



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS**

ALESSA NAYHARA MENDANHA COSTA

**EFLUXO DE CO₂ DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PALMA DE
ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

**BELÉM-PA
2017**

ALESSA NAYHARA MENDANHA COSTA

**EFLUXO DE CO₂ DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PALMA DE
ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

Dissertação 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 básico para a obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de Concentração: Clima e dinâmica socioambiental na Amazônia

Linha de Pesquisa: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Socioambientais

Orientador: Dr. Steel Silva Vasconcelos

**BELÉM-PA
2017**

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)

C837e Costa, Alessa Nayhara Mendanha.
Efluxo de CO₂ do solo em sistemas de produção de palma de óleo na Amazônia Oriental / Alessa Nayhara Mendanha Costa. — 2017.
63 f. : il. color.

Orientador(a): Prof. Dr. Steel Silva Vasconcelos
Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2017.

1. Efluxo de CO₂ do solo. 2. Umidade do solo. 3. Estoque de serapilheira. 4. Raízes finas. I.
Título.

CDD 546.6811

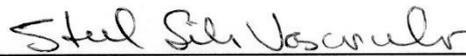
ALESSA NAYHARA MENDANHA COSTA

**EFLUXO DE CO₂ DO SOLO EM SISTEMAS DE PRODUÇÃO DE PALMA DE
ÓLEO NA AMAZÔNIA ORIENTAL**

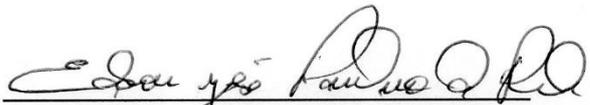
Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com o Museu Paraense Emílio Goeldi e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária da Amazônia Oriental, como requisito para obtenção do título de Mestra em Ciências Ambientais. Área em Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Data de aprovação: 21 / 02 / 2017

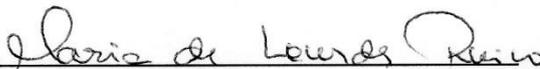
Banca examinadora:



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



Prof. Dr. Edson José Paulino da Rocha - Membro
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará



Prof.ª. Dra. Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo - Membro
Doutora em Agronomia
Museu Paraense Emílio Goeldi



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

A Deus,
A meus pais, Antonio Zildomar de Oliveira
e Leulina Antonio Mendanha E aos meus
irmãos, Pedro Henrique Mendanha e Julia
Mendanha pelas palavras de carinho e
confiança que me fizeram seguir até aqui.

AGRADECIMENTOS

Agradeço,

A Deus, por estar sempre comigo e permitir todas as oportunidades que tive até aqui.

A minha família, pela paciência com a qual lidaram com as minhas faltas. Em especial aos meus pais, Antonio Zildomar de Oliveira e Leulina Antonio Mendanha, por me mostrarem a importância de acreditar em Deus, na nossa família, no amor e em sonhos. E por me ensinarem a semear e lutar por cada um deles.

Ao meu orientador Dr. Steel Silva Vasconcelos, pela assistência e suporte inquestionável; sempre solícito e compreensivo durante a pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA), pelo corpo docente e suas contribuições durante as disciplinas. Pelos coordenadores e funcionários, sempre dispostos a solucionar da melhor forma as questões acadêmicas, e que diversas vezes também me motivaram.

A Fundação Amazônia de Amparo a Estudos e Pesquisa do Pará (FAPESPA), pelo financiamento da pesquisa.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo.

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 todos os funcionários e estudantes de estágio obrigatório, de iniciação científica, de graduação e de pós-graduação do Laboratório de Análises de Sistemas Sustentáveis (LASS) da EMBRAPA que me acompanharam durante as coletas e medições em campo, análises em laboratório e em conversas que estimularam meu crescimento pessoal e profissional.

Aos estagiários Juciene Amador, Dejjane Silva, Pamela Cornélio, Alex Couto Macêdo, Jennifer Silva, Adriana Sena, Taina Rauber, Rodrigo Ferreira de Freitas, pelo suporte inquestionável durante minha pesquisa, meu muito obrigada.

As pessoas amadas, que se alegraram comigo a cada passo dado, Fabiana da Silva Pereira, Tatiane Bilcate e Liliane Cunha, Helen Monique Nascimento Ramos, pela amizade cultivada. Por me apoiarem em diversas situações e partilharem comigo suas experiências acadêmicas e de vida. Nada disso seria possível sem a ajuda de vocês.

Muitíssimo obrigada!

“Seja o que for que você faça ou sonha em fazer, comece.
A audácia tem força, poder e magia.”
Autor desconhecido

RESUMO

As áreas de florestas tropicais desempenham um importante papel no ciclo global do carbono. No entanto, distúrbios antropogênicos vêm alterando a estrutura do ecossistema e, conseqüentemente, o balanço de carbono. Avaliar como as alterações de uso da terra influenciam no efluxo de CO₂ do solo (principal via de deslocamento do CO₂ presente no solo para atmosfera) é importante para compreender como os diferentes tipos de vegetação podem afetar o balanço de carbono. Na Amazônia, o efeito da conversão de áreas para cultivo de palma de óleo sobre o balanço de carbono precisa ser avaliado, em função da expansão em larga escala desses sistemas na região. Neste estudo avaliou-se o efluxo de CO₂ do solo, bem como suas variáveis controladoras, em dois sistemas de produção da palma de óleo (monocultivo de palma de óleo e sistemas agroflorestais com palma de óleo). A pesquisa foi desenvolvida no município de Tomé-Açu, em áreas de agricultura familiar e propriedade particular empresarial. O efluxo de CO₂ do solo, a temperatura do solo e a umidade gravimétrica do solo foram avaliados entre março de 2016 e novembro de 2016. O estoque de raízes finas e serapilheira nos sistemas foram avaliados no período de maior precipitação (maio) e menor precipitação (outubro). O efluxo de CO₂ do solo foi maior nas áreas de floresta sucessional, intermediário nos sistemas agroflorestais com palma de óleo, e menor nos sistemas convencionais da palma de óleo. O efluxo de CO₂ do solo foi maior no período de mais chuvoso e menor no período menos chuvoso. O efluxo de CO₂ do solo é sensível à “conversão” de áreas de floresta em cultivos de palma de óleo. O “metabolismo do solo” no sistema de cultivo de palma de óleo mais diversificado (SAF) se assemelha mais ao do sistema mais íntegro ecologicamente (floresta secundária).

Palavras-chave: Dendezeiro. *Elaeis guineenses*. Floresta secundária. Raízes finas. Respiração do solo. Serapilheira. Sistema agroflorestal.

ABSTRACT

Tropical forest areas play an important role in the global carbon cycle. However, anthropogenic disturbances have altered the structure of the ecosystem and consequently imply in the carbon budget. To evaluate how changes in land use influence the efflux of CO₂ from the soil (the main pathway of CO₂ displacement in soil to atmosphere), it is possible to understand how the different types of vegetation affect the CO₂ efflux of the soil, evaluating the variables that contribute to this process. A greater understanding of this influence motivates the study in different ecosystems, which seek to identify and develop practices that increase carbon stock and nutrient cycling, such as agroforestry systems (SAFs). Due to the expressive expansion of the oil palm in the Amazon region, the objective of this research was to evaluate the effects of CO₂ efflux from the soil, as well as its control variables, in two oil palm production systems (conventional palm oil production systems and agroforestry systems with oil palm). The research was developed in the municipality of Tomé-Açu in areas of family farming and production. Soil CO₂ efflux, soil temperature and soil gravimetric moisture were evaluated between March 2016 and November 2016. The stocks of fine roots and litter in the systems were evaluated in the period of higher precipitation (May) and lower precipitation (October). Soil CO₂ efflux was higher in successional forest areas, intermediate in oil palm agroforestry systems, and lower in conventional palm oil systems. The CO₂ efflux of the soil is sensitive to the "conversion" of forest areas into oil palm crops. The "soil metabolism" in the more diversified oil palm (SAF) system is more similar to that of the more ecologically integrated system (secondary forest).

Keywords: Oil palm. *Elaeis guineensis*. Secondary forest. Fine roots. Soil respiration. Litter. Agroforestry system.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1- Componentes e fatores controladores do efluxo de CO₂ do solo.....22
- Figura 2 - Mapa de localização das áreas de estudo. SAF P-Frut: Sistema Agroflorestais com palma de óleo de oito anos, com anterior uso de pomar. SAF P-Flor: Sistema agroflorestal com palma de óleo, com anterior uso de floresta sucessional de 10 anos. SAF P-Past: sistema agroflorestal com palma de óleo de oito anos, com anterior uso de pastagem; Palma Conv1 e Palma Conv2: Sistema convencional da palma de óleo com oito anos; FS-20: floresta sucessional com 20 anos; FS-30: Floresta Sucessional com 30 anos; FS-40: Floresta sucessional com 40 anos.28
- Figura 3 - Mapa dos sistemas SAF P-Frut: Sistema Agroflorestais com palma de óleo de oito anos, com anterior uso de pomar. SAF P-Flor: Sistema agroflorestal com palma de óleo, com anterior uso de floresta sucessional de 10 anos; FS-20: floresta sucessional com 20 anos; FS-40: Floresta sucessional com 40 anos.29
- Figura 4 - Croqui representativo dos locais de amostragem e medições em sistemas agroflorestais com palma de óleo: (A) 0,6 m da base da palma de óleo, (B) 2 m da base da palma de óleo, (C) pilha, (D) carreador, (E) 0,6 m da base do cacau, (F) entre linhas de plantio, (G) entre plantas.35
- Figura 5 - Medidor do efluxo de CO₂ do solo e temperatura do solo: Medidor de fotossíntese, modelo LI-6400, termômetro de solo, e câmara de respiração do solo (LI-6400-09).36

Figura 6 - Precipitação diária (A-B-C). Efluxo de CO₂ do solo no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Frut), na floresta sucessional de 40 anos (FS-40) (D), no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Flor), na floresta sucessional de 20 anos (FS-20) (E), no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv2), no sistema agroflorestal (SAF P-Past), e na floresta sucessional de 30 anos (FS-30) (F). Umidade gravimétrica do solo no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Frut), na floresta sucessional de 40 anos (FS-40) (G), no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Flor), na floresta sucessional de 20 anos (FS-20) (H), no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv2), no sistema agroflorestal (SAF P-Past), e na floresta sucessional de 30 anos (FS-30) (I) (média ± erro padrão). Letras maiúsculas comparam as médias dos sistemas. Letras minúsculas comparam as médias entre os meses. Médias com letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste Tukey (P< 0,05).....41

Figura 7 - Efluxo de CO₂ do solo nos sistemas convencionais de palma de óleo (Palma Conv1 e Palma Conv2) (A), nos sistemas agroflorestais (SAF P-Frut, SAF P-Flor, e SAF P-Past) (B), e nas florestas sucessionais de 40, 20 e 30 anos (FS-40, FS-20, e FS30) (C). Umidade gravimétrica do solo nos sistemas convencionais de palma de óleo (Palma Conv1 e Palma Conv2) (D), nos sistemas agroflorestais (SAF P-Frut, SAF P-Flor, e SAF P-Past) (E), e nas florestas sucessionais de 40, 20 e 30 anos (FS-40, FS-20, e FS30) (F) (média ± erro padrão). Letras maiúsculas comparam as médias dos sistemas. Letras minúsculas comparam as médias entre os meses. Médias com letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste Tukey (P< 0,05).43

Figura 8 - Efluxo de C anual no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Frut), e na floresta sucessional de 40 anos (FS-40) (A). Efluxo de C anual no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Flor), e na floresta sucessional de 20 anos (FS-20) (B). Efluxo de C anual no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv2), no sistema agroflorestal (SAF P-Past), e na floresta sucessional de 30 anos (FS-30) (C). Efluxo de C anual nos sistemas convencionais de palma de óleo (Palma Conv1 e Palma Conv2) (D), nos sistemas agroflorestais (SAF P-Frut, SAF P-Flor, e SAF P-Past) (E), e nas florestas sucessionais de 40, 20 e 30 anos (FS-40, FS-20, e FS30) (F) média \pm erro padrão). Letras maiúsculas comparam as médias dos sistemas. Letras minúsculas comparam as médias entre os meses. Médias com letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste Tukey ($P < 0,05$).....45

Figura 9 - Raízes finas no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Frut), e na floresta sucessional de 40 anos (FS-40) (A). Raízes finas no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Flor), e na floresta sucessional de 20 anos (FS-20) (B). Raízes finas no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv2), no sistema agroflorestal (SAF P-Past), e na floresta sucessional de 30 anos (FS-30) (C). Respiração microbiana do solo nos sistemas convencionais de palma de óleo (Palma Conv1 e Palma Conv2) (D), nos sistemas agroflorestais (SAF P-Frut, SAF P-Flor, e SAF P-Past) (E), e nas florestas sucessionais de 40, 20 e 30 anos (FS-40, FS-20, e FS30) (F) média \pm erro padrão). Letras maiúsculas comparam as médias dos sistemas. Letras minúsculas comparam as médias entre os meses. Médias com letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste Tukey ($P < 0,05$).53

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Discriminação dos sistemas de acordo com a unidade demonstrativa.....	30
Tabela 2 - Caracterização granulométrica do solo dos sistemas agroflorestais SAF P-Frut, SAF P-Flor e SAF P-Past e sistemas convencionais de produção da palma de óleo, em Tomé Açu, Pará.	30
Tabela 3 - Manejo realizado nas áreas de sistemas agroflorestais com palma de óleo no ano de 2016.....	34
Tabela 4 - Distribuição dos pontos amostrais por parcela.....	35
Tabela 5 - Valores de teste dos níveis descritivos (valor P) das fontes de variação analisadas.	39
Tabela 6 - Médias do efluxo de CO ₂ do solo e umidade gravimétrica das áreas de estudo durante o período menos chuvoso e chuvoso.	40
Tabela 7 - Estoque de serapilheira por frações de três unidades demonstrativas (UD1-UD2-UD3) com sistemas agroflorestais com palma de óleo, floresta secundária e sistema convencional de palma de óleo.	48
Tabela 8 - Estoque de serapilheira por frações em diferentes sistemas agroflorestais com palma de óleo, florestas secundárias e sistemas convencionais de palma de óleo.	50
Tabela 9 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre as variáveis com o efluxo de C anual nos sistemas convencionais de palma de óleo, nos sistemas agroflorestais com palma de óleo, e nas florestas secundárias, em Tomé-açu, Pará. Nível de significância: *p < 0,05.....	54

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO GERAL	14
2	HIPÓTESES.....	17
3	OBJETIVOS	18
3.1	Objetivo Geral.....	18
3.1	Objetivos Específicos	18
4	CONTEXTUALIZAÇÃO	19
4.1	Sistemas convencionais de palma de óleo	19
4.2	Sistemas agroflorestais (SAF's)	20
4.3	Efluxo de CO₂ do solo.....	21
5	EFLUXO DE CO₂ DO SOLO EM DIFERENTES SISTEMAS DE USO E COBERTURA DA TERRA EM TOMÉ-AÇU, AMAZÔNIA ORIENTAL	24
5.1	Introdução	25
5.2	Material e métodos	27
5.2.1	Características da área de estudo	27
5.2.2	Descrição do experimento	34
5.2.3	Análise estatística	38
5.3	Resultados.....	38
5.3.1	Efluxo de CO₂ do solo, umidade do solo e efluxo anual de C do solo	38
5.3.2	Estoque de carbono no solo, serapilheira e raízes	46
5.3.3	Correlação.....	54
5.4	Discussão.....	54
5.5	Conclusão.....	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO GERAL

Áreas de florestas desempenham um importante papel na manutenção do balanço de carbono, atuando como sumidouro e fonte (BAE et al., 2013). Na Amazônia, tais alterações estão ligadas, principalmente, à conversão de grandes áreas florestais em diferentes tipos de uso, o que afeta a estrutura do ecossistema e o balanço de carbono (FEARNSIDE, 2003).

O efluxo de dióxido de carbono (CO₂) do solo desempenha um importante papel no ciclo global do carbono dos ecossistemas, e corresponde a principal via de transferência do carbono do ecossistema para atmosfera (SOTTA et al., 2004). A produção de CO₂ do solo é o resultado da respiração autotrófica e heterotrófica, que são representadas, respectivamente, pela atividade microbológica, na decomposição do material orgânico, e pela atividade de raízes finas (ADACHI et al., 2006; RYAN; LAW, 2005). Estes processos são influenciados pela temperatura do solo e umidade do solo (ADACHI et al., 2006; DAVIDSON et al., 2000; SALIMON et al., 2004), bem como pelos diferentes usos e cobertura da terra (DAVIDSON et al., 2000).

Diversos estudos avaliaram a resposta do efluxo de CO₂ do solo em diferentes usos e coberturas da terra na região amazônica (DAVIDSON et al., 2000; ZANCHI et al., 2012), indicando que as maiores taxas de efluxo de CO₂ do solo ocorrem em áreas de floresta primária e secundária. Compreender as variações do efluxo de CO₂ do solo em vários ecossistemas é importante para compreensão do ciclo do carbono.

Mudanças no uso do solo alteram os reservatórios de carbono terrestre, afetando diretamente as taxas de decomposição e adição de matéria orgânica do solo (MARQUES et al., 2015), que por sua vez poderão afetar o efluxo de CO₂ do solo. Perdas no estoque de carbono devido aos diferentes usos da terra, associados ao aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera oriundo do desmatamento, contribuem para intensificação das emissões dos gases responsáveis pelo aquecimento global, os chamados gases de efeito estufa (GEE) (IPCC, 2014). Deste modo, o governo brasileiro tem buscado promover ações que possibilitem a redução da emissão dos gases GEEs (PNMC, 2007), como o incentivo governamental para produção de biodiesel por meio do Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), estimulando o uso de biocombustíveis a partir de fontes renováveis.

No ano de 2010, o governo federal lançou o Zoneamento Agroecológico, de Produção e Manejo para a Cultura da Palma de Óleo na Amazônia, aumentando assim a perspectiva de expansão da palma de óleo na região. Neste mesmo ano, no município de Tomé-Açu, o governo federal lançou o Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma, propondo uma

alternativa economicamente mais viável que o desmatamento para a população local, por meio da preservação da floresta nativa, e recuperação de áreas desmatadas e degradadas, concedendo linhas de créditos com baixas taxas de juros para os agricultores familiares.

