenas os locais: Base e entre plantas de palma de óleo e pilha.



APÊNDICE F- Locais de coleta no monocultivo (indicados pelo círculo em vermelho).



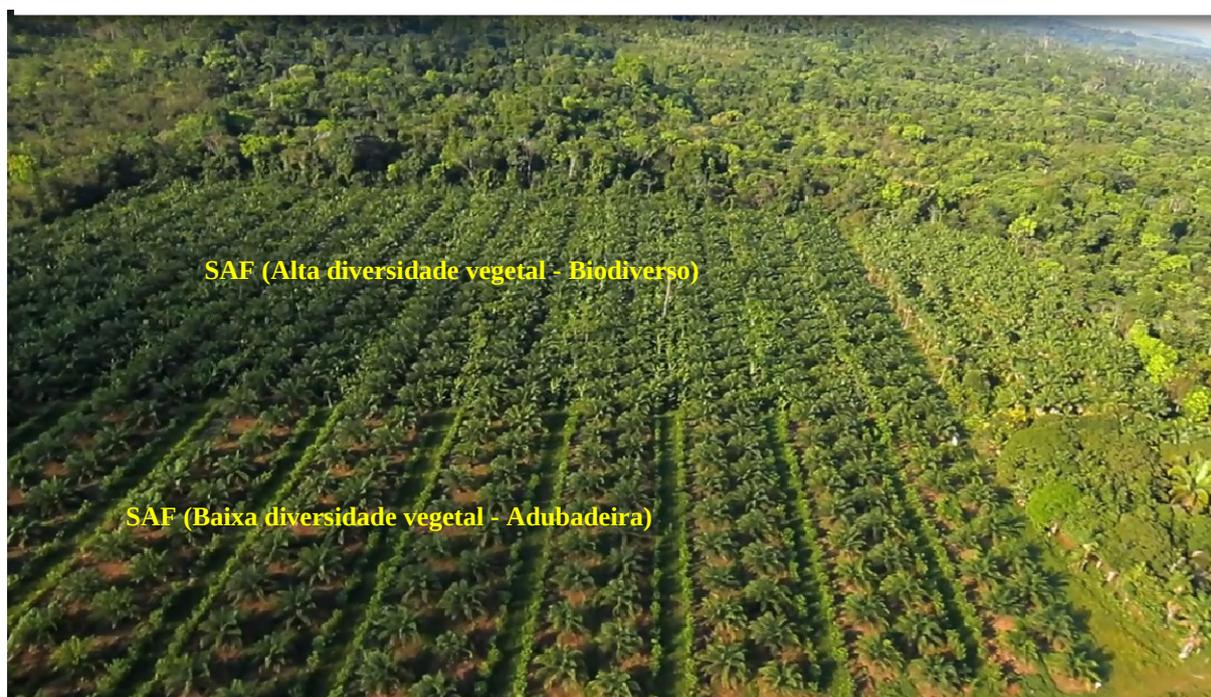
APÊNDICE G- Coleta do material de estudo na base da palma de óleo.



APÊNDICE H- Procedimento de poda das folhas de palma de óleo.



APÊNDICE I- Fotografia aérea da área de estudo mostrando os dois tipos de SAFs avaliados na UD2.
Fonte: Natura (2016).



APÊNDICE J- Peneiramento do material de estudo e separação das raízes.



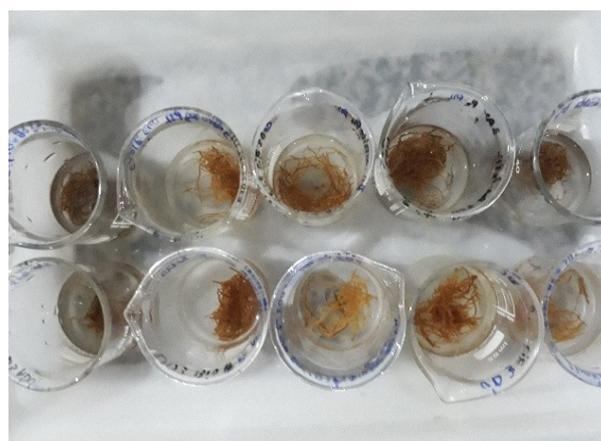
APÊNDICE L- Raízes de palma de óleo separadas e identificadas de acordo com as características morfológicas.



APÊNDICE M- Conservação das raízes em etanol a 60%.



APÊNDICE N- Clareamento das raízes com KOH a 10%.



APÊNDICE O- Coloração das raízes com solução de 0.05% de azul de Tripán em glicerol acidificado (0.5 g/L).



APÊNDICE P- Visualização das estruturas fúngicas no microscópio óptico a 100x.

