



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

EMANUELLY MELO DE OLIVEIRA MENDES

DINÂMICA DO EFLUXO DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) DO SOLO EM DUAS
ÁREAS DISTINTAS NA AMAZÔNIA

BELÉM-PA
2019

EMANUELLY MELO DE OLIVEIRA MENDES

DINÂMICA DO EFLUXO DE DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂) DO SOLO EM DUAS
ÁREAS DISTINTAS NA AMAZÔNIA

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

Área de Concentração: Clima e dinâmica socioambiental na Amazônia.

Linha de Pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente

Orientador: Dr. Alessandro Carioca de Araújo.

Coorientador: Dr. Steel Silva Vasconcelos

BELÉM-PA
2019

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)

M538d Mendes, Emanuely Melo de Oliveira

Dinâmica do efluxo de dióxido de carbono (CO₂) do solo em duas áreas distintas na Amazônia / Emanuely Melo de Oliveira Mendes. — 2021.

76 f. : il.

Orientador(a): Prof. Dr. Alessandro Carioca de Araujo

Coorientador(a): Prof. Dr. Steel Silva Vasconcelos

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2019.

1. Efluxo de CO₂. 2. Monocultivo de palma de óleo. 3. Sistema integração lavoura pecuária floresta. 4. Mudanças climáticas. 5. Uso da terra. I. Título.

CDD 630.2515098115

EMANUELLY MELO DE OLIVEIRA MENDES

**DINÂMICA DO EFLUXO DE CO₂ NO SOLO EM DUAS ÁREAS DISTINTAS NA
AMAZÔNIA.**

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

Área de Concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia.

Linha de Pesquisa: Interação Clima, Sociedade e Ambiente.

Data de aprovação: 16 / 08 / 2019

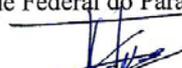
Banca Examinadora:



Prof. Dr. Alessandro Carioca de Araújo - Orientador
Doutor em Ciências Geoambientais
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA



Prof. Dr. Everaldo Barreiros de Souza – Membro Interno
Doutor em Meteorologia
Universidade Federal do Pará - UFPA



Prof. Dr. José Henrique Cattanio - Membro Interno
Doutor em Agronomia
Universidade Federal do Pará - UFPA



Prof. Dr. Claudio José Reis de Carvalho - Membro Externo
Doutor em Ecofisiologia Vegetal
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA



Prof. Dr. Raphael Rablo Tapajós Silva - Membro Externo
Doutor em Sociedade, Natureza e Desenvolvimento
Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelas graças alcançadas ao longo desse período;

Agradeço a minha família pelo apoio incondicional. Em especial a meu marido Fabrício Mendes pela compreensão, suporte, incentivo e amor a mim concedidos.

A minha mãe por vencer as batalhas da vida e mostrar o que é verdadeiramente importante em nossa jornada.

A Universidade Federal do Pará (UFPA) e ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA), nas pessoas dos professores doutores, pelos ensinamentos. Assim como aos coordenadores Edson Rocha, Aline Meiguins e Everaldo Barreiros, grata pela atenção nos mais diversos assuntos. À secretaria do programa Elisane pelos esclarecimentos e informações sobre os trâmites a serem cumpridos. E a senhora Lúcia Imbiriba da biblioteca setorial do IG (Instituto de Geociências) pela orientação na formatação da versão final de tese. A EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária) Amazônia Oriental, pela infraestrutura, logística e apoio técnico nas pessoas do Sr. Ivanildo Trindade e Neusa Maria da Silva Ferreira nas coletas de campo e análises laboratoriais, respectivamente. Na sede em Terra Alta - PA, ao apoio dos funcionários Claudineia, Hilário, Edinaldo, Sr. Celso e Iramadson.

A orientação recebida pelo Dr. Alessandro Carioca de Araújo, agradeço a disponibilidade, atenção e ensinamentos. Ao Dr. Steel Vasconcelos pelo atendimento nas mais diversas dúvidas. E a Dra. Célia Maria Calandrini por todo acolhimento e suporte durante as coletas realizadas no município de Terra Alta - PA.

À Marborges Agroindústria S.A. pela disponibilização de área para realização do estudo e apoio dos colaboradores da empresa nas pessoas de Carlos Quaresma e Sr. Pina.

As amigas feitas durante esses anos, em especial a Giselle Nerino, Leila Leal, Julie França, Priscila Barros e Amanda Estefânia, agradeço pelo companheirismo, desabafos, apoio e motivações concedidas.

E por fim a CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos.

“Estamos perdendo a corrida
para as mudanças climáticas.
Esse é o desafio de nossa geração
ganhar a batalha contra o tempo”.