A palma de óleo é uma oleaginosa de grande importância para a economia dos países exportadores de óleo vegetal, muito utilizada nas indústrias alimentícia e de cosméticos (BECKER, 2011). Diversos benefícios gerados por esta cultura, dentre os quais a capacidade de fixação de carbono atmosférico e a possibilidade de recuperação de áreas degradadas, por ser uma cultura com ciclo de vida comercial de 25 anos, são descritos na literatura (HOMMA; FURLAM, 2000). A versatilidade do uso comercial da palma de óleo ao mercado consumidor e em crescente expansão, as boas condições de adaptação da espécie as condições edafoclimáticas da nossa região, a maior produção de óleo por hectare plantado; e a utilização como combustível renovável, são os principais fatores que contribuiram para perspectiva de expansão dessa cultura (HOMMA; VIEIRA, 2012; LEVERMANN; SOUZA, 2014).

O Pará é o maior produtor brasileiro de palma de óleo (FRAZÃO et al., 2013), com os principais polos de produção localizados nos municípios de Tomé-Açu, Acará, Tailândia e Moju, com grande destaque na produção de óleo para fins energéticos (LAMEIRA et al., 2015). A importância econômica dessa cultura dentro do cenário brasileiro na busca por alternativas energéticas mais sustentáveis tem sido alvo de pesquisas recentes, na tentativa de compreender quais os potenciais dessa cultura na recuperação de áreas degradadas e no desenvolvimento regional (BECKER, 2011).

Nos últimos anos, o cultivo da palma de óleo ganhou maior visibilidade e incentivos na Amazônia brasileira (LAMEIRA et al., 2015). Entretanto, os sistemas convencionais de produção da palma de óleo são considerados uma ameaça emergente para a biodiversidade na Amazônia (FREUDMANN et al., 2015), uma forma agressiva de expansão da cultura. Neste contexto, os sistemas agroflorestais (SAFs) surgiram como uma alternativa potencialmente sustentável para produção de palma de óleo (SANTIAGO et al., 2013) e uma técnica viável para a recuperação dos solos degradados, pois promovem conservação do solo e ciclagem de nutrientes, podendo manter a diversidade biológica em níveis similares aos de ecossistemas naturais (ARAÚJO et al., 2007; LIMA et al., 2008; MARQUES et al., 2015). Além disso, SAFs geralmente apresentam uma diversidade de culturas econômicas, gerando um maior número de produtos e serviços ambientais em uma mesma área.

A avaliação do efluxo de CO₂ do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo, ainda é pouco abordado na literatura (SILVA et al., 2016). Com isso, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efluxo de CO₂ do solo, bem como algumas variáveis bióticas e abióticas que

influenciam nesse processo, em sistemas agroflorestais com palma de óleo e sistemas convencionais da palma de óleo, tendo com áreas de referência florestas sucessionais com diferentes idades.

2 HIPÓTESES

- O efluxo de CO₂ do solo nos sistemas agroflorestais baseados em palma de óleo é superior ao das áreas convencionais da palma de óleo. Nas áreas de floresta secundária o efluxo de CO₂ do solo é superior ao dos sistemas de produção de palma de óleo.
- O efluxo de CO₂ do solo é maior no período chuvoso e menor no período menos chuvoso.
- O efluxo de CO₂ nos sistemas agroflorestais baseados em palma de óleo, nas áreas de cultivo convencional de palma de óleo e nas áreas de florestas sucessionais pode ser controlado pela umidade do solo.
- O estoque de serapilheira e raízes finas nos sistemas agroflorestais baseados em palma de óleo é superior ao estoque das áreas de cultivo convencionais de palma de óleo. As áreas de floresta secundária apresentam estoque de serapilheira e raízes finas superior aos dois sistemas produtivos contendo palma de óleo.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Avaliar os efeitos do plantio da palma de óleo em sistemas agroflorestais e monocultivo sobre o efluxo de CO₂ do solo, o estoque de raízes finas e de serapilheira, tendo os valores de florestas sucessionais com diferentes idades como referência.

3.1 Objetivos Específicos

- Determinar mensalmente o efluxo de CO₂ do solo, a temperatura do solo e a umidade gravimétrica em sistemas agroflorestais de produção de palma de óleo, cultivos convencionais de palma de óleo e florestas sucessionais.
- Avaliar o estoque de serapilheira em sistemas agroflorestais de produção de palma de óleo, cultivos convencionais de palma de óleo e florestas sucessionais, nos períodos de maior e menor precipitação durante o ano.
- Determinar a densidade de raízes finas em sistemas agroflorestais de produção de palma de óleo, cultivos convencionais de palma de óleo e florestas sucessionais.

4 CONTEXTUALIZAÇÃO

4.1 Sistemas convencionais de palma de óleo

A palma de óleo (*Elaeis guineenses* Jacq.) originária da África Ocidental, é uma cultura perene cultivada no Brasil desde o século XVII (FRAZÃO et al. 2013). O cultivo da palma de óleo no país é visto como uma fonte de óleo vegetal, amplamente utilizado nas indústrias de alimentos, cosméticos (BECKER, 2011; BASTOS et al., 2001). Essa cultura, entre todas as matérias primas destinadas a produção de biodiesel, é considerada uma das oleaginosas mais favorável para produção de biodiesel no Brasil, pois é a que mais produz óleo por área plantada, com ciclo intenso durante todo ano (HOMMA; MONTEIRO, 2014), apresentando assim um grande valor econômico.

No Brasil, programas governamentais estão estimulando a incorporação de óleos vegetais no modelo energético, principalmente da palma de óleo, como o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) criado em 2003 e o Zoneamento agroecológico em 2010. No ano de 2010 o governo federal lançou Zoneamento agroecológico, de produção e manejo para a cultura da palma de óleo na Amazônia, aumentando assim a perspectiva de expansão da palma de óleo na região. Neste mesmo ano, no município de Tomé Açu, o governo federal lançou o Programa de Produção Sustentável de Óleo de Palma, propondo uma alternativa economicamente mais viável que o desmatamento para a população local, por meio da preservação da floresta nativa, e recuperação de áreas desmatadas e degradadas, concedendo linhas de créditos com baixas taxas de juros para os agricultores familiares.

O governo pretende expandir a área cultivada dessa oleaginosa para mais de um milhão de hectares até 2020, sendo que em 2011 a área plantada era de aproximadamente 120.000 hectares (BRASIL, 2010). Atualmente o Pará é o maior produtor da palma de óleo no Brasil, representando 80% da área cultivada no país, os principais polos são os municípios de Tomé Açu, Acará, Tailândia e Moju (LAMEIRA et al., 2015).

A versatilidade do uso comercial da palma de óleo ao mercado consumidor e em crescente expansão, as boas condições de adaptação da espécie as condições edafoclimáticas da nossa região, a maior produção de óleo por hectare plantado; e a utilização como combustível renovável, são os principais fatores que contribuem para perspectiva de expansão dessa cultura (HOMMA; VIEIRA, 2012; LEVERMANN; SOUZA, 2014). Entretanto os sistemas de monocultivo dessa cultura são considerados uma ameaça emergente para a biodiversidade na Amazônia (FREUDMANN et al., 2015), com grande potencial de ocasionar impactos negativos sobre o solo, modificando as características físicas, químicas, e biológica, levando a sua rápida

degradação, e provocando inúmeras modificações no solo, principalmente no conteúdo de matéria orgânica (NUNES et al., 2010). As áreas de monocultivo podem levar a rápida degradação do solo, devido ao aumento da compactação, e perdas de qualidade, prejudicando o processo de infiltração, e afetando negativamente a sustentabilidade do sistema agrícola (LINH et al., 2015).

4.2 Sistemas agroflorestais (SAF's)

Os sistemas agroflorestais (SAF's) são caracterizados pelo consórcio de espécies florestais com cultivos agrícolas, que objetiva a redução da degradação ambiental pelo uso excessivo da terra, bem como a fixação do produtor no campo, tornando-se uma alternativa de agricultura sustentável, quando comparado à agricultura tradicional (DIAS et al., 2015; RAMESH et al., 2015). Uma técnica eficaz para garantir a sustentabilidade do solo e proporcionar a melhoria na conservação dos recursos naturais (PEZARICO et al., 2013). Os SAF's possibilitam a manutenção do equilíbrio do ecossistema, apresentando grande potencial para o sequestro de carbono (TUMWEBAZE; BYAKAGABA, 2016), aumentando a qualidade do solo, a produtividade, e o aporte de matéria orgânica, promovendo assim a manutenção da biodiversidade (BAAH-ACHEAMFOUR et al., 2015).

Atualmente esses sistemas estão sendo utilizados como uma alternativa para recuperação de áreas degradadas, pois proporcionam a melhoria das propriedades físicas e químicas do solo, e a ampla biomassa presente no sistema é responsável pelo aumento do aporte de matéria orgânica no solo, proporcionando assim condições mais favoráveis para o estímulo da atividade dos microrganismos (CASTRO et al., 2009; PEZARICO et al., 2013). No nordeste da Índia a avaliação da sustentabilidade dos sistemas agroflorestais a partir de indicadores de qualidade do solo comprovaram que o sistema consegue manter a qualidade do solo e a sustentabilidade agrícola através do aumento do sequestro de carbono nesse ecossistema (RAMESH et al., 2015).

A expansão do cultivo de palma de óleo na Amazônia brasileira aumentou consideravelmente nos últimos anos, principalmente em áreas de monocultivo. A política de expansão dessa cultura prevê a inserção desse plantio apenas em áreas já degradadas, entretanto ainda existe uma pressão muito grande para implantação dessa cultura em áreas de floresta. Atualmente o governo busca a integração da agricultura familiar com a produção de palma de óleo. O enriquecimento de SAF's com palma de óleo surge como uma alternativa sustentável de expansão dessa cultura nas áreas de agricultura familiar, pois apresenta vantagens

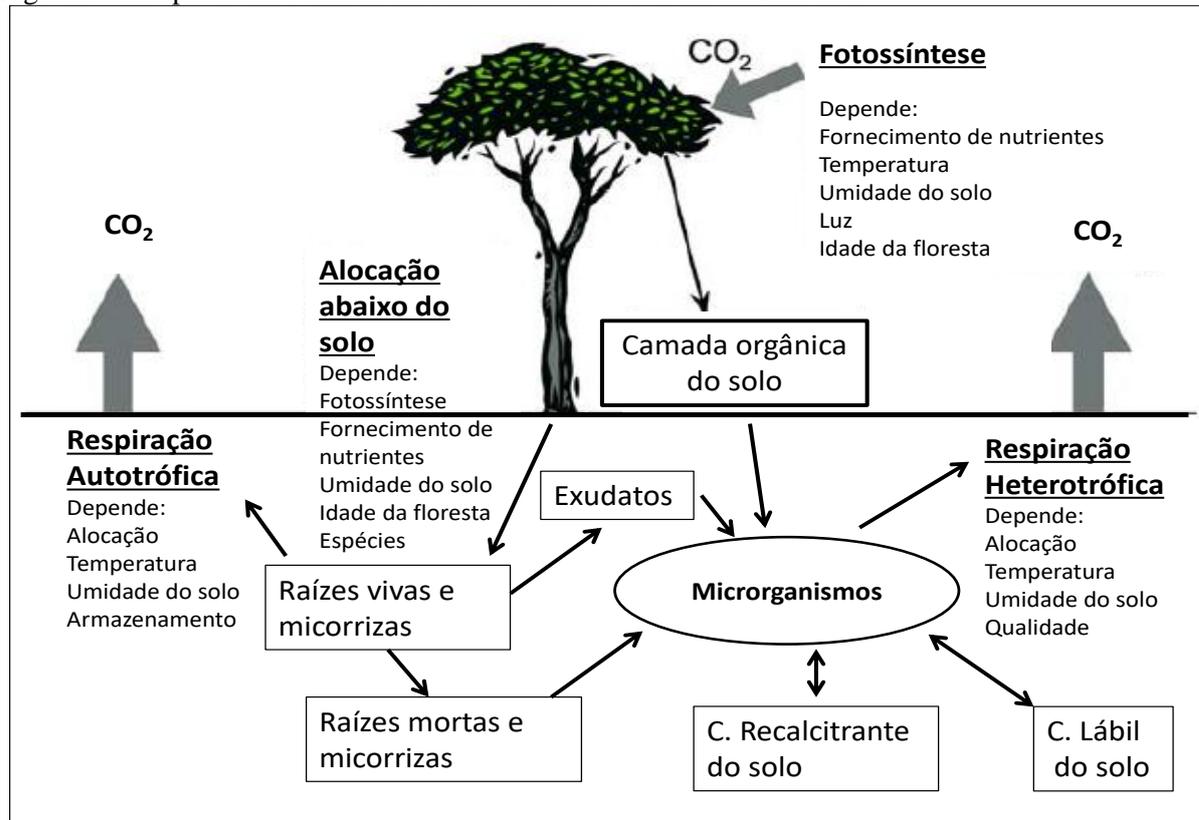
ambientais, sociais e econômicas, com grande potencial de armazenamento de carbono (C) nesse sistema, porém ainda pouco estudado (CARVALHO et al., 2014).

4.3 Efluxo de CO₂ do solo

O efluxo de CO₂ do solo é o processo físico de liberação do CO₂ do solo para atmosfera, composto pelos fluxos da respiração autotrófica e heterotrófica, considerado a principal via de deslocamento do carbono do ecossistema para atmosfera, influenciando no equilíbrio entre a fotossíntese e a respiração do ecossistema (RYAN; LAW, 2005). Com o aumento dos gases de efeito estufa e as mudanças climáticas o solo pode ser uma fonte líquida ou sumidouro do CO₂, desempenhando um papel fundamental no balanço global do carbono (SOTTA et al., 2004; GRANIER et al. 2000; THOKCHOM; YADAVA, 2014), e quando manejados adequadamente reduzem as perdas de C do solo, aumentando o estoque de carbono.

Geralmente a temperatura do solo e umidade do solo são considerados os principais fatores abióticos controladores do efluxo de CO₂ do solo (ZANCHI et al., 2009; SOTTA et al., 2004; RAICH; TUFEKCIOGLU, 2000). Altas temperaturas ocasionam a degradação enzimática, conseqüentemente ocorre a diminuição da atividade respiratória. Em relação a umidade gravimétrica do solo, condições de solo muito secas tendem a diminuir o efluxo de CO₂ do solo, condições intermediárias aumentam o fluxo de CO₂ do solo, entretanto valores elevados de umidade gravimétrica também diminuem o efluxo de CO₂ do solo (LUO; ZHOU, 2006). Dentre os fatores bióticos que influenciam no efluxo de CO₂ do solo destaca-se a biomassa de raízes, estoque de serapilheira, respiração micorrízica e rizosférica, e estoque de carbono (ZHOU et al., 2013) (Figura 1).

Figura 1- Componentes e fatores controladores do efluxo de CO₂ do solo



Fonte: (RYAN; LAW, 2005). Adaptado (CUNHA, 2016).

A serapilheira e as raízes armazenam uma grande fração de carbono nos ecossistemas (RYAN; LAW, 2005). A respiração das raízes corresponde a mais da metade da respiração do solo, é determinada pela biomassa radicular. A biomassa radicular depende da produção do ecossistema e dos padrões de alocação das plantas, controlada por diversos fatores ambientais e estruturais da vegetação (LUO; ZHOU, 2006). Geralmente a produção de raízes diminui com a idade da vegetação, fortemente influenciada pela oferta de nutrientes, disponibilidade de água, irradiação e pressão parcial de CO₂ (LUO; ZHOU, 2006).

A produção de serapilheira está diretamente relacionada a produtividade líquida dos ecossistemas, em áreas de floresta a produção de serapilheira grossa tende a aumentar com a idade do ecossistema. A decomposição da serapilheira é fortemente regulada por fatores ambientais (temperatura, precipitação e evapotranspiração), qualidade do material, relação C:N, teor de lignina, e tipo de vegetação (LUO; ZHOU, 2006).

A taxa de contribuição dos fatores biótico e abióticos no efluxo de CO₂ do solo pode variar sazonalmente e entre os ecossistemas. Salimon et al. (2004) observou efeitos da precipitação no efluxo de CO₂ do solo em áreas de floresta e pastagem na Amazônia ocidental,

relatando maiores médias de efluxo de CO₂ do solo no período mais chuvoso e médias mais baixas no período de menor precipitação.

Estimar as taxas de efluxo de CO₂ do solo em diferentes usos da terra auxilia na compreensão das variações desse processo (ADACHI et al., 2006). Pois o tipo de vegetação é um dos fatores que interfere nas taxas de efluxo de CO₂ do solo, devido principalmente a heterogeneidade da cobertura vegetal, biomassa de raízes, quantidade e qualidade de substrato e características de solo (ZHOU et al., 2013).

5 EFLUXO DE CO₂ DO SOLO EM DIFERENTES SISTEMAS DE USO E COBERTURA DA TERRA EM TOMÉ-AÇU, AMAZÔNIA ORIENTAL

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do cultivo da palma de óleo em diferentes sistemas de uso da terra e cobertura do solo sobre o efluxo de CO₂ do solo, na Amazônia Oriental. Este trabalho avaliou três sistemas agroflorestais com palma de óleo de oito anos implantados em áreas previamente cobertas com floresta sucessional de 10 anos (SAF P-Flor), pastagem degradada (SAF P-Past) e pomar abandonado (SAF P-Frut), duas áreas de cultivo convencional da palma de óleo de oito anos (Palma Conv1 e Palma Conv2) e três áreas de florestas sucessionais com diferentes idades (FS-20, FS-30, FS-40). Nestes sistemas foram avaliados mensalmente o efluxo de CO₂ do solo, a umidade gravimétrica do solo e a temperatura do solo, de março de 2016 até novembro de 2016. O estoque de raízes finas e de serapilheira foram avaliadas em maio e outubro de 2016. O efluxo de CO₂ do solo foi maior nas áreas de floresta sucessional (FS-20 = $6,88 \pm 0,29 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, FS-30 $14,11 \pm 0,98 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, FS-40 = $7,62 \pm 0,78 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), intermediário nas áreas de sistemas agroflorestais (SAF P-Flor = $4,60 \pm 0,63 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, SAF P-Past $3,57 \pm 0,40$ e $6,43 \pm 0,26 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, SAF P-Frut = $5,28 \pm 0,49 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e menor nos sistemas convencional (Palma Conv1 = $1,71 \pm 0,1$ e $3,61 \pm 0,53 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; Palma Conv2 = $3,03 \pm 0,21 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Nesses sistemas, a umidade do solo foi o principal controlador do efluxo de CO₂ do solo. Já o estoque de serapilheira na fração fina lábil e grossa foi maior nas áreas de floresta sucessional. O efluxo de CO₂ do solo é sensível à “conversão” de áreas de floresta em cultivos de palma de óleo. O “metabolismo do solo” no sistema de cultivo de palma de óleo mais diversificado (SAF) se assemelha mais ao do sistema mais íntegro ecologicamente (floresta secundária).

Palavras-chave: Efluxo de CO₂ do solo, umidade do solo, estoque de serapilheira, raízes finas.

ABSTRACT

The objective of this study was to evaluate the effect of oil palm cultivation on different land use systems and soil cover on soil CO₂ efflux in the Eastern Amazon. This work evaluated three agroforestry systems with oil palm of eight years implanted in areas previously covered with successional forest of 10 years (SAF P-Flor), degraded pasture (SAF P-Past) and abandoned orchard (SAF P-Frut), two areas of conventional palm oil cultivation (Palma Conv1 and Palma Conv2) and three successional forest areas with different ages (FS-20, FS-30, FS-40). In these

systems, soil CO₂ efflux, soil gravimetric moisture and soil temperature were evaluated in the period from March to November 2016. The variables of stock of fine roots and litter stock were evaluated in the month of May and October. The results showed that soil CO₂ efflux was higher in successional forest areas (FS-20 = $6.88 \pm 0.29 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, FS-30 $14.11 \pm 0.98 \mu\text{mol CO}_2 \text{ M-2 s-1}$, FS-40 = $7.62 \pm 0.78 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ S}^{-1}$), intermediate in agroforestry systems (SAF P-Flor = $4.60 \pm 0.63 \mu\text{mol CO}_2 \text{ M-2 s-1}$, SAF P-Frast 3.57 ± 0.40 and $6.43 \pm 0.26 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, SAF P-Frut = $5.28 \pm 0.49 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s-1}$) and lower in conventional systems (Palma Conv1 = $1,71 \pm 0,1$ and $3,61 \pm 0,53 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m-2 s-1}$; Palma Conv2 = $3,03 \pm 0,21 \text{ Mmol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). In these systems, soil moisture was the main driver of soil CO₂ efflux. The litter stock in the fine and loose fraction was higher in the areas of successional forest. The CO₂ efflux of the soil is sensitive to the "conversion" of forest areas into oil palm crops. The "soil metabolism" in the more diversified oil palm (SAF) system is more similar to that of the more ecologically integrated system (secondary forest).

Key-words: Soil CO₂ efflux, soil moisture, litter stock, fine roots.

5.1 Introdução

As florestas tropicais desempenham um papel fundamental na dinâmica do ciclo global do carbono (BAE et al., 2012). No entanto, mudanças no uso da terra, oriundas da transformação de áreas de florestas nativas ou secundárias para áreas de agricultura ou pastagem, alteram a dinâmica do efluxo de CO₂ do solo (DAVIDSON et al., 2000; ZANCHI et al., 2012). O efluxo de CO₂ do solo é a principal via de transferência do carbono da biosfera para a atmosfera, e o maior reservatório de carbono no ecossistema terrestre é o solo (GRANIER et al., 2000).

O efluxo de CO₂ do solo compreende a respiração autotrófica e heterotrófica (SOTTA et al., 2004). Diversas variáveis podem controlar o efluxo de CO₂ do solo, dentre elas as mais citadas na literatura são umidade do solo e temperatura (ADACHI et al., 2006; DAVIDSON et al. 2000; SALIMON et al., 2004). O teor de água ótimo geralmente é próximo à capacidade de campo, pois sob condições muito secas o efluxo de CO₂ do solo tende a diminuir, e em condições intermediárias de umidade tende a aumentar (SALIMON et al., 2004). Quando a umidade gravimétrica do solo é muito elevada, o efluxo de CO₂ do solo diminui (LOU; ZHOU, 2006).

A pressão sobre áreas de floresta nativa, associada a expansão da agricultura na região, estão resultando na alteração do mosaico da vegetação na Amazônia, com um aumento expressivo de áreas de floresta sucessionais. O uso intensivo da terra, associado à falta de práticas de conservação, ocasionam efeitos negativos no ambiente e na produtividade agrícola, alterando características físicas, químicas e biológicas do solo, e reduzindo a disponibilidade de nutrientes as plantas (LIMA et al., 2008; MARQUES et al., 2015; ARAUJO et al., 2007). Logo, estudar a dinâmica do efluxo de CO₂ do solo em diferentes áreas de uso da terra possibilita compreender como as mudanças nos ecossistemas afetam o efluxo de CO₂ do solo, e seu comportamento temporal e espacial.

A palma de óleo é a principal matéria prima para produção de biodiesel no Brasil, pois é a que mais produz óleo por área plantada, com ciclo intenso durante todo ano (MONTEIRO; HOMMA, 2014), apresentando assim um grande valor econômico. No estado do Pará, maior produtor da palma de óleo no Brasil, os principais polos produtivos são os municípios de Tomé-Açu, Acará, Tailândia e Moju, com grande destaque na produção de óleo para fins energéticos (LAMEIRA et al., 2015).

Nos últimos anos o cultivo da palma de óleo ganhou maior visibilidade e incentivos na Amazônia brasileira (LAMEIRA et al., 2015). Por outro lado, os sistemas convencionais de produção da palma de óleo (monocultivos) são considerados uma ameaça emergente para a biodiversidade na Amazônia (FREUDMANN et al., 2015) e também para os agricultores familiares. Neste contexto, os sistemas agroflorestais (SAFs) representam uma alternativa potencialmente sustentável para produção de palma de óleo (SANTIAGO et al., 2013), em função dos seus impactos positivos sobre a conservação do solo, a ciclagem de nutrientes e a diversidade biológica (DIAS et al., 2015; RAMESH et al., 2015; BAAH-ACHEAMFOUR et al., 2015). Além disso, os SAFs geralmente apresentam alta diversidade de culturas econômicas plantadas, gerando um maior número de produtos e serviços ambientais em uma mesma área.

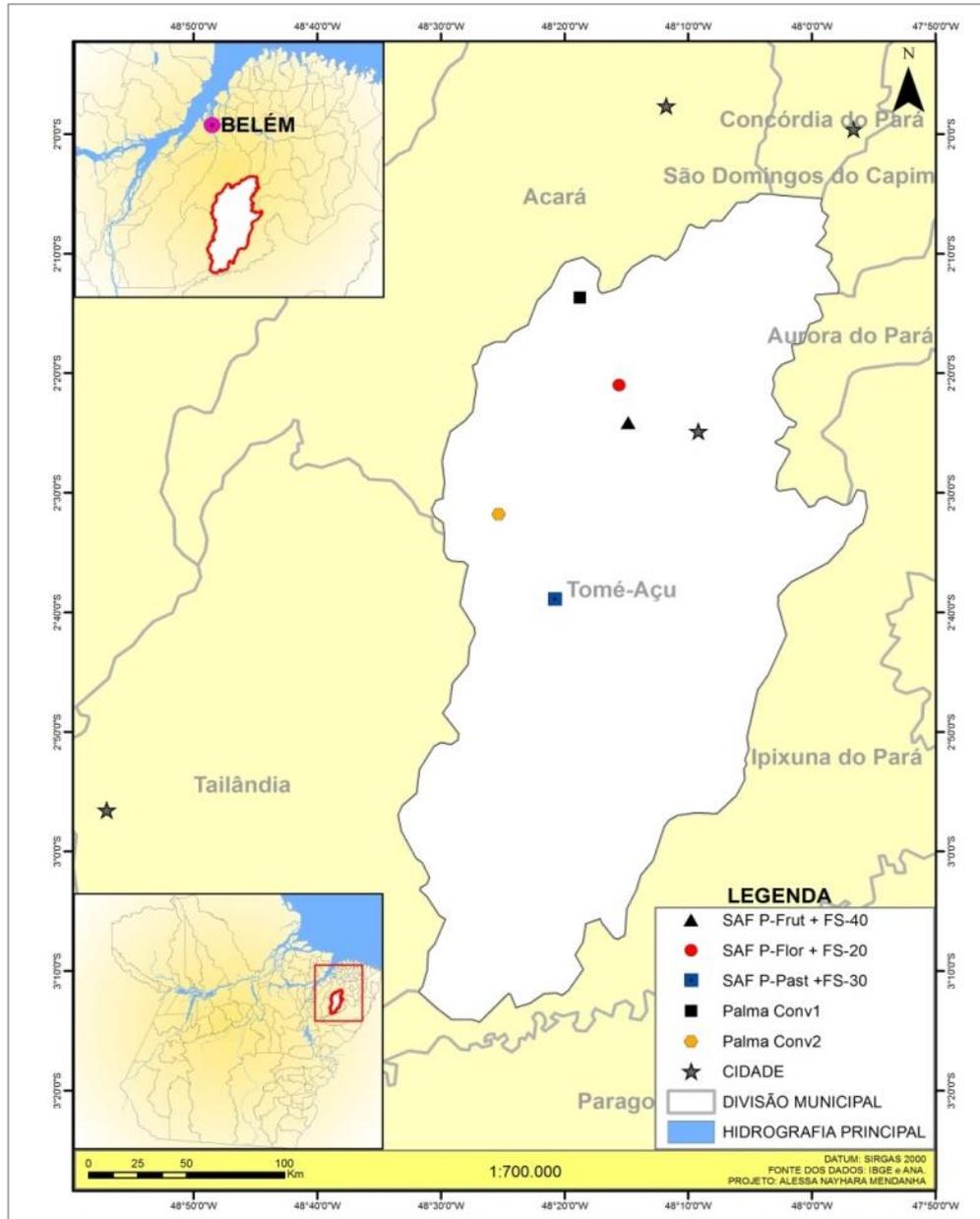
A avaliação do efluxo de CO₂ do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo ainda é pouco discutido na literatura. Com isso, o objetivo desse trabalho foi avaliar o efluxo de CO₂ do solo, bem como as variáveis que influenciam nesse processo, em sistemas agroflorestais com palma de óleo e sistemas convencionais da palma de óleo. Para obtenção de valores de referência, foram utilizadas áreas de florestas sucessionais com diferentes idades.

5.2 Material e métodos

5.2.1 Características da área de estudo

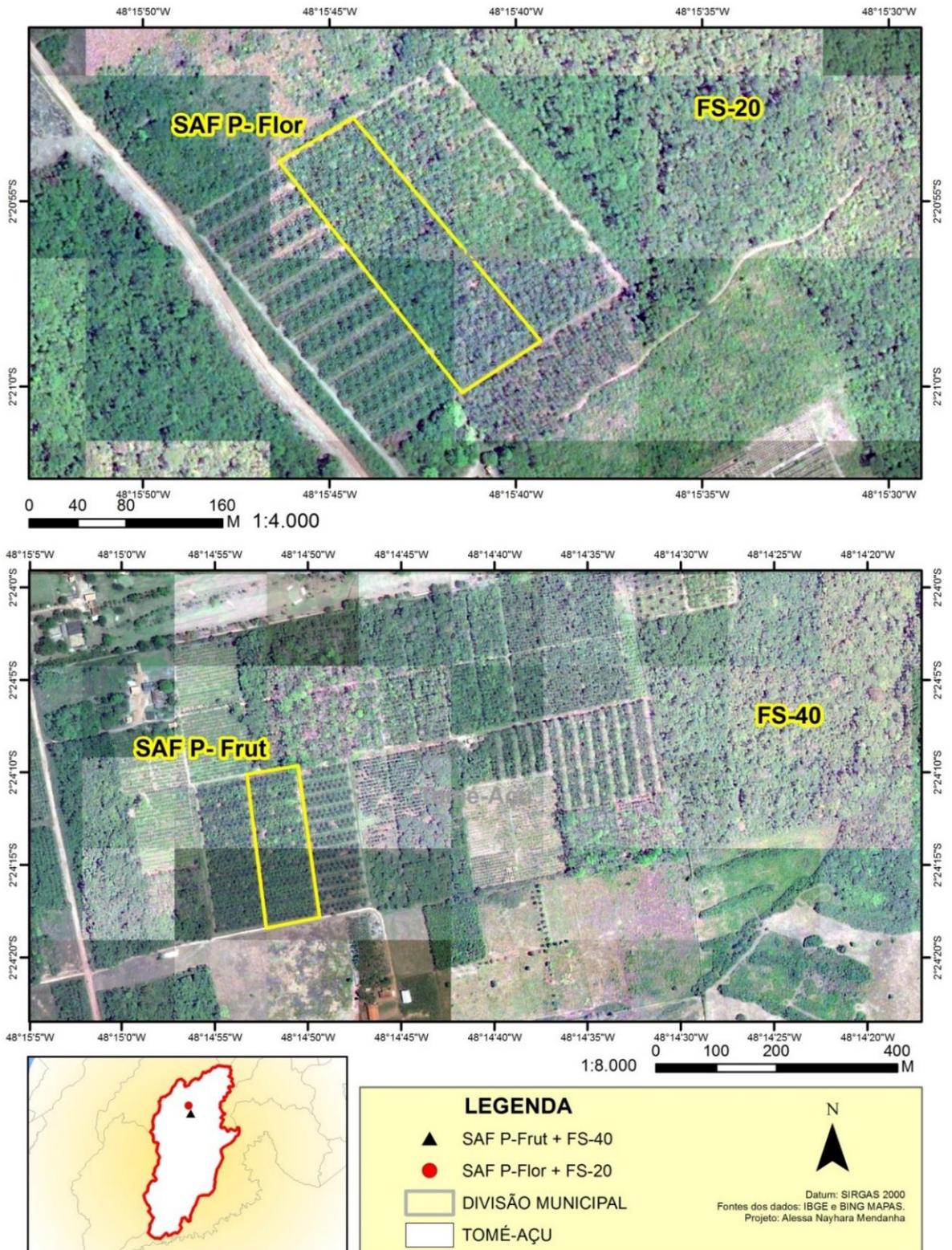
A pesquisa foi desenvolvida em Tomé-Açu, Pará, Amazônia Oriental, no período de março de 2016 a Março de 2017, onde foram avaliados: (a) três sistemas agroflorestais com palma de óleo com aproximadamente oito anos, cujos históricos de uso correspondem a floresta sucessional de aproximadamente 12 anos (SAF P-Flor) (Figura 3), pastagem degradada de 25 anos (SAF P-Past), e pomar abandonado (SAF P-Frut) (Figura 3); (b) duas áreas de monocultivo de palma de óleo com aproximadamente oito anos (Palma Conv1 e Palma Conv2); e três florestas sucessionais de aproximadamente 20 anos (FS 20) (Figura 3), 30 anos (FS 30) e 40 anos (FS-40) (Figura 2) (Figura 3).

Figura 2 - Mapa de localização das áreas de estudo. SAF P-Frut: Sistema Agroflorestais com palma de óleo de oito anos, com anterior uso de pomar. SAF P-Flor: Sistema agroflorestal com palma de óleo, com anterior uso de floresta sucessional de 10 anos. SAF P-Past: sistema agroflorestal com palma de óleo de oito anos, com anterior uso de pastagem; Palma Conv1 e Palma Conv2: Sistema convencional da palma de óleo com oito anos; FS-20: floresta sucessional com 20 anos; FS-30: Floresta Sucessional com 30 anos; FS-40: Floresta sucessional com 40 anos.



Fonte: Da autora.

Figura 3 - Mapa dos sistemas SAF P-Frut: Sistema Agroflorestais com palma de óleo de oito anos, com anterior uso de pomar. SAF P-Flor: Sistema agroflorestal com palma de óleo, com anterior uso de floresta sucessional de 10 anos; FS-20: floresta sucessional com 20 anos; FS-40: Floresta sucessional com 40 anos.



Fonte: Da autora.

Cada sistema agroflorestal possui uma área de floresta sucessional como referência, denominado unidade demonstrativa (UD). Para cada UD foi utilizado uma área de monocultivo de palma de óleo para comparar os resultados (Tabela 1).

Tabela 1 - Discriminação dos sistemas de acordo com a unidade demonstrativa.

Unidade Demonstrativa	Sistemas
UD 1	SAF P - Frut
	Palma Conv1
	FS - 40
UD 2	SAF P - Flor
	Palma Conv1
	FS - 20
UD 3	SAF P - Past
	Palma Conv2
	FS - 30

Fonte: Da autora.

O clima local é classificado como tropical quente e úmido, Ami, conforme a classificação de Köppen, com temperatura média anual de 26°C. Segundo os dados obtidos no período de janeiro de 2016 a dezembro de 2016 fornecidos pela Natura a precipitação média anual de Tomé-Açu é 2400 mm. A vegetação original da região é composta por Floresta Ombrófila Densa, porém muito alterada atualmente, dominando assim áreas de floresta secundária na região (BOLFE; BATISTELLA, 2011). O solo da região é predominantemente Latossolo amarelo distrófico (Dados não publicados). A textura das áreas experimentais está apresentada na tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização granulométrica do solo dos sistemas agroflorestais SAF P-Frut, SAF P-Flor e SAF P-Past e sistemas convencionais de produção da palma de óleo, em Tomé Açu, Pará.

Sistemas	Profundidade cm	Areia	Silte	Argila	Classe
		g kg ⁻¹			
SAF P-Frut	0-10	706	105	190	Areia Franca
	10-20	623	133	245	Franco Argila Arenosa
	20-30	546	99	355	Franco Argila Arenosa
	30-50	433	132	435	Argila
SAF P-Flor	0-10	703	147	152	Franco Arenosa
	10-20	606	135	260	Franco Argila Arenosa
	20-30	480	144	377	Franco Argila Arenosa

	30-50	388	113	500	Argila
SAF P-Past	0-10	708	131	170	Franco Arenosa
	10-20	578	162	220	Franco Argila Arenosa
	20-30	564	143	250	Franco Argila Arenosa
	30-50	555	132	250	Franco Argila Arenosa
Palma Cov1	0-10	726	120	155	Franco Arenosa
	10-20	606	165	230	Franco Argila Arenosa
	20-30	508	153	340	Franco Argila Arenosa
	30-50	429	172	400	Argila
Palma Conv2	0-10	821	89	90	Areia Franca
	10-20	752	109	140	Franco Arenosa
	20-30	653	87	260	Franco Argila Arenosa
	30-40	579	112	310	Franco Argila Arenosa

Fonte: Da autora.

Sistemas agroflorestais com palma de óleo

Os sistemas agroflorestais com palma de óleo foram instalados em 2008 no âmbito do Projeto “Dendê em Sistemas Agroflorestais na Agricultura Familiar” em três propriedades. Em cada propriedade foram implantados sistemas agroflorestais (2 ha), com linhas duplas de palma de óleo (espaçamento de 7,5 m entre linhas e 9,0 m entre plantas) intercaladas por faixas de 15 m (SAF P-Flor e SAF P-Past) e 21 m (SAF P-Frut) de largura. As faixas eram compostas por espécies agrícolas e florestais com descrito a seguir.