Emmanuel Macron

RESUMO

Os ecossistemas terrestres são importantes para compreender as trocas de CO₂ entre superfície e atmosfera. Pesquisas têm buscado compreender o potencial de sequestro e emissão de carbono em diferentes agroecossistemas. Entre eles, as pastagens naturais que apresentam significativa participação no ciclo do carbono subsídio alimentar para a produção de carne. Assim como a produção de óleo de palma responsável pela produção de 30% do óleo comestível no mundo e parte na produção de biodiesel. Neste estudo, foram avaliados dois usos de cobertura do solo (iLPF e monocultivo de palma de óleo) e o efluxo de CO₂. Foi utilizado o método de câmaras dinâmicas fechadas associadas a um analisador de gás por infravermelho. Este trabalho apresenta observações mensais em monocultivo de óleo de palma e em dois iLPFs o primeiro com mogno-africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) e o segundo com teca (*Tectona grandis* L. f.). No primeiro caso no monocultivo de óleo de palma o empilhamento de folhas foi responsável pelos maiores valores de efluxo de CO₂ dentro dos anéis de medida durante os dois períodos observados (chuvoso e menos chuvoso) em comparação aos dois outros dois pontos observados (base da palma e carreador). Já no experimento realizado em área de iLPF a dinâmica do efluxo de CO₂ (EFCO₂) diferiu entre os três sistemas estudados. O aumento do EFCO₂ durante o meio dia em relação ao meio da manhã (oito horas) em todos os pontos estudados. Na área de controle (capoeira) não houve uma grande variação observada, sendo mais estável. Os maiores valores de EFCO₂ nos dois sistemas de iLPF (teca e mogno) foram encontrados na base das árvores para o sistema mogno e no pasto pisoteado para o sistema teca seguido da base das árvores. A baixa variação no efluxo de CO₂ solo entre a manhã e o meio dia na capoeira pode indicar se assemelham a florestas naturais, com árvores criando um microclima de solo que é adequado para o crescimento de microrganismos do solo. A umidade do solo correlacionada positivamente de forma fraca na base da teca e na área de transição. No caso da temperatura do solo não foi observada correlação positiva para a área em questão, apenas de forma moderada na área controle. Nas análises não foram encontradas correlações positivas do EFCO₂ com a umidade do solo em nenhum dos pontos estudados na área do mogno. Por sua vez foi encontrada uma relação fraca da Ts com área entre as árvores. As menores variações de temperatura do solo foram encontradas na capoeira seguida do iLPF mogno na área sombreada (Base mogno e entre plantas mogno). As maiores variações de Ts no período estudado (chuvoso) ocorreu na área de iLPF com teca. As árvores influenciam na dinâmica de CO₂

quando não estão distribuídas em área florestal.

Palavras-chave: Efluxo de CO₂. Monocultivo de palma de óleo. Sistema de integração lavoura pecuária e floresta. Mudanças climáticas. Uso da terra.

ABSTRACT

Terrestrial ecosystems are important for understanding the exchange of CO₂ between surface and atmosphere. Research has sought to understand the potential for carbon sequestration and emissions in different agroecosystems. Among them, the natural pastures that have significant participation in the carbon cycle food subsidy for meat production. As well as the production of palm oil responsible for the production of 30% of edible oil in the world and part of the production of biodiesel. In this study, two land cover uses (iLPF and oil palm monocultures) and CO₂ efflux were evaluated. The closed dynamic chamber method associated with an infrared gas analyzer was used. This work presents monthly observations in monoculture of palm oil and in two iLPFs the first with African mahogany (*Khaya ivorensis* A. Chev.) And the second with teak (*Tectona grandis* L. f.). In the first case in the palm oil monoculture, leaf stacking was responsible for the higher CO₂ efflux values within the measurement rings during the two observed periods (rainy and less rainy) compared to the two other observed points (palm base) and carrier). In the experiment carried out in the iLPF area, the dynamics of the CO₂ efflux (EFCO₂) differed between the three systems studied. The increase in EFCO₂ During midday compared to mid-morning (eight hours) at all points studied. In the control area (capoeira) there was no great variation observed, being more stable. The highest EFCO₂ values in the two iLPF systems (teak and mahogany) were found at the base of the trees for the mahogany system and in the trampled pasture for the teak system followed by the base of the trees. The low variation in CO₂ soil efflux between morning and noon in capoeira may indicate that they resemble natural forests, with trees creating a soil microclimate that is suitable for the growth of soil microorganisms. Soil moisture correlated positively weakly at the base of the teak and in the transition area. In the case of soil temperature, no positive correlation was observed for the area in question, only moderately in the control area. In the analyzes, no positive correlations were found between EFCO₂ and soil moisture at any of the points studied in the mahogany area. In turn, a weak relationship between Ts and area between trees was found. The smallest variations in soil temperature were found in poultry followed by iLPF mahogany in the shaded area (Base mahogany and among mahogany plants). The largest variations of Ts in the studied period (rainy) occurred in the area of iLPF with teak. Trees influence the CO₂ dynamics when they are not distributed in forest areas.

Keywords: CO₂ efflux. Oil palm monoculture. Livestock and forest crop integration system. Climate change. Land use.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

CAPÍTULO 1

- Figura 1- Diagrama esquemático dos processos do carbono em ecossistemas. Ra corresponde a respiração autotrófica das folhas, Rb das raízes da árvore, Rm é somatório das respirações das raízes das plantas rasteiras, da MOS – matéria orgânica do solo e da liteiras em decomposição..... 18

CAPÍTULO 2

- Figura 1 - Local do experimento Moju-Pa, Brasil..... 27
- Figura 2 - Precipitação acumulada (mm) e temperatura média diária mensal do ar (°C) em área de monocultivo de híbridos de palma de óleo no período de maio de 2016 a janeiro de 2018..... 28
- Figura 3 - Localização dos anéis na sub parcela 1 de 4 em área de monocultivo de híbridos de palma de óleo..... 29
- Figura 4 – Umidade gravimétrica do solo – Us (%) (A), efluxo de CO₂ (B) e Temperatura do solo - Ts (C) e ± erros padrão em 3 pontos observados em área com monocultivo de palma de óleo..... 32
- Figura 5 - Análise de variância ($p \leq 0,05$) de dois critérios (two-way ANOVA) em monocultivo de palma de óleo com híbridos interespecíficos para efeito do efluxo de CO₂ ao longo do período de coletas e pontos observados. As barras correspondem a ± o erro padrão. Médias seguidas de mesma letra maiúscula comparam as coletas para cada sistemas e letras minúsculas comparam os sistemas em cada coleta, mesma letra não difere entre si pelo teste Tukey 5%..... 33
- Figura 6 – Precipitação