O SAF P-Flor foi implantado em uma área de floresta secundária de aproximadamente 10 anos, com histórico de plantio de culturas de subsistência. Em 2008 foram plantados *Elaeis guineensis* (palma de óleo) (99 plantas ha⁻¹), *Euterpe oleracea* (açai) (125 plantas ha⁻¹), *Musa sp.* (bananeira) (595 plantas ha⁻¹), *Theobroma cacao* (cacau) (300 plantas ha⁻¹), *Gliricidia sepium* (gliricidia) (187 plantas ha⁻¹), *Calophyllum brasiliense* (guanandi) (30 plantas ha⁻¹), *Tabebuia sp* (ipê) (28 plantas ha⁻¹), *Inga edulis* (ingá) (344 plantas ha⁻¹), *Manihot esculenta* (mandioca) (900 plantas ha⁻¹), *Sclerolobium paniculatum* (taxi branco) (28 plantas ha⁻¹) e mix de adubadeiras (*Calopogonium mucunoides* (calopogônio), *Crotalaria spectabilis* (crotalária), *Desmodium sp* (desmodium), *Cajanus cajan* (feijão-guandu), *Canavalia ensiformis* (feijão de porco) e *Tithonia diversifolia* (margaridão). Em 2016 as espécies que predominavam no sistema eram *Elaeis guineenses* (palma de óleo), *Euterpe oleracea* (açai), *Carapa guineenses* (andiroba), *Oenocarpus mapora* (bacabi), *Theobroma cacao* (cacau), *Bertholletia excelsa* (castanha), *Adenanthera pavonina* (falso pau brasil), *Inga edulis* (ingá), *Tabebuia sp* (ipê),

Mangifera indica (mangueira), *Swietenia macrophylla* (mogno), *Azadirachta indica* (nim) e *Virola surinamensis* (ucuuba).

No SAF P-Past, implantado em uma área de pastagem degradada de 25 anos de uso e 7 de abandono, foram plantados *Elaeis guineenses* (dendê) (99 plantas ha⁻¹), *Oenocarpus spp* (bacaba) (45 plantas ha⁻¹), *Musa sp.* (bananeira) (330 plantas ha⁻¹), *Theobroma cacao* (cacau) (330 plantas ha⁻¹), *Swietenia macrophylla* (mogno) (30 plantas ha⁻¹), *Gliricidia sepium* (gliricidia) (84 plantas ha⁻¹), *Inga edulis* (ingá) (137 plantas ha⁻¹), *Manihot esculenta* (mandioca) (900 plantas ha⁻¹), *Passiflora edulis* (maracujá) (180 plantas ha⁻¹), *Piper nigrum* (pimenta) (380 plantas ha⁻¹), *Calopogonium mucunoides* (calopogônio), *Crotalaria spectabilis* (crotalária), *Desmodium sp* (desmodium), *Cajanus cajan* (feijão-guandu), *Canavalia ensiformis* (feijão de porco) e *Tithonia diversifolia* (margaridão). Em 2016 as espécies predominantes no sistema eram *Elaeis guineenses* (palma de óleo), *Theobroma cacao* (cacau), *Gliricidia sepium* (gliricidia), *Piper nigrum* (pimenta-do-reino), *Spondias mombin* (taperebá), *Bixa orellana* (urucum), *Acacia mangium* (acácia), *Platonia insignis* (bacuri), *Theobroma grandiflorum* (cupuaçu), *Cecropia sp.* (embaúba), *Inga edulis* (ingá), *Mangifera indica* (mangueira) e *Swietenia macrophylla* (mogno).

No SAF P-Frut, instalado em pomar abandonado de aproximadamente 11 anos, foram plantados *Elaeis guineenses* (dendê) (81 plantas ha⁻¹), *Euterpe oleracea* (açai) (104 plantas ha⁻¹), *Musa sp.* (banana) (588 plantas ha⁻¹), *Theobroma cacao* (cacau) (480 plantas ha⁻¹), *Gliricidia sepium* (gliricidia) (170 plantas ha⁻¹), *Inga edulis* (ingá) (325 plantas ha⁻¹), *Tabebuia sp* (ipê) (24 plantas ha⁻¹), *Hymenaea courbaril* (jatobá) (24 plantas ha⁻¹), *Manihot esculenta* (mandioca) (1440 plantas ha⁻¹), *Pentaclethra macroloba* (pracaxi) (204 plantas ha⁻¹), *Virola surinamensis* (ucuúba) (24 plantas ha⁻¹), *Calopogonium mucunoides* (calopogônio), *Crotalaria spectabilis* (crotalária), *Desmodium sp* (desmodium), *Cajanus cajan* (feijão-guandu), *Canavalia ensiformis* (feijão de porco) e *Tithonia diversifolia* (margaridão). Em 2016, as espécies predominantes no sistema eram *Euterpe oleracea* (açai), *Carapa guineenses* (andiroba), *Platonia insignis* (bacabi), *Theobroma cacao* (cacau), *Bertholletia excelsa* (castanha), *Adenanthera pavonina* (falso-pau-brasil), *Inga edulis* (ingá), *Tabebuia sp* (ipê), *Mangifera indica* (manga), *Swietenia macrophylla* (mogno), *Azadirachta indica* (nim) e *Virola surinamensis* (ucuúba).

Sistemas convencionais de palma de óleo

As áreas de produção de palma de óleo convencional apresentavam aproximadamente oito anos de idades (Palma Conv1 e Palma Conv2), com espaçamento de 9 m x 9 m x 9 m em

padrão de triângulo equilátero. O sistema Palma Conv1 foi instalado em uma área de floresta secundária de aproximadamente 13 anos, formada após ciclos de queima e pousio. O sistema Palma Conv2 foi instalado em área de pastagem degradada.

Florestas Sucessionais

Foram avaliadas três áreas de floresta sucessional com diferentes idades (20, 30 e 40 anos). A floresta sucessional de 20 anos (FS-20), adjacente ao sistema agroflorestal SAF P-Flor, e histórico de uso desconhecido; a floresta sucessional de 30 anos (FS-30), adjacente ao sistema agroflorestal SAF P-Past, uso anterior era agricultura tradicional itinerante; e a floresta sucessional de 40 anos (FS-40), próxima ao sistema agroflorestal SAF P-Frut, área anteriormente cultivada com *Piper nigrum* (pimenta do reino).

Preparo e manejo das áreas

O preparo da área dos sistemas agroflorestais SAF P-Flor e SAF P-Frut foi feito por corte e trituração mecanizado, e no sistema agroflorestal SAF P-Past, por gradagem. No sistema convencional da palma de óleo (Palma Conv1) o preparo de área consistiu de derruba e queima de floresta secundária de aproximadamente 13 anos, formada após repetidos ciclos de queima e pousio. Em seguida realizou-se gradagem aradora e niveladora.

Para a instalação dos sistemas foi aplicado o calcário dolomítico em superfície antes do plantio. O plantio foi feito em covas com adubação combinada de fosfato natural, moinho de carvão e cama de frango. Foram plantadas mudas de palma de óleo com 15 meses de idade e aproximadamente 2 metros de altura, consorciadas a outras culturas que também foram introduzidas através de mudas e outras por semente. Nos anos posteriores foram feitas adubações de cobertura com farinha de osso, torta de mamona, sulfato de potássio, fosfato natural, moinho de carvão, composto orgânico e cachos de palma de óleo secos. Além disso, é feito periodicamente a adição de fitomassa oriunda do manejo de poda, principalmente das espécies de vegetação espontânea, da palma de óleo e do cacau. O manejo de adubação do ano de 2016 é descrito na tabela 3.

Tabela 3 - Manejo realizado nas áreas de sistemas agroflorestais com palma de óleo no ano de 2016.

Mês	Sistemas	Espécies	Adubo Orgânico
Junho e Julho	SAF P-Frut SAF P-Flor SAF P-Past	Palma de óleo	SulfatoK 1,8 kg/pl Yoorim 1,5 kg/pl
	SAF P-Frut SAF P-Flor SAF P-Past	Cacau	SulfatoK 0,16 kg/pl ARAD 0,18 kg/pl
	SAF P-Frut SAF P-Flor SAF P-Past	Açaí	SulfatoK 0,40 kg/pl ARAD 0,35 kg/pl
Novembro e Dezembro	SAF P-Frut SAF P-Flor SAF P-Past	Palma de óleo	Torta de palmiste 30 kg/pl
	SAF P-Frut	Açaí	Torta de palmiste 4,5 kg
		Cacau	Torta de palmiste 1,0 kg

Fonte: Da autora.

No sistema convencional Palma Conv1 foi realizado no final de 2006 plantio de mudas em cova (mesmas dimensões dos sistemas orgânicos), em que foi aplicado 800 g de superfosfato triplo (SFT). Em 2007 foi realizada adubação de cobertura na coroa da planta no início e no final do período chuvoso, sendo aplicados: 200 g de ureia, 100 g de cloreto de potássio (KCl), 100 g de sulfato de magnésio (MgSO₄), 13 g de bórax e 8 g com micronutrientes (Zincop 101). Nos demais anos, foi realizado adubação parcelada duas vezes por ano com ureia, superfosfato triplo (SFT), cloreto de potássio (KCL), sulfato de magnésio (MgSO₄), Borax e micronutrientes (Zincop 101). Atualmente a adubação é mecanizada, 3 a 4 vezes ao ano, na coroa da palma (raio de 2,4 metros) sendo utilizado 1 kg da formulação 12-2-20 de NPK, e realizado podas periódicas das plantas de crotalária (espécie competidora). As folhas da palma de óleo também são podadas após cada colheita, e são depositadas sobre o solo entre as linhas duplas.

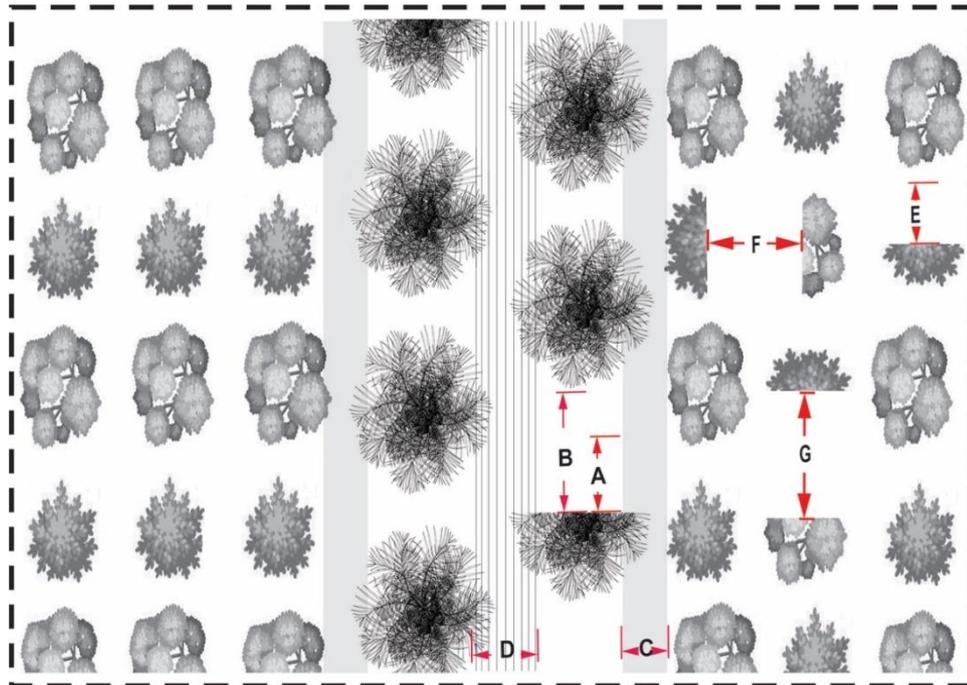
5.2.2 Descrição do experimento

Foram estabelecidas 4 parcelas de 900 m² (30 m x 30 m) em todos os sítios experimentais. Desta forma, nos sistemas agroflorestais as parcelas foram delimitadas incluindo uma linha dupla de palma de óleo no centro da parcela e as linhas de plantio de cacau e demais espécies florestais nas laterais da parcela, e foram definidos 7 locais de medição/amostragem por parcela nos sistemas agroflorestais e 4 pontos amostrais por parcela nos monocultivos.

Os locais de medição/amostragem foram distribuídos buscando representar as áreas de manejo da palma de óleo (base da planta; a 2,0 metros da base da planta; pilha de folhas da

poda e carreador) em todos os sistemas, a cultura do cacau (base do cacau) por ser a segunda espécie de maior expressividade econômica e a área de influência das outras espécies que compõem os sistemas agroflorestais (entre plantas e entre linhas de espécies) (Figura 4) (Tabela 4). Nas áreas de floresta secundária foram definidos 2 locais de amostra em cada parcela.

Figura 4 - Croqui representativo dos locais de amostragem e medições em sistemas agroflorestais com palma de óleo: (A) 0,6 m da base da palma de óleo, (B) 2 m da base da palma de óleo, (C) pilha, (D) carreador, (E) 0,6 m da base do cacau, (F) entre linhas de plantio, (G) entre plantas.



Fonte: Da autora.

Tabela 4 - Distribuição dos pontos amostrais por parcela.

SAFs com palma	Cultivo Convencional da Palma
Base da palma de óleo - 0,6 m	Base da palma de óleo - 0,6 m
Base da palma de óleo - 2,0 m	Base da palma de óleo - 2,0 m
Pilha	Pilha
Carreador	Carreador
Base de cacau - 0,6 m	
Entre linhas	
Entre plantas	

Fonte: Da autora.

Efluxo de CO₂ do solo

O efluxo de CO₂ do solo ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) foi determinado mensalmente, de março de 2016 a março de 2017, com um sistema portátil de medição de fotossíntese (modelo LI-6400, LI-COR, Lincoln, NE, USA), conectado a uma câmara de respiração do solo (LI-6400-09) (Figura 5). A câmara foi acoplada a anéis de respiração do solo (11,5 cm de diâmetro, 6,5 cm de profundidade), inseridos a aproximadamente 2 cm no solo, que permaneceram nos sítios experimentais durante todo o período de coleta. As medições foram feitas em horários entre 7:00 e 13:30 horário local. A medição dos sistemas agroflorestais e suas áreas de floresta de referência ocorreram em dias diferentes, e dos monocultivos foi condensada em um único dia, alternando-se a escolhas dos sistemas que iniciariam as coletas. A medição das oito áreas do estudo de cada mês levava 4 dias.

Figura 5 - Medidor do efluxo de CO₂ do solo e temperatura do solo: Medidor de fotossíntese, modelo LI-6400, termômetro de solo, e câmara de respiração do solo (LI-6400-09).



Fonte: Da autora.

O efluxo anual de carbono do solo foi determinado tomando-se como base as medições mensais. Admitiu-se que cada medição diária do efluxo de CO₂ do solo foi correspondente ao efluxo de C emitido durante os 30 dias do mês. O efluxo anual corresponde a $\sum C$ do solo emitido durante os 12 meses de medição expresso em $\text{Mg C m}^{-2} \text{ ano}^{-1}$.

Umidade gravimétrica do solo

A umidade gravimétrica do solo foi determinada na profundidade de 0-10 cm mensalmente, no período de março de 2016 a março de 2017. Próximo a cada ponto foram coletadas com trado 3 amostras simples para formação de uma amostra composta.

No laboratório essas amostras foram pesadas em balança analítica (0,0001 g), para determinação da massa úmida, posteriormente condicionadas em estufa de 105 °C por 24 h,

para determinação da massa seca. A umidade gravimétrica foi determinada a partir da seguinte equação:

$$\text{Umidade gravimétrica} = (100 \times (\text{massa úmida}) - (\text{massa seca})) / \text{massa seca}$$

Estoque de serapilheira

No período mais chuvoso (maio) e menos chuvoso (outubro) de 2016, amostras de serapilheira (*litter*) foram coletadas em duplicatas em cada ponto amostral das parcelas, com auxílio de uma grade metálica com área interna 0,5 m x 0,5 m. As amostras foram classificadas em 7 frações: (a) galho grosso - diâmetro > 1cm; (b) galho fino – diâmetro < 1cm; (c) folha; (d) folíolo da palma de óleo; (e) ráquis da palma de óleo; (f) material reprodutivo e (g) miscelânea. Em seguida, as amostras foram secas a 65°C durante 72 horas e pesadas em balança digital.

Estoque de raízes finas

No período mais chuvoso (maio) e menos chuvoso (outubro) de 2016, amostras de solos foram coletadas em duplicata com de trado de 5 cm de diâmetro a 10 cm de profundidade (volume do cilindro= 196,34 cm³), próximo as bases de mensuração de respiração do solo. Estas amostras foram transferidas para sacos plásticos e mantidas sob refrigeração a 4°C até o processamento das amostras em laboratório, onde foram lavadas em água corrente sobre peneiras de 2 e 1 mm, respectivamente.

Após a lavagem, as raízes foram separadas em classes de diâmetro (<1 mm e 1,1-2,0 mm), secas em estufa a 65° C por 48 horas, e pesadas em balança analítica de precisão (0,0001 g), para a obtenção da massa seca. Contudo, em função da pouca representatividade das classes, foram somadas as classes <1 mm e 1,1-2,0 mm, constituindo uma única classe para avaliação da densidade de raízes finas (≤ 2,0 mm) expressas em Mg ha⁻¹.

Precipitação

A precipitação diária foi medida próximo (aproximadamente 100 m) das áreas de SAF P-Frut e SAF P-Flor, com auxílio de pluviômetro, monitorados pela Cooperativa Agrícola Mista de Tomé-Açu e Natura. Os dados da estação meteorológica da Embrapa Amazônia Oriental foram utilizados como referência para o sistema agroflorestal SAF P-Past, devido a sua proximidade com a área deste sistema.

5.2.3 Análise estatística

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado. Os dados foram submetidos ao teste Shapiro-Wilk ($P > 0,05$) para testar a normalidade dos dados, e quando não apresentaram distribuição normal foram transformados (Log 10 e exponencial). As variáveis analisadas (efluxo de CO_2 do solo, umidade gravimétrica do solo, estoque de raízes e estoque de serapilheira) foram submetidas à análise de variância (ANOVA, $p < 0,05$) de dois fatores (sistemas e períodos) e teste Tukey ($p < 0,05$). A correlação entre as variáveis foi avaliada com o teste de correlação de Pearson. Todos os procedimentos estatísticos foram realizados no programa SigmaStat 11.0 (Systat Software, San Jose, CA, 2008).

A análise estatística foi realizada utilizando as médias ponderadas de cada sistema, considerando o percentual de representatividade de cada local de amostragem.

5.3 Resultados

5.3.1 Efluxo de CO_2 do solo, umidade do solo e efluxo anual de C do solo

O efluxo de CO_2 do solo na UD1 foi afetado significativamente pelo efeito dos sistemas ($P = 0,001$), pelos meses de coleta ($P = < 0,001$) e pela interação destes fatores ($P = < 0,001$). Foi significativamente maior na floresta sucessional de 40 anos (FS-40 = $5,89 \pm 0,10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) do que nos sistemas com palma de óleo (SAF P-Frut = $3,75 \pm 0,05 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; Palma Conv1 = $2,22 \pm 0,04 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), exceto em outubro e novembro, quando os sistemas foram iguais. Houve diferença significativa no efluxo de CO_2 do solo entre os sistemas com palma de óleo, em abril, junho e dezembro de 2016 e janeiro e março de 2017, meses de maior precipitação, quando o efluxo foi significativamente maior no SAF P-Frut (Figura 6-D).

O efluxo de CO_2 do solo na UD2 diferiu significativamente entre os sistemas, os meses de coleta, e pela interação destes fatores (Tabela 5). A floresta sucessional de 20 anos apresentou a maior média de efluxo de CO_2 do solo (FS-20 = $5,46 \pm 0,04 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). O sistema SAF P-Flor apresentou médias intermediárias (SAF P-Flor = $3,43 \pm 0,04 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e a menor média ocorreu no sistema Palma Conv1 (Palma Conv1 = $2,22 \pm 0,07 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 6-E).

O efluxo de CO_2 do solo na UD3 diferiu significativamente entre os sistemas, os meses de coleta, e pela interação destes fatores (Tabela 5). O efluxo de CO_2 do solo foi significativamente maior na floresta sucessional de 30 anos (FS-30 = $9,93 \pm 0,18 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 4-F). O sistema Palma Conv2 apresentou as menores médias de efluxo (Palma

Conv2 = $2,44 \pm 0,02 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); o SAF P-Past apresentou médias intermediárias ($4,69 \pm 0,03 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) entre FS-30 e Palma Conv2 (Figura 4-F).

De modo geral o efluxo de CO_2 do solo foi menor de julho a novembro de 2016, período de menor precipitação, e maior de março a junho de 2016, e de dezembro de 2016 a março de 2017, período de maior precipitação da região.. O efluxo de CO_2 do solo durante os períodos de menor e maior precipitação nas áreas experimentais seguiu o mesmo padrão, menor durante o período menos chuvoso e maior no período mais chuvoso (Tabela 6)

A umidade gravimétrica do solo foi afetada significativamente pelo efeito de sistemas ($P= 0,001$), meses de coleta ($P= <0,001$) e pela interação destes fatores ($P= <0,001$), em todas as UD's. De modo geral, em todos os sistemas (Palma Conv1; SAF P-Frut; FS-40; SAF P-Flor; FS-20; Palma Conv2; SAF P-Past; FS-30), a umidade do solo acompanhou a sazonalidade de chuva da região. As maiores médias de umidade coincidiram com o período de maior precipitação, e as menores médias ocorreram durante o período de menor precipitação (Tabela 6).

Tabela 5. Valores de teste dos níveis descritivos (valor P) das fontes de variação analisadas.

Variavel	UDI					
	Sistema		Mês		Sistema x Mês	
	F	P	F	P	F	P
Efluxo anual	24,332	<0,001*				
CO2	23,216	0,001*	18,283	<0,001*	6,658	<0,001*
Ug	79,477	<0,001*	688,378	<0,001*	11,68	<0,001*
Raízes finas	6,484	0,032*	114,836	= 0,002 *	0,282	= 0,764
Grossa \geq 1 cm	12,14	0,01*	1,66	0,29	7,12	0,03*
Fina < 1 cm	24,61	0,001*	0,95	0,4	2,53	0,16
Folha	142,2	<0,001*	4,79	0,116	8,1	0,02*
Folíolo da palma	14,41	0,03*	9,89	0,05*	12,81	0,04*
Ráquis da palma	38,23	0,01*	1,84	0,27	1,54	0,3
Material reprodutivo	6,6	0,03*	8,46	0,06	4,48	0,07
Miscelânea	17,69	0,003*	0,54	0,52	0,09	0,47
Total sem frações de palma	20,79	0,002*	0,72	0,46	1,51	0,3
Total	2,46	0,17	0,28	0,63	0,75	0,51
Variavel	UD2					
	Sistema		Mês		Sistema x Mês	
	F	P	F	P	F	P
Efluxo anual	19,884	<0,001*				
CO2	54,699	<0,001*	24,252	<0,001*	3,744	<0,001*
Ug	9,616	0,013 *	534,689	<0,001*	5,42	<0,001*
Raízes finas	2,271	0,184	6,810	0,080	3,678	0,091
Grossa \geq 1 cm	4,84	0,05*	5,71	0,1	0,21	0,81
Fina < 1 cm	78,05	<0,001*	1,85	0,27	0,53	0,61
Folha	135,9	<0,001*	99,32	0,002*	1,94	0,02*

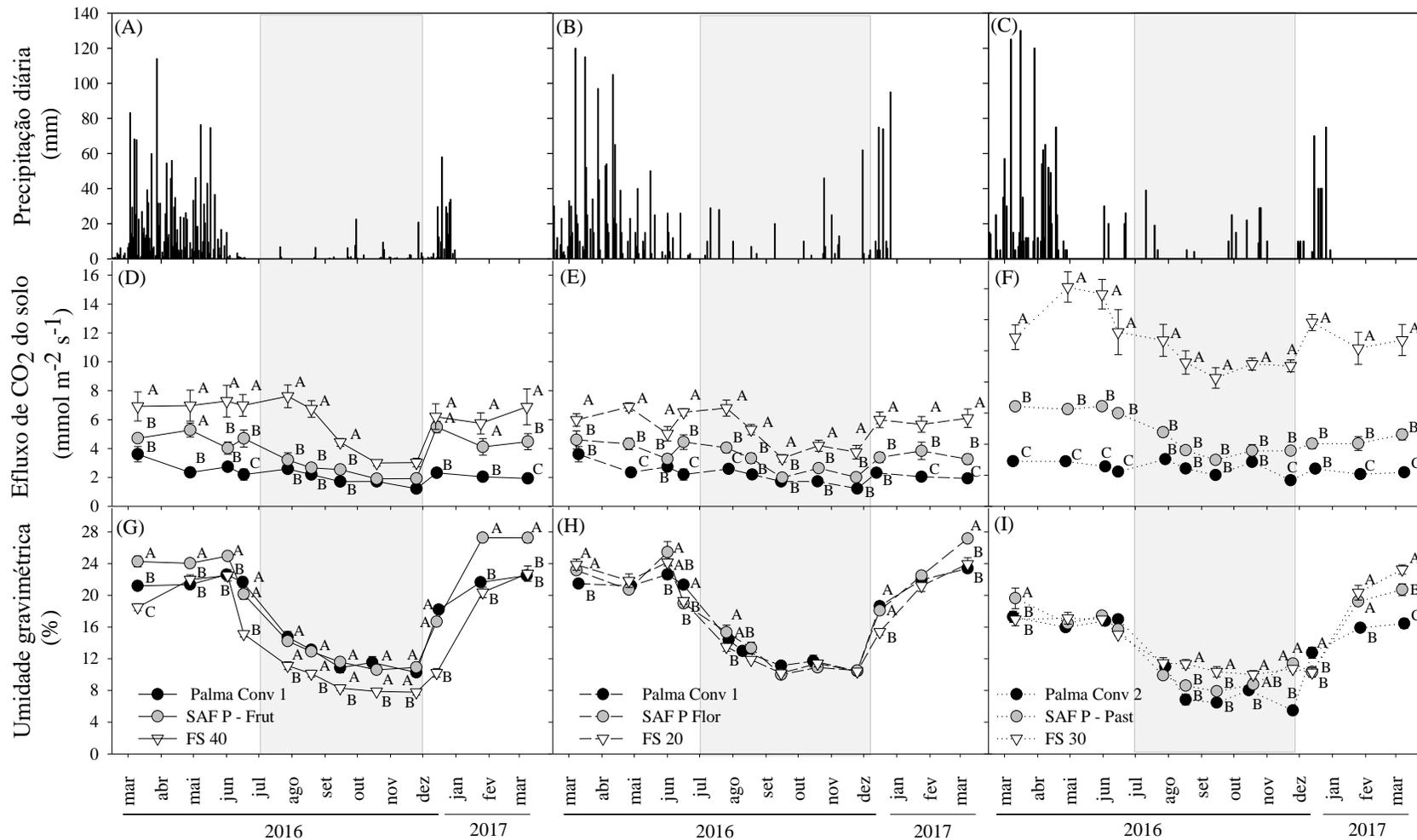
Folíolo da palma	9,65	0,05*	24,04	0,02*	5,04	0,11
Ráquis da palma	7,12	0,08	2,55	0,21	30,87	0,14
Material reprodutivo	2,81	0,14	0,25	0,65	1,02	0,05*
Miscelânea	8,29	0,02*	2,15	0,24	8,6	0,02*
Total sem frações de palma	46,82	<0,001*	0,55	0,51	1,4	0,32
Total	0,71	0,59	0,01	0,94	0,01	0,58
UD3						
Variável	Sistema		Mês		Sistema x Mês	
	F	P	F	P	F	P
Efluxo anual	54,028	<0,001*				
CO2	230,955	<0,001*	18,007	<0,001*	3,585	<0,001*
Ug	9,154	0,015*	240,33	<0,001*	13,312	<0,001*
Raízes finas	8,678	0,017*	34,110	0,010*	0,441	0,663
Grossa ≥ 1 cm	40,74	<0,001*	3,364	0,164	2,168	0,196
Fina < 1 cm	219,4	<0,001*	0,239	0,657	1,208	0,373
Folha	17,42	0,003*	4,373	0,128	1,933	0,255
Folíolo da palma	13,91	0,034*	17,34	0,025*	12,67	0,038*
Ráquis da palma	16,29	0,027*	1,339	0,331	2,879	0,188
Material reprodutivo	0,94	0,442	9,899	0,059	0,534	0,612
Miscelânea	7,96	0,021*	9,912	0,051*	19,29	0,002*
Total sem frações de palma	86,45	<0,001*	19,72	0,02*	10,54	0,01*
Total	2,09	0,205	1,768	0,276	4,182	0,073

Tabela 6 - Médias do efluxo de CO₂ do solo e umidade gravimétrica das áreas de estudo durante o período menos chuvoso e chuvoso.

Área	Sistemas	Efluxo de CO ₂ do solo ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$)		Umidade gravimétrica (%)	
		Menos chuvoso	Chuvoso	Menos chuvoso	Chuvoso
UD 1	FS - 40	4,96 ± 0,95	6,71 ± 0,20	9,04 ± 0,95	18,79 ± 1,75
	SAF P-Frut	2,45 ± 0,24	4,69 ± 0,21	12,05 ± 0,24	23,52 ± 1,46
	Palma Conv1	1,89 ± 0,23	2,45 ± 0,22	12,11 ± 0,23	21,32 ± 0,56
UD 2	FS - 20	4,68 ± 0,63	6,02 ± 0,22	11,48 ± 0,60	21,39 ± 1,21
	SAF P-Flor	2,80 ± 0,40	3,87 ± 0,22	12,02 ± 1,01	22,30 ± 1,25
UD 3	FS - 30	9,27 ± 0,39	10,40 ± 0,40	10,79 ± 0,28	17,15 ± 1,54
	SAF P-Past	3,70 ± 0,29	5,40 ± 0,42	9,34 ± 0,59	17,17 ± 1,39
	Palma Conv2	2,40 ± 0,25	2,46 ± 0,13	7,56 ± 0,95	16,02 ± 0,58

Fonte: Da autora.

Figura 6 - Precipitação diária (A-B-C). Efluxo de CO₂ do solo no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Frut), na floresta sucessional de 40 anos (FS-40) (D), no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Flor), na floresta sucessional de 20 anos (FS-20) (E), no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv2), no sistema agroflorestal (SAF P-Past), e na floresta sucessional de 30 anos (FS-30) (F). Umidade gravimétrica do solo no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Frut), na floresta sucessional de 40 anos (FS-40) (G), no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Flor), na floresta sucessional de 20 anos (FS-20) (H), no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv2), no sistema agroflorestal (SAF P-Past), e na floresta sucessional de 30 anos (FS-30) (I) (média ± erro padrão). Letras maiúsculas comparam as médias dos sistemas. Letras minúsculas comparam as médias entre os meses. Médias com letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste Tukey (P < 0,05).



Fonte: Da autora.

De modo geral o efluxo de CO₂ do solo não apresentou diferença significativa entre os sistemas convencionais de produção da palma de óleo (Palma Conv1 = $2,22 \pm 0,23 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; Palma Conv2 = $2,44 \pm 0,18 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), exceto em outubro (Figura 7-A).

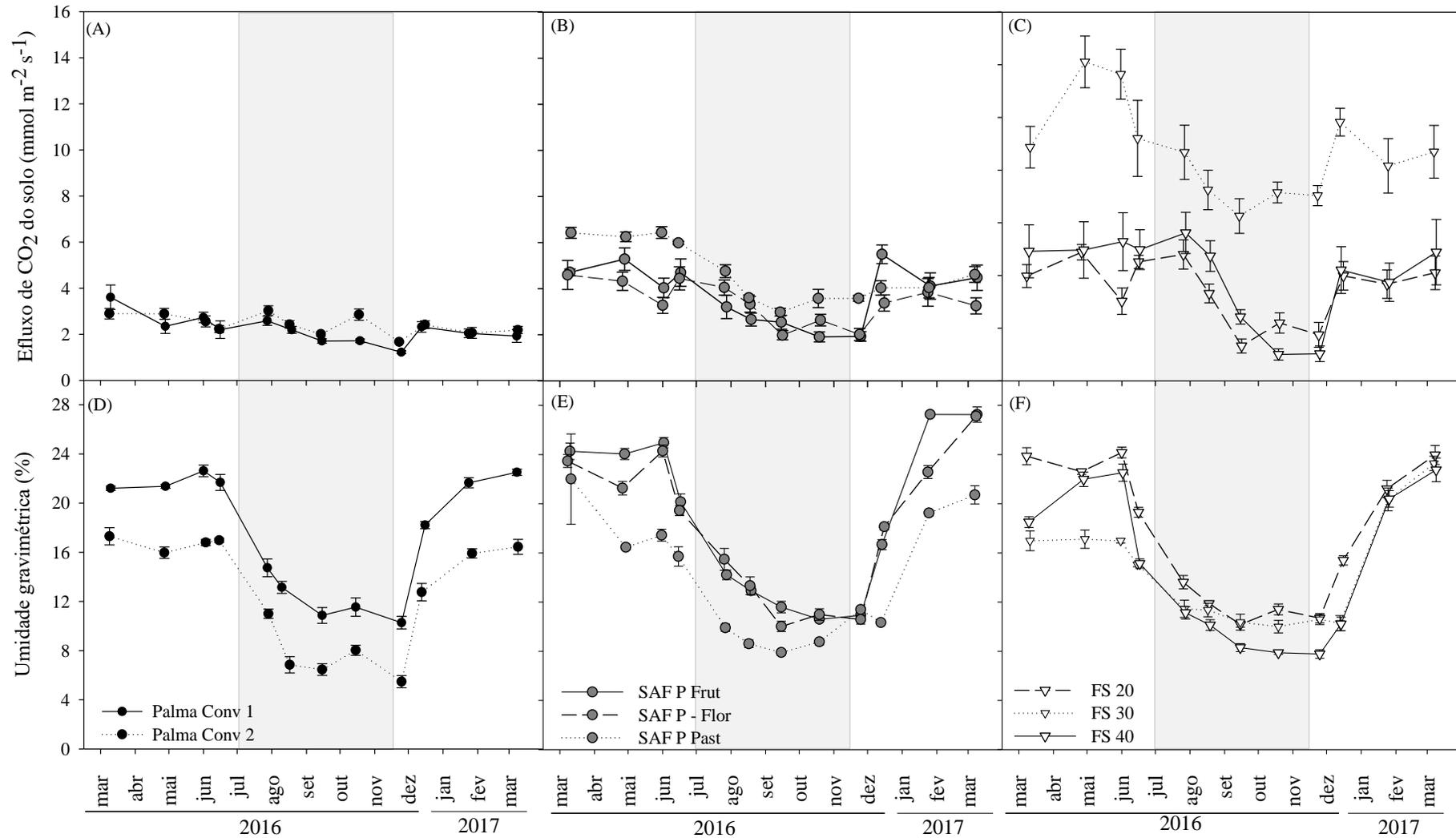
O efluxo de CO₂ do solo nos sistemas agroflorestais com palma de óleo foi afetado significativamente pelo efeito dos sistemas ($P= 0,001$), pelos meses de coleta ($P= <0,001$) e pela interação destes fatores ($P= <0,001$). De modo geral o efluxo de CO₂ do solo foi significativamente maior no SAF P-Past (SAF P-Past = $4,69 \pm 0,25 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), do que no SAF P Flor (SAF P-Flor = $3,43 \pm 0,38 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); não houve diferença significativa entre os sistemas agroflorestais com palma de óleo SAF P-Flor (SAF P-Flor= $3,43 \pm 0,38 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) e SAF P-Frut (SAF P-Frut= $3,75 \pm 0,39 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$). Em agosto e dezembro de 2016, e janeiro de 2017 os três sistemas não apresentaram diferença significativa (Figura 7-B).

O efluxo de CO₂ do solo foi afetado significativamente por sítios de floresta secundária (FS-40; FS-20, e FS-30), datas de coleta ($P<0,001$), e interação destes fatores ($P= <0,001$). Foi significativamente maior na floresta sucessional de 30 anos (FS-30 = $9,93 \pm 1,10 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), do que nas outras florestas sucessionais. Não houve diferença significativa no efluxo de CO₂ do solo entre as florestas sucessionais de 20 e 40 anos (FS-20= $5,46 \pm 0,44 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; FS-40= $5,98 \pm 0,74 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (Figura 7-C).

A umidade gravimétrica do solo foi afetada por áreas de plantio convencional, significativamente maior no sistema Palma Conv1 ($17,48 \pm 0,46$) do que no sistema Palma Conv2 ($12,49 \pm 0,47$) (Figura 7-D). De modo geral, a umidade gravimétrica foi significativamente menor no sistema SAF P-Past ($14,04 \pm 0,62$), do que nos dois sistemas agroflorestais SAF P-Frut ($18,74 \pm 0,41$) e SAF P-Flor ($18,05 \pm 0,5$), que não apresentaram diferença significativa entre si (Figura 7-E). A umidade gravimétrica foi significativamente maior na FS-20 anos ($17,35 \pm 0,45$), do que na FS-30 ($14,48 \pm 0,52$) e FS-40 ($14,73 \pm 0,50$) (Figura 7-F).

Durante todo o período de coleta, o efluxo de CO₂ do solo variou sazonalmente nos sistemas. O efluxo de CO₂ do solo foi maior no período de maior precipitação, e menor no período de menor precipitação.

Figura 7 - Efluxo de CO₂ do solo nos sistemas convencionais de palma de óleo (Palma Conv1 e Palma Conv2) (A), nos sistemas agroflorestais (SAF P-Frut, SAF P-Flor, e SAF P-Past) (B), e nas florestas sucessionais de 40, 20 e 30 anos (FS-40, FS-20, e FS30) (C). Umidade gravimétrica do solo nos sistemas convencionais de palma de óleo (Palma Conv1 e Palma Conv2) (D), nos sistemas agroflorestais (SAF P-Frut, SAF P-Flor, e SAF P-Past) (E), e nas florestas sucessionais de 40, 20 e 30 anos (FS-40, FS-20, e FS30) (F) (média ± erro padrão). Letras maiúsculas comparam as médias dos sistemas. Letras minúsculas comparam as médias entre os meses. Médias com letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste Tukey (P < 0,05).

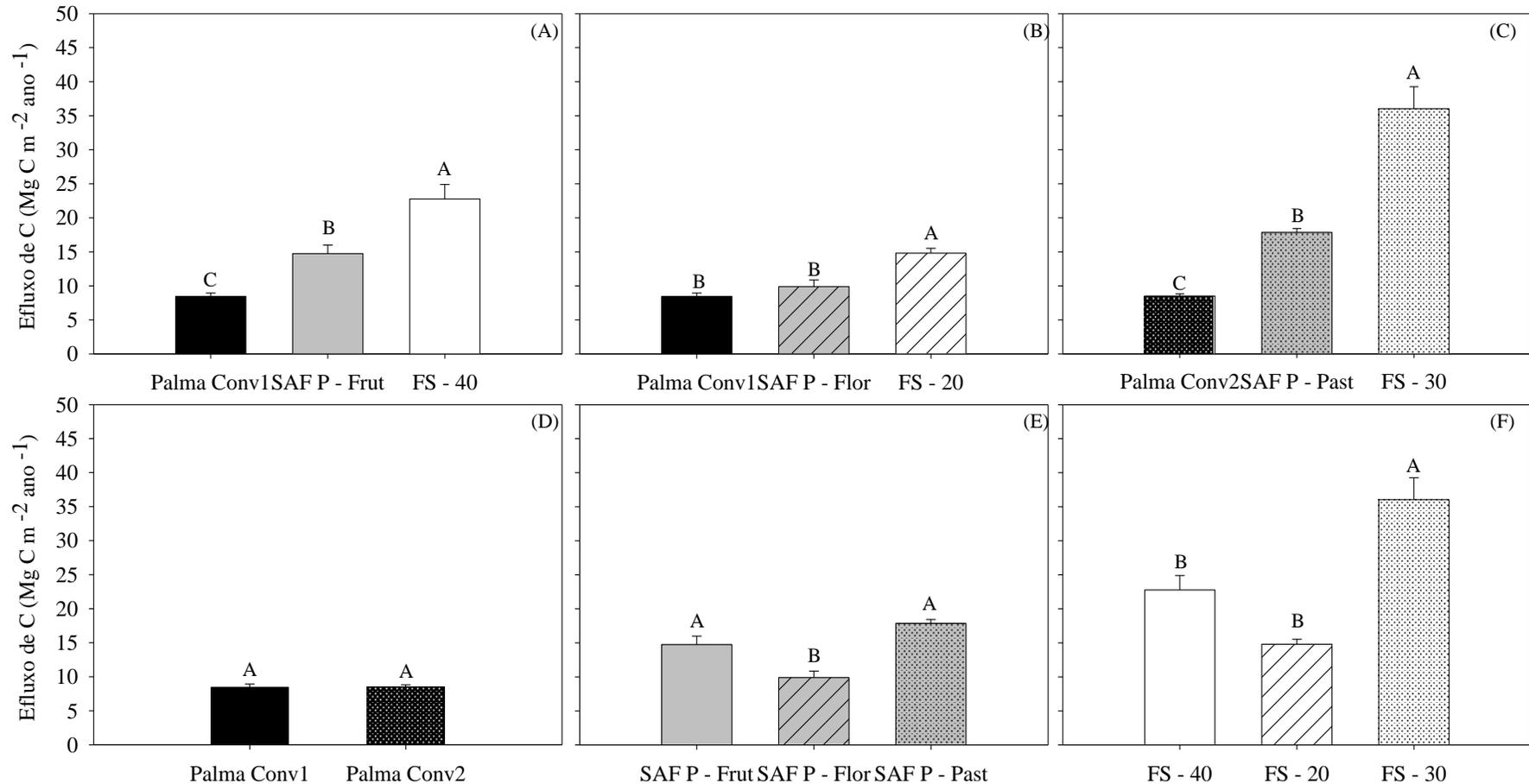


Fonte: Da autora.

Na UD1, o efluxo anual de carbono do solo variou entre sistemas ($p = < 0,001$), demonstrando o seguinte padrão: FS 40 > SAF P Frut > Palma Conv 1 (Figura 8-A). Na UD2, o efluxo anual de C do solo foi maior na FS 20 e menor no SAF P Flor e na Palma Conv 2. ($p = < 0,001$) (Figura 8-B). Na UD3 indicou o seguinte padrão quanto ao efluxo anual de C do solo: FS 30 > SAF P Past > Palma Conv 2 ($p = < 0,001$) (Figura 8-C).

O efluxo anual de C do solo não variou entre os dois cultivos convencionais de palma ($p = 0,944$). Entre SAFs o efluxo anual de C do solo foi significativamente maior ($p = < 0,001$) no SAF P-Frut e SAF P-Past e menor no SAF P-Flor. Entre florestas sucessionais, o efluxo anual de C do solo foi significativamente maior ($p = < 0,001$) na FS 30 do que em FS 40 e FS 20.

Figura 8 - Efluxo de C anual no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Frut), e na floresta sucessional de 40 anos (FS-40) (A). Efluxo de C anual no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Flor), e na floresta sucessional de 20 anos (FS-20) (B). Efluxo de C anual no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv2), no sistema agroflorestal (SAF P-Past), e na floresta sucessional de 30 anos (FS-30) (C). Efluxo de C anual nos sistemas convencionais de palma de óleo (Palma Conv1 e Palma Conv2) (D), nos sistemas agroflorestais (SAF P-Frut, SAF P-Flor, e SAF P-Past) (E), e nas florestas sucessionais de 40, 20 e 30 anos (FS-40, FS-20, e FS30) (F) média \pm erro padrão). Letras maiúsculas comparam as médias dos sistemas. Letras minúsculas comparam as médias entre os meses. Médias com letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste Tukey ($P < 0,05$).



Fonte: Da autora.

5.3.2 Estoque de carbono no solo, serapilheira e raízes

Sistemas de produção de palma de óleo diferente

Na UD1, houve efeito significativo de sistemas em todas as frações de serapilheira; efeito de mês apenas na fração folíolo; e interação sistema e mês nas frações: galho grosso, folha e folíolo (Tabela 7).

O estoque de serapilheira total não variou significativamente entre sistemas (Tabela 7). No entanto quando avaliamos o estoque de serapilheira total sem as frações folíolo e ráquis da palma, o padrão encontrado em ordem crescente foi FS-40 > SAF P-Frut > Palma Conv1. As frações da FS-40 apresentaram maior estoque de serapilheira. Na Palma Conv1, no mês de outubro, na fração raquis foi superior ao SAF P-Frut; e material reprodutivo em que SAF P-Frut foi superior à Palma Conv1 e FS-40.

O estoque de serapilheira na fração folíolo na Palma Conv1 foi maior no mês de outubro em relação a maio, inverso ao encontrado no SAF P-Frut. O estoque de serapilheira na fração galho grosso no SAF P-Frut foi maior em outubro em relação a maio, enquanto que a serapilheira foliar na FS-40 foi maior em maio do que em outubro.

Na UD2, houve efeito de sistemas para a maioria das frações, exceto nas frações ráquis, material reprodutivo e no total; efeito de mês apenas na fração folha; e interação sistema e mês nas frações folha, material reprodutivo e miscelânea. (Tabela 7)

Os estoques de serapilheira total e total sem frações folíolo e ráquis apresentaram o mesmo padrão da UD1 (Tabela 7). De modo geral as frações a Palma Conv1 foi inferior a FS-20 e SAF P-Flor, exceto nas frações: folíolo e material reprodutivo, em que a Palma Conv1 foi superior ao SAF P-Flor e FS-20.

O estoque de serapilheira no sistema Palma Conv1 foi maior em outubro do que em maio na serapilheira foliar e no material reprodutivo. No sistema SAF P-Flor o estoque foi maior em outubro na fração folíolo da palma. Na FS-20 o estoque foi maior no mês de outubro na serapilheira foliar

De modo geral, na UD3, houve efeito significativo de sistemas em todas as frações de serapilheira exceto na fração de material reprodutivo e no total; e interação sistema e mês na fração folíolo e miscelânea (Tabela 7).

O estoque de serapilheira de material reprodutivo e serapilheira total não foi diferente entre sistemas (Tabela 7). No entanto, a serapilheira total sem as frações folíolo e ráquis, apresentou na maioria das frações, o padrão em ordem decrescente foi FS-30 >

SAF P-Past > Palma Conv2. Nas frações da palma, o sistema Palma Conv2 foi superior ao SAF P-Past.

De modo geral o estoque de serapilheira foi maior em outubro em relação a maio nas frações galho grosso, folha e miscelânea na FS-30; e na fração folíolo na Palma Conv2.

Tabela 7 - Estoque de serapilheira por frações de três unidades demonstrativas (UD1-UD2-UD3) com sistemas agroflorestais com palma de óleo, floresta secundária e sistema convencional de palma de óleo.

UD1	Palma Conv1			SAF P - Fruit				FS - 40				
Fração serapilheira (g m ⁻²)	Maio		Outubro	Maio		Outubro		Maio		Outubro		
Grossa ≥ 1 cm	0,7 ± 0,2	Ba	1,0 ± 0,6	Ba	7,0 ± 1,9	ABa	7,0 ± 3,4	Ba	12,7 ± 1,9	Ab	20,8 ± 4,9	Aa
Fina < 1 cm	1,3 ± 0,5	Ba	0,8 ± 0,2	Ba	2,4 ± 0,6	Ba	4,7 ± 1,7	Ba	20,8 ± 5,2	Aa	12,8 ± 1,4	Aa
Folha	1,7 ± 0,2	Ba	1,1 ± 0,3	Ba	12,2 ± 0,5	Aa	15,4 ± 1,9	ABa	14,9 ± 1,7	Aa	21,9 ± 1,5	Ab
Material reprodutivo	1,1 ± 0,4	Ba	1,8 ± 0,4	Ba	5,4 ± 1,9	Aa	11,0 ± 3,6	Aa	0,8 ± 0,4	Ba	0,8 ± 0,5	Ba
Miscelânea	8,6 ± 0,5	Ba	4,4 ± 0,7	Ba	3,8 ± 0,7	Ba	4,4 ± 0,9	Ba	13,1 ± 4,0	Aa	13,3 ± 1,8	Aa
Folíolo da palma	3,4 ± 1,3	Ab	15,3 ± 3,5	Aa	2,5 ± 0,3	Aa	0,8 ± 0,1	Bb				
Ráquis da palma	58,6 ± 9,3	Aa	44,7 ± 7,9	Aa	12,1 ± 2,8	Ba	13,4 ± 3,0	Ba				
Total sem frações de palma	13,4 ± 0,4	Ca	9,1 ± 1,6	Ca	30,8 ± 4,0	Ba	42,4 ± 10,5	Ba	62,2 ± 9,9	Aa	69,6 ± 6,8	Aa
Total serapilheira	75,4 ± 10,8	Aa	69,1 ± 8,3	Aa	45,5 ± 4,0	Aa	56,7 ± 13,3	Aa	62,2 ± 9,9	Aa	69,6 ± 6,8	Aa
UD2	Palma Conv1			SAF P - Flor				FS - 20				
Fração serapilheira (g m ⁻²)	Maio		Outubro	Maio		Outubro		Maio		Outubro		
Grossa ≥ 1 cm	0,7 ± 0,2	Ba	1,0 ± 0,6	Ba	12,8 ± 3,8	Aa	12,9 ± 2,7	Aa	16,3 ± 6,2	Aa	12,5 ± 4,1	Aa
Fina < 1 cm	1,3 ± 0,5	Ba	0,8 ± 0,2	Ba	5,2 ± 0,8	Ba	3,7 ± 0,5	Ba	13,0 ± 1,5	Aa	10,9 ± 1,7	Aa
Folha	1,7 ± 0,2	Ca	0,8 ± 0,2	Ba	14,4 ± 1,7	Ba	15,2 ± 2,7	Aa	17,7 ± 2,3	Ab	25,1 ± 1,1	Aa
Material reprodutivo	1,13 ± 0,36	Ab	1,8 ± 0,4	Aa	1,7 ± 0,6	Aa	1,14 ± 0,40	Ab	0,7 ± 0,5	Ba	0,2 ± 0,1	Bb
Miscelânea	8,6 ± 0,5	Aa	4,4 ± 0,7	Ba	5,5 ± 1,1	Aa	5,7 ± 1,2	Ba	8,1 ± 0,6	Aa	17,1 ± 3,7	Aa
Folíolo da palma	3,4 ± 1,3	Ab	15,3 ± 3,5	Aa	1,0 ± 0,3	Bb	4,0 ± 0,6	Ba				
Ráquis da palma	58,6 ± 9,3	Aa	39,1 ± 11,6	Aa	29,1 ± 2,9	Aa	22,6 ± 2,0	Aa				
Total sem frações de palma	13,4 ± 0,4	Ca	9,1 ± 1,6	Ca	39,6 ± 4,4	Ba	38,6 ± 5,0	Ba	55,9 ± 6,2	Aa	65,8 ± 5,3	Aa
Total	75,4 ± 10,8	Aa	69,1 ± 8,3	Aa	69,7 ± 4,3	Aa	65,2 ± 4,9	Aa	55,9 ± 6,2	Aa	65,8 ± 5,3	Aa
UD3	Palma Conv2			SAF P - Past				FS - 30				
Fração serapilheira (g m ⁻²)	Maio		Outubro	Maio		Outubro		Maio		Outubro		
Grossa ≥ 1 cm	0,3 ± 0,1	Ba	0,2 ± 0,2	Ba	13,9 ± 1,9	Aa	13,8 ± 2,1	Aa	11,1 ± 2,2	Ab	21,4 ± 4,7	Aa
Fina < 1 cm	0,5 ± 0,1	Ca	0,5 ± 0,1	Ca	3,6 ± 0,5	Ba	5,7 ± 1,2	Ba	11,5 ± 0,6	Aa	12,1 ± 1,8	Aa
Folha	1,7 ± 1,2	Ca	1,0 ± 0,5	Ca	11,7 ± 0,5	Ba	12,9 ± 1,7	Ba	22,9 ± 5,0	Ab	28,5 ± 5,4	Aa
Material reprodutivo	0,8 ± 0,2	Aa	1,2 ± 0,3	Aa	1,5 ± 0,3	Aa	2,1 ± 0,4	Aa	0,3 ± 0,2	Aa	1,9 ± 1,2	Aa
Miscelânea	4,1 ± 0,9	Aa	4,4 ± 0,4	Ba	3,8 ± 0,7	Aa	4,7 ± 0,6	Ba	4,6 ± 0,7	Ab	14,0 ± 2,5	Aa
Folíolo da palma	0,5 ± 0,4	Ab	10,4 ± 2,3	Aa	1,3 ± 0,2	Aa	1,0 ± 0,5	Ba				
Ráquis da palma	55,9 ± 7,4	Aa	36,2 ± 12,7	Aa	15,2 ± 4,0	Ba	13,4 ± 2,2	Ba				
Total sem frações de palma	7,4 ± 2,0	Ca	7,4 ± 0,5	Ca	34,5 ± 3,0	Ba	39,1 ± 3,0	Ba	50,4 ± 6,9	Ab	78,0 ± 2,5	Aa
Total	63,9 ± 5,6	Aa	53,9 ± 12,3	Aa	51,1 ± 4,2	Aa	53,5 ± 4,7	Aa	50,4 ± 6,9	Aa	78,0 ± 2,5	Aa

Sistemas de produção de palma de óleo semelhantes

Nos sistemas convencionais de palma de óleo, houve efeito de sistemas apenas no total de serapilheira; efeito de mês apenas nas frações folíolo e ráquis; e interação sistema e mês na fração miscelânea (Tabela 8).

De modo geral as frações de serapilheira foram iguais nos sistemas, exceto para serapilheira total, que foi maior no sistema Palma Conv1 do que em Palma Conv2 (Tabela 8). O folíolo foi maior no mês de maio do que em outubro, nos dois sistemas.

Nos sistemas agroflorestais com palma de óleo houve efeito de sistemas nas frações galho grosso, folha e ráquis e interação sistema e mês nas frações galho fino, folíolo, material reprodutivo e miscelânea (Tabela 8). Não houve efeito significativo de sistema, mês e interação sistema e mês sobre serapilheira total.

De modo geral, as frações entre os sistemas agroflorestais foram mais variáveis do que entre as frações nos sistemas convencionais e áreas de floresta secundária. O SAF P-Past e SAF P-Frut foram significativamente maior que o SAF P-Flor nas frações de serapilheira, grossa, fina e foliar (Tabela 8). No SAF P-Flor o estoque foi maior na fração folíolo e miscelânea, do que no SAF P – Frut e SAF P – Past, respectivamente. No material reprodutivo em outubro em SAF P-Frut foi maior do que em maio. Nas frações ráquis e miscelânea em maio o SAF P-Flor foi superior ao SAF P-Past e SAF P-Frut que foram iguais, o mesmo padrão foi observado na fração folíolo em outubro. Nas frações galho grosso e folha SAF P-Past e SAF P-Frut foram iguais e superiores ao SAF P-Flor. Na fração folíolo no SAF P-Flor outubro apresentou maior estoque em relação maio, enquanto que no SAF P-Frut dessa mesma fração o padrão foi inverso. Na fração material reprodutivo no SAF P-Frut outubro foi maior que maio.

De modo geral, entre as florestas sucessionais o estoque de serapilheira foi semelhante. Houve efeito significativo apenas de mês, na serapilheira foliar, significativamente maior em outubro em FS – 40 e FS – 20(Tabela 8)

Tabela 8 - Estoque de serapilheira por frações em diferentes sistemas agroflorestais com palma de óleo, florestas secundárias e sistemas convencionais de palma de óleo.

Sistema	Palma Conv1			Palma Conv2				
Fração serapilheira (g m ⁻²)	Maio		Outubro		Maio		Outubro	
Grossa ≥ 1 cm	0,7 ± 0,2	Aa	1,0 ± 0,6	Aa	0,3 ± 0,1	Aa	0,2 ± 0,2	Aa
Fina < 1 cm	1,3 ± 0,5	Aa	0,8 ± 0,2	Aa	0,5 ± 0,1	Aa	0,5 ± 0,1	Aa
Folha	1,7 ± 0,2	Ab	1,1 ± 0,3	Aa	1,7 ± 1,2	Ab	1,0 ± 0,5	Aa
Folíolo da palma	3,4 ± 1,3	Aa	15,3 ± 3,5	Ab	0,5 ± 0,4	Aa	10,4 ± 2,3	Ab
Ráquis da palma	58,6 ± 9,3	Aa	44,7 ± 7,9	Aa	55,9 ± 7,4	Aa	36,2 ± 12,7	Aa
Material reprodutivo	1,1 ± 0,4	Aa	1,8 ± 0,4	Aa	0,8 ± 0,2	Aa	1,2 ± 0,3	Aa
Miscelânea	8,6 ± 0,5	Aa	4,4 ± 0,7	Ab	4,1 ± 0,9	Ba	4,4 ± 0,4	Aa
Total	75,4 ± 10,8	Aa	69,1 ± 8,3	Aa	63,9 ± 5,6	Ba	53,9 ± 12,3	Ba

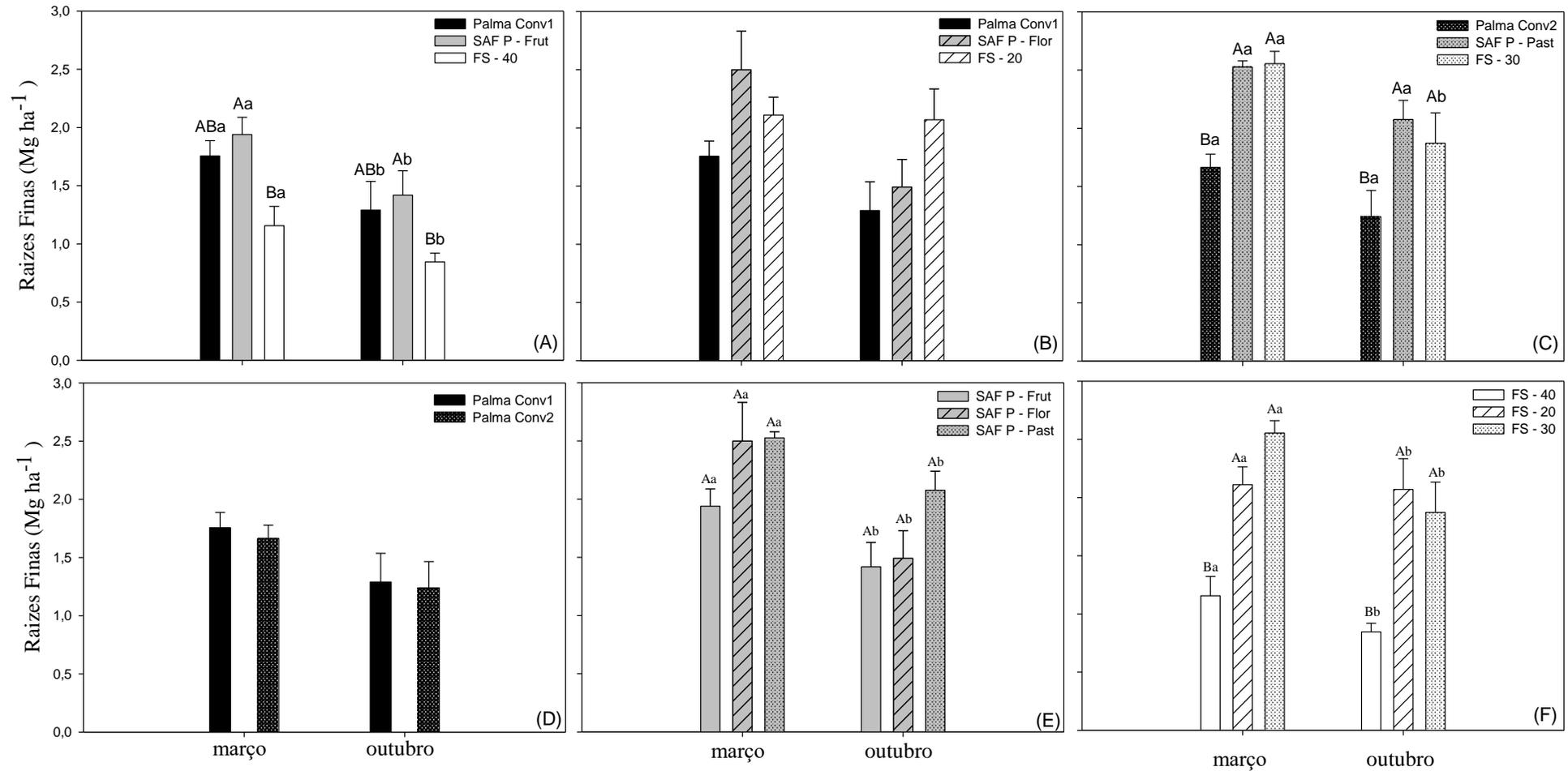
Sistema	SAF P - Fruit			SAF P - Flor			SAF P - Past					
Fração serapilheira (g m ⁻²)	Maio		Outubro		Maio		Outubro		Maio		Outubro	
Grossa ≥ 1 cm	7,0 ± 1,9	Aa	7,0 ± 3,4	Aa	0,7 ± 0,2	Ba	1,0 ± 0,6	Ba	13,9 ± 1,9	Aa	13,8 ± 2,1	Aa
Fina < 1 cm	2,4 ± 0,6	Ba	4,7 ± 1,7	Aa	1,3 ± 0,5	Ba	0,8 ± 0,2	Aa	3,6 ± 0,5	Aa	5,7 ± 1,2	Aa
Folha	12,2 ± 0,5	Aa	15,4 ± 1,9	Aa	1,7 ± 0,2	Ba	0,8 ± 0,2	Ba	11,7 ± 0,5	Aa	12,9 ± 1,7	Aa
Folíolo da palma	2,5 ± 0,3	Aa	0,8 ± 0,1	Bb	3,4 ± 1,3	Ab	15,3 ± 3,5	Aa	1,3 ± 0,2	Aa	1,0 ± 0,5	Ba
Ráquis da palma	12,1 ± 2,8	Ba	13,4 ± 3,0	Aa	58,6 ± 9,3	Aa	39,1 ± 11,6	Aa	15,2 ± 4,0	Ba	13,4 ± 2,2	Aa
Material reprodutivo	5,4 ± 1,9	Ab	11,0 ± 3,6	Aa	1,13 ± 0,36	Aa	1,8 ± 0,4	Ba	1,5 ± 0,3	Aa	2,1 ± 0,4	Ba
Miscelânea	3,8 ± 0,7	Ba	4,4 ± 0,9	Aa	8,6 ± 0,5	Aa	4,4 ± 0,7	Aa	3,8 ± 0,7	Ba	4,7 ± 0,6	Aa
Total	45,5 ± 4,0	Aa	56,7 ± 13,3	Aa	75,4 ± 10,8	Aa	69,1 ± 8,3	Aa	51,1 ± 4,2	Aa	53,5 ± 4,7	Aa

Sistema	FS - 40			FS - 20			FS - 30					
Fração serapilheira (g m ⁻²)	Maio		Outubro		Maio		Outubro		Maio		Outubro	
Grossa ≥ 1 cm	12,7 ± 1,9	Aa	20,8 ± 4,9	Aa	16,3 ± 6,2	Aa	12,5 ± 4,1	Aa	11,1 ± 2,2	Aa	21,4 ± 4,7	Aa
Fina < 1 cm	20,8 ± 5,2	Aa	12,8 ± 1,4	Aa	13,0 ± 1,5	Aa	10,9 ± 1,7	Aa	11,5 ± 0,6	Aa	12,1 ± 1,8	Aa
Folha	14,9 ± 1,7	Ab	21,9 ± 1,5	Aa	17,7 ± 2,3	Ab	25,1 ± 1,1	Aa	22,9 ± 5,0	Aa	28,5 ± 5,4	Aa
Folíolo da palma												
Ráquis da palma												
Material reprodutivo	0,8 ± 0,4	Aa	0,8 ± 0,5	Aa	0,7 ± 0,5	Aa	0,2 ± 0,1	Aa	0,3 ± 0,2	Aa	1,9 ± 1,2	Aa
Miscelânea	13,1 ± 4,0	Aa	13,3 ± 1,8	Aa	8,1 ± 0,6	Ab	17,1 ± 3,7	Aa	4,6 ± 0,7	Ab	14,0 ± 2,5	Aa
Total	62,2 ± 9,9	Aa	69,6 ± 6,8	Aa	55,9 ± 6,2	Aa	65,8 ± 5,3	Aa	50,4 ± 6,9	Aa	78,0 ± 2,5	Aa

O estoque de raízes finas na UD1 variou entre sistemas ($p= 0,032$; SAF P-Frut \geq Palma Conv1 \geq FS-40), e períodos de chuva ($p= 0,002$; março $>$ outubro) (Figura 9-A). Os sistemas da UD2 não influenciaram o estoque de raízes ($p=0,184$), nem quanto ao período de coleta ($p= 0,080$) e quanto à interação entre os fatores ($p=0,091$) (Figura 9-B). A avaliação da UD3 indicou que o estoque de raízes finas é maior nos SAF P-Past e FS-30 e menor no Palma Conv2 ($p=0,017$) (Figura 9-C). Houve diferença significativa entre os períodos de chuva apenas na FS-30.

O estoque de raízes finas avaliado entre os dois cultivos convencionais de palma, não foi afetado significativamente pelos sistemas, meses de coleta ou interação entre estes fatores (Figura 9-D). A avaliação dos SAFs quanto à esta variável, não demonstrou diferenças significativas entre os sistemas e nem interação entre os sistemas e meses de coleta, mas indicou que o estoque de raízes finas é significativamente maior em março ($p= <0,001$) (Figura 9-E). E entre florestas sucessionais com diferentes idades, o estoque de raízes finas foi maior na FS-20 e FS-30 e menor na FS-40 ($p= 0,005$) (Figura 9-F). E significativamente maior, no mês de março ($p=0,042$). No entanto, não houve interação entre os fatores.

Figura 9 - Raízes finas no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Frut), e na floresta sucessional de 40 anos (FS-40) (A). Raízes finas no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv1), no sistema agroflorestal (SAF P-Flor), e na floresta sucessional de 20 anos (FS-20) (B). Raízes finas no sistema convencional de palma de óleo (Palma Conv2), no sistema agroflorestal (SAF P-Past), e na floresta sucessional de 30 anos (FS-30) (C). Respiração microbiana do solo nos sistemas convencionais de palma de óleo (Palma Conv1 e Palma Conv2) (D), nos sistemas agroflorestais (SAF P-Frut, SAF P-Flor, e SAF P-Past) (E), e nas florestas sucessionais de 40, 20 e 30 anos (FS-40, FS-20, e FS30) (F) média \pm erro padrão). Letras maiúsculas comparam as médias dos sistemas. Letras minúsculas comparam as médias entre os meses. Médias com letras iguais não diferem estatisticamente pelo Teste Tukey ($P < 0,05$).



5.3.3 Correlação

A correlação entre o efluxo anual de C e raízes foi positivo para os sistemas Palma Conv1, Palma Conv2, SAF P-Frut, e SAF P-Flor (Tabela 9). O sistema SAF P-Past apresentou correlação positiva das variáveis serapilheira grossa, serapilheira foliolo, serapilheira ráquis, serapilheira miscelânea, e serapilheira total com o efluxo anual de C.

Tabela 9 - Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre as variáveis com o efluxo de C anual nos sistemas convencionais de palma de óleo, nos sistemas agroflorestais com palma de óleo, e nas florestas secundárias, em Tomé-açu, Pará. Nível de significância: *p < 0,05.

Sistemas	Palma Conv1	Palma Conv2	SAF P-Frut	SAF P-Flor	SAF P-Past	FS-40	FS-20	FS-30
Raízes	r= 0,82 p < 0,001	r= 0,73 p < 0,001	r= 0,55 p < 0,001	r= 0,58 p < 0,001				
Serapilheira Grossa					r= 0,69 p < 0,001			r= -0,81 p= 0,015
Serapilheira Foliolo					r= 0,72 p < 0,001			
Serapilheira Raquis					r= 0,8 p < 0,001			
Serapilheira Miscelanea					r= 0,8 p < 0,001			
Serapilheira Reprodutivo	r= 0,64 p < 0,001	r= 0,8 p < 0,001						
Serapilheira Total					r= 0,83 p < 0,001			

Fonte: Da autora.

5.4 Discussão

Os valores de efluxo de CO₂ do solo nas áreas de floresta sucessionais de 20 e 40 anos (FS-20 = 5,46 ± 0,44 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹; FS-40 = 5,98 ± 0,74 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) encontrados na pesquisa são consistentes com outros estudos realizados em florestas amazônicas (ARAÚJO et al., 2010; CHAMBERS et al., 2004; SOTTA et al., 2004; VASCONCELOS et al., 2004; ZANCHI et al. 2009), exceto na floresta sucessional de 30 anos (FS-30= 9,93 ± 0,18 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) que estão acima dos valores de florestas tropicais

Nos sistemas agroflorestais com palma de óleo estão na faixa de 3 a 4,7 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹ (SAF P-Frut = 3,75 ± 0,39 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹; SAF P-Flor = 3,43 ± 0,38 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹; SAF P-Past = 4,69 ± 0,25 μmol CO₂ m⁻² s⁻¹) encontradas por Silva et al. (2016), Bae et al. (2013) e Straaten et al. (2010), em sistemas agroflorestais de zona tropical. Nos

sistemas convencionais de palma de óleo os valores de efluxo de CO₂ do solo (Palma Conv1 = $2,22 \pm 0,23 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$; Palma Conv2 = $2,44 \pm 0,25 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) são consistentes com estudo realizado em área de plantação de palma de óleo (MANDE et al., 2014), e estão abaixo de valores encontrados em outras pesquisas em áreas convencionais de palma de óleo (ISHIZUKA et al., 2005; LAMADE et al., 1996).

Os sistemas convencionais da palma de óleo são menos diversificados e menos complexos, quando comparados a sistemas agroflorestais com palma de óleo e sistemas de floresta sucessional, o que justifica: 1- valores mais baixos de efluxo de CO₂ do solo encontrados nos sistemas convencionais da palma de óleo; e 2- valores iguais quanto a comparação de sistema semelhantes.

Neste estudo, a variação do efluxo de CO₂ do solo entre os sistemas (sistema convencional da palma de óleo, sistemas agroflorestais com palma de óleo e florestas sucessionais) seguiu o mesmo padrão: em todas as áreas estudadas, os valores de efluxo de CO₂ do solo foram mais altos nas áreas de floresta sucessional, intermediário nos sistemas agroflorestais, e mais baixo nos sistemas convencionais de palma de óleo.

Os sistemas agroflorestais com palma de óleo são mais complexos e apresentam uma diversidade de espécies que proporciona uma interação de múltiplos fatores ligados principalmente: ao solo, vegetação e manejo, que influenciam nos mecanismos que controlam o efluxo de CO₂ proporcionando padrões diferenciados entre os SAFs apesar da semelhança de uso do solo. Isto pode ter ocorrido devido às diferenças na composição da vegetação dos sistemas, visto que a vegetação pode influenciar na quantidade e qualidade de detritos vegetais, na estrutura do solo, e na taxa de respiração das raízes (RAICH; TUFEKCIOGLU, 2000).

Nos sistemas de floresta sucessional encontra-se uma complexidade muito maior, pela diversidade de espécies e funções ecossistêmicas, que justificam as elevadas taxas de efluxo de CO₂ do solo, provenientes de um maior estoque de matéria orgânica, elevada taxa de decomposição e maior liberação de nutrientes para o desenvolvimento radicular, como comumente observado na literatura (DIAS; RUIJVEN; BERENDSE, 2010).

Esses resultados são consistentes com o gradiente de diversidade e densidade de espécies encontrada nos sistemas estudados (FS > SAF > Palma Conv), favorecendo o aporte de matéria orgânica e condições abióticas (e.g., umidade do solo) que podem estimular a atividade de microrganismos e de raízes.

Em geral o efluxo de CO₂ do solo nos sistemas acompanhou a variação sazonal da precipitação. Estes resultados são semelhantes ao padrão observado em outros estudos

na Amazônia em áreas de floresta (DAVIDSON et al., 2000; SALIMON et al., 2004; VASCONCELOS et al., 2004). A respiração do solo é reduzida quando a disponibilidade de água é limitante, atingindo valores elevados quando os eventos de chuvas são predominantes (CHAMBERS et al., 2004; HURSH et al., 2016; RAICH; SCHLESINGER, 1992), devido o aumento da atividade microbológica do solo e a produção de CO₂ (DAVIDSON et al., 2000; RYAN; LAW, 2005).

O estoque de serapilheira variou entre os SAFs, mostrando que o SAF P-Frut e o SAF P-Past apresentam menores estoques em relação ao SAF P-Flor, no período de menor precipitação. Então é possível que a serapilheira, tenha influenciado na atividade dos microorganismos do solo e desenvolvimento radicular e conseqüentemente o efluxo de CO₂ do solo. Pois foi encontrada correlação entre a produção anual de serapilheira e o efluxo anual de C do solo como relatada em outras pesquisas (HAN et al., 2015; RAICH; DAVIDSON et al., 2002; SAYER et al., 2007; TUFEKCIUGUL, 2000).

A influência da serapilheira na produção de CO₂ no solo é reforçada aliada ao manejo de podas das folhas da palma, pois foi observado correlação das frações da palma, com o efluxo de C anual no sistema SAF P-Past. Isto é resultado da prática de deposição de folhas da palma sobre o solo, que confere um alto acúmulo de resíduos orgânicos, o que favorece uma melhor ciclagem de nutrientes e retenção de umidade (FRAZÃO et al. 2013; LAW et al. 2009), representando um ambiente de interação favorável ao desenvolvimento de raízes e decomposição localizada e mais gradativa. O processo de decomposição gradual é fundamental a autossustentabilidade dos sistemas (CUEVAS; MEDINA, 1988), o que é sustentado no manejo na formação de pilhas em agroflorestas com palma de óleo, indicando assim a essencialidade dessa prática nos sistemas.

5.5 Conclusão

O efluxo de CO₂ do solo foi sensível aos diferentes usos da terra, os sistemas agroflorestais com palma de óleo apresentaram valores de efluxo de CO₂ do solo maiores que as áreas dos sistemas convencionas da palma de óleo (FS > SAF's > Palma Conv), e foram fortemente controlado umidade gravimétrica do solo, acompanhando os padrões de sazonalidade pluviométrica da região.

O estoque de serapilheira seguiu o mesmo gradiente que o efluxo de CO₂ do solo (FS > SAF's > Palma Conv). O estoque raízes finas não foi sensível aos diferentes usos da terra, e não se correlacionou com a sazonalidade pluviométrica da região.

Embora o funcionamento do solo no SAF não seja igual ao funcionamento da floresta, os resultados comprovam que os impactos ocasionados pela produção da palma de óleo no SAF são menores do que no sistema convencional.

REFERÊNCIAS

ADACHI, M.; BEKKU, Y.S.; RASHIDAH, W.; OKUDA, T.; KOIZUMI, H. Differences in soil respiration between different tropical ecosystems. **Applied Soil Ecology**, v.34, n. 2–3, p. 258–265, 2006.

ARAÚJO, A. C. de; DOLMAN, A. J.; WATERLOO, M. J.; GASH, J. H. C.; KRUIJT, B.; ZANCHI, F. B.; DE LANGE, J. M. E.; STOEVELAAR, R.; MANZI, A. O.; NOBRE, A. D.; LOOTENS, R. N.; BACKER, J. The spatial variability of CO₂ storage and the interpretation of eddy covariance fluxes in central Amazonia. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 150, n. 2, p. 226–237, 2010.

ARAÚJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M. P. C. Qualidade do solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1099- 1108, 2007.

BAAH-ACHEAMFOUR, M.; CHANG, S. X.; CARLYLE, C. N.; BORK, E. W. Carbon pool size and stability are affected by trees and grassland cover types within agroforestry systems of western Canada. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 213, p. 105-113, 2015.

BAE, K.; LEE, D. K.; FAHEY, T. J.; WOO, Y. W.; QUAYE, A. K.; LEE, Y. K. Seasonal variation of soil respiration rates in a secondary forest and agroforestry systems. **Agroforestry System**, v.87, p. 131- 139, 2013.

BASTOS, T. X.; MULLER, A. A.; PACHECO, N. A.; SAMPAIO, S. M. N.; ASSAD, E. D.; MARQUES, A. F. S. Zoneamento de riscos climáticos para a cultura do dendzeiro no estado do Pará. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.9, n. 3, p. 564–570, 2001.

BECKER, B.K. Recuperação de áreas deflorestadas da Amazônia: será pertinente o cultivo da palma de óleo (Dendê)? **Confins**, n. 10, p. 1958-9212, 2011.

BHAGWAT, S. A.; WILLIS, K. J. Agroforestry as a solution to the oil-palm debate. **Conservation Biology**, v. 22, n. 6, p. 1368–1369, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1523-1739.2008.01026.x>. Acesso em: 05 ago. 2016.

BHAGWAT, S. A.; WILLIS, K. J.; BIRKS, H. J. B.; WHITTAKER, R. J. Agroforestry : a refuge for tropical biodiversity ?. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 23, p. 261–267, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tree.2008.01.005>. Acesso em: 04 ago. 2016.

BOLFE, E. L.; BATISTELLA, M. Análise florística e estrutural de sistemas silviagrícolas em Tomé-Açu, Pará. **Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília**, v. 46, p. 1139-1147, 2011.

BRASIL. Câmara dos Deputados. **Projeto de Lei 7326, de 13 de maio de 2010 que dispõe sobre a criação do Programa de Produção Sustentável da Palma de Óleo no Brasil, estabelece as diretrizes para o zoneamento agroecológico para a cultura da palma de óleo e dá outras providências**. Disponível em: http://www.camara.gov.br/proposicoesWeb/prop_mostrarintegra;jsessionid=8A60D2B89D0A4BA481EFC D1D989B33B9.proposicoesWeb2?codteor=768113&filename=PL+7326/2010. Acesso em 14.jul.2016.

BRASIL. Ministério da Ciência Tecnologia e Inovação (MCTI). 2010. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**. Disponível em: http://www.mcti.gov.br/upd_blob/0226/226591.pdf. Acesso em: 04 ago. 2016.

CARVALHO, W. R.; VASCONCELOS, S. S.; KATO, O. R.; CAPELA, C. J. B.; CASTELLANI, D. C. Short-term changes in the soil carbon stocks of young oil palm-based agroforestry systems in the eastern Amazon. **Agroforest Syst**, v. 88, p. 357-368, 2014.

CASTRO, A. P.; FRAXE, T. J. T.; SANTIAGO, J. L.; MATOS, R. B.; PINTO, I. C. Os sistemas agrofloreais como alternativa de sustentabilidade em ecossistemas de várzea no Amazonas. **Acta Amazonica**, v.39, n. 2, p.279-288, 2009.

CHAMBERS, J. Q.; TRIBUZY, E. S.; TOLEDO L. C.; CRISPIM B. F.; SANTOS N. J.; ARAUJO, A. C. B.; KRUIJT, B.; NOBRE, A. D.; TRUMBORE, S. E. Respiration from a tropical forest ecosystem: Partitioning of sources and low carbon use efficiency. **Ecological Applications**, v. 14, p. 72–88, 2004.

COMITÊ INTERMINISTERIAL SOBRE MUDANÇA DO CLIMA. Plano Nacional sobre Mudança do Clima - PNMC. **Comitê interministerial sobre mudança do clima**, p. 1–132, 2008. Disponível em: http://www.mma.gov.br/estruturas/smcq_climaticas/_arquivos/plano_nacional_mudanca_clima.pdf. 6.263.

DAVIDSON, E. A.; SAVAGE, K.; VERCHOT, L. V.; NAVARRO, R. Minimizing artifacts and biases in chamber-based measurements of soil respiration. **Agricultural and forest meteorology**, v. 113, p. 21–37, 2002.

DAVIDSON, E.A.; VERCHOT, L.V.; CATTÂNIO, J. H.; ACKERMAN, I. L.; CARVALHO, J. E. M. Effects of soil water content on soil respiration in forests and cattle pastures of eastern Amazonia. **Biogeochemistry**, v.48, n. 1, p. 53–69, 2000.

DIAS, A.T.C.; RUIJVEN, J.V.; BERENDSE, F. 2010. Plant species richness regulates soil respiration through changes in productivity. **Oecologia**, n. 163, p. 805-813, 2010.

DIAS, I. P.; COSTA, B. C.; ALMEIDA, J. F.; TOURINHO, M. M. Avaliação da estimativa de fixação de carbono em sistemas agrofloreais na região amazônica. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 10, n. 5, p. 07-10, 2015.

FEARNSIDE, P.M. **A floresta amazônica nas mudanças globais**. Manaus: INPA, 2003. 134p.

FRAZÃO, L. A.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. E.; CERRI, C. C. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. **GCB Bioenergy**, v. 5, p. 384-390, 2012.

FRAZÃO L. A.; PAUSTIAN K.; CERRI C. E. P.; CERRI C. C. Soil carbon stocks and changes after oil palm introduction in the Brazilian Amazon. **Glob Change Biol Bioenergy**, v. 5, p. 384–390, 2013.

FREUDMANN, A. MOLLIK, P.; TSCHAPKA, M.; SCHULZE, C. H. Impacts of oil palm agriculture on phyllostomid bat assemblages. **Biodivers Conserv**, v. 24, p. 3583–3599, 2015.

GRANIER, A., CESCHIA, E., DAMESIN, C., DUFRÊNE, E., EPRON, D., GROSS, P., LEBAUPE, S., LE DANTEC, V., LE GOFF, N., LEMOINE, D., LUCOT, E., OTTORINI, J.M., PONTAILLER, J.Y., SAUGIER, B. The carbon balance of a young beech forest. **Functional Ecology**, n. 14, v. 3, p. 312–325, 2000.

HAN, T.; HUANG, W.; LIU, J.; ZHOU, G.; XIAO, Y. Different soil respiration responses to litter manipulation in three subtropical successional forests. **Scientific Reports**, v. 5, p. 18166, 2015.

HOMMA, A. K. O.; FURLAM-JUNIOR, J. A dendeicultura como um sistema sustentável na Amazônia In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL AGRONEGÓCIO DO DENDÊ: UMA ALTERNATIVA SOCIAL, ECONÔMICA E AMBIENTAL PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DA AMAZÔNIA, 2000, Belém. **Anais...** Belém: Embrapa, 2000. p. 53-54.

HOMMA, A. K. O. Dinâmica dos sistemas agroflorestais: o caso da colônia agrícola de Tomé-Açu, Pará. **Revista do IESAM**, v. 2, n. 1/2, p. 57-65, 2004.

HOMMA, A. K. O.; VIEIRA, I. C. G. Colóquio sobre dendezeiro: Prioridades de pesquisas econômicas, sociais e ambientais na Amazônia. **Amazônia: Ciência e desenvolvimento**, Belém, PA, v. 8, n. 15, p. 79-90, jul/dez. 2012.

HURSH, A.; BALLANTYNE, A.; COOPER, L.; MANETA, M.; KIMBALL, J.; WATTS, J. The sensitivity of soil respiration to soil temperature, moisture, and carbon supply at the global scale. **Global Change Biology**, p. 2090–2103, 2016.

PAINEL INTERGOVERNAMENTAL SOBRE MUDANÇAS CLIMÁTICAS (IPCC). **Climate change 2014**: synthesis report. contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental Panel on climate change. Geneva, Switzerland, IPCC, 2014. 151p.

ISHIZUKA, S.; ISWANDI, A.; NAKAJIMA, Y.; YONEMURA, S.; TSURUTA, H.; MURDIYARSO, D. The variation of greenhouse gas emissions from soils of various land-use / cover types in Jambi province, Indonesia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, n. 1993, p. 17–32, 2005.

LAMADE, E.; DJEGUI, N.; LETERME, P. Estimation of carbon allocation to the roots from soil respiration measurements of oil palm. **Plant and Soil**, v. 181, n. 2, p. 329–339, 1996.

LAMEIRA, W. J. M.; VIEIRA, I. C. G.; TOLEDO, P. M. Análise da expansão do cultivo da palma de óleo no Nordeste do Pará. **Novos Cadernos NAEA**, v. 18, n.2, p. 185-197, 2015.

LAW, M. C.; BALASUNDRAM, S. K.; HUSNI, M. H. A.; AHMED, O. H.; HARUN, M. H. Spatial variability on soil organic carbon in oil palm. **International Journal of Soil Science**, v.4, n. 4, p. 93-103, 2009.

LEVERMANN, R. A.; SOUZA, P. M. **Óleo de palma**: o crescimento da indústria global. agroanalysis. FGV EEESP. 2014. Disponível em: <http://www.agroanalysis.com.br/2/2014>. Acesso em: 29 abril. 2016.

- LIMA, A. M. N.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F.; BARROS, N. F.; MENDONÇA, E. S.; DEMOLINARI, M. S. M.; LEITE, F. P. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no vale do Rio Doce - MG. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, v. 32, p. 1053-1063, 2008.
- LINH, T. B.; SLEUTEL, S.; GUONG, V. T.; KHOA, L. V.; CORNELIS, W. M. Deeper tillage and root growth in annual rice-upland cropping systems result in improved rice yield and economic profit relative to rice monoculture. **Soil & Tillage Research**, v. 154, p. 44–52, 2015.
- LOU, Y.; ZHOU, X. **Soil Respiration and the Environment**. 1 ed. California: Elsevier, 328p.
- MANDE, H. K. et al. A Comparison of soil CO₂ efflux rate in young rubber plantation, oil palm plantation, recovering and primary forest ecosystems of Malaysia. **Polish Journal of Environmental Studies** v. 23, n. 5, p. 1649–1657, 2014.
- MARQUES, J. D. O.; LUIZÃO, F. J.; TEIXEIRA, W. G.; SARRAZIN, M.; FERREIRA, S. J. F.; BELDINI, T. P.; MARQUES, E. M. A. Distribution of organic carbon in different soil fractions in ecosystems of central amazônia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 1, p. 232-242, 2015.
- MONTEIRO, K. F. G.; HOMMA, A. K. O. Diferentes sistemas de produção com palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) e a participação do Brasil no cenário internacional. **Observatório de La Economía Latinoamericana**, 2014
- NUNES, L. A. P. L.; DIAS, L. E.; JUCKSCH, I.; BARROS, N. F. Atributos físicos do solo em área de monocultivo de cafeeiro na zona da mata de minas gerais. **Bioscience Journal**, v. 26, n. 1, p. 71-78, 2010.
- RAMESH, T.; MANJIAH, K. M.; MOHOPATRA, K. P.; RAJASEKAR, K.; NGACHAN, S. V. Assessment of soil organic carbon stocks and fractions under different agroforestry systems in subtropical hill agroecosystems of north-east India. **Agroforest Systems**, v. 89, p. 677–690, 2015.
- RAICH, J. W.; SCHLESINGER, W. H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to climate. **Tellus**, v.44B, p.81–99, 1992.
- RAICH, J. W.; TUFEKCIOGLU, A. Vegetation and soil respiration: correlations and controls. **Biogeochemistry**, v. 48, p. 71–90, 2000.
- RYAN, M. G.; LAW, B. E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. **Biogeochemistry**, v. 73, n. 1, p. 3–27, 2005.
- SALIMON, C. I.; DAVIDSON, E. A.; VICTORIA, R. L.; MELO, A. W. F. CO₂ flux from soil in pastures and forests in southwestern Amazonia. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 833–843, 2004.
- SANTIAGO, W. R.; VASCONCELOS, S. S.; KATO, O. R.; BISPO, C. J. C.; RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; CASTELLANI, D. C. Nitrogênio mineral e microbiano do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia oriental. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 4, p. 395-406, 2013.

SAYER, E. J.; POWERS, J. S.; TANNER, E. V. J. Increased litterfall in tropical Forests boosts the transfer of soil CO₂ to the atmosphere. **PloS One**, n. 12, p. 1–6, 2007.

SILVA, C. M.; VASCONCELOS, S. S.; MOURÃO JÚNIOR, M.; BISPO, C. J. C.; KATO, O. R.; SILVA JUNIOR, A. C. da; CASTELLANI, D. C. Variação temporal do efluxo de CO₂ do solo em sistemas agroflorestais com palma de óleo na Amazônia Oriental. **Acta Amazonica**, v. 46, n. 1, p. 1–12, 2016.

SOTTA, E. D. et al. Landscape and climatic controls on spatial and temporal variation in soil CO₂ efflux in an Eastern Amazonian Rainforest, Caxiuanã, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 237, p. 57–64. 2006.

SOTTA, E. D.; MEIR, P.; MALHI, Y.; NOBRE, A. D.; HODNETT, M.; GRACE, J. Soil CO₂ efflux in a tropical forest in the central Amazon. **Global Change Biology**, v. 10, n. 5, p. 601–617, 2004.

STRAATEN, O. V.; VELDKAMP, E.; KÖHLER, M.; ANAS, I. Spatial and temporal effects of drought on soil CO₂ efflux in a cacao agroforestry system in Sulawesi, Indonesia. **Biogeosciences**, v. 7, p. 1223–1235, 2010.

PEZARICO, C. R.; VITORINO, A. C. T.; MERCANTE, F. M.; DANIEL, O. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 56, n. 1, p. 40-47, 2013.

TEEPE, R.; DILLING, H.; BEESE, F. Estimating water retention curves of forest soils from soil texture and bulk density. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 166, n. 1, p. 111–119, 2003.

THOKCHOM, A.; YADAVA, P. S. Soil CO₂ flux in the different ecosystems of North East India. **Current Science: Research Communications**, v. 107, n. 1, p. 99–105, 2014.

TUMWEBAZE, S. B.; BYAKAGABA, P. Soil organic carbon stocks under coffee agroforestry systems and coffee monoculture in Uganda. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 216, p. 188-193, 2016.

VASCONCELOS, S. S.; ZARIN, D. J.; CAPANU, M.; LITTELL, R.; DAVIDSON, E. A.; ISHIDA, F. Y.; SANTOS, E. B.; ARAÚJO, M. M.; ARAGAO, D. V.; RANGEL-VASCONCELOS, L. G. T.; OLIVEIRA, F. de A.; MCDOWELL, W. H.; CARVALHO, C. J. R. de. Moisture and substrate availability constrain soil trace gas fluxes in an eastern Amazonian regrowth forest. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 18, n. 2, p. 1–10, 2004.

VIJAY, V.; PIMM, S. L.; JENKINS, C. N.; SMITH, S. J. The impacts of oil palm on recent deforestation and biodiversity loss. **PLoS Biology**, n.11, v.7, p. 1–19, 2016.

ZANCHI, F. B.; ROCHA, H. R da; DE FREITAS, H. C.; KRUIJT, B.; WATERLOO, M. J.; MANZI, A. O. Measurements of soil respiration and simple models dependent on moisture and temperature for an Amazonian southwest tropical forest. **Biogeosciences Discussions**, v.6, n. 3, p. 6147–6177, 2009.

ZANCHI, F. B.; WATERLOO, M.J.; KRUIJT, B.; KESSELMEIER, J.; LUIZÃO, F. J.; MANZI, A. O.; DOLMAN, A. J. Soil CO₂ efflux in Central Amazonia: environmental and methodological effects. **Acta Amazônica**, v. 42 n. 2, p. 173-184, 2012.

ZHOU, Z.; ZHANG, Z.; ZHA, T.; LUO, Z.; ZHENG, J.; SUN, O. J. Predicting soil respiration using carbon stock in roots, litter and soil organic matter in forests of Loess Plateau in China. **Soil Biology and Biochemistry**, n. 57, p. 135–143, 2013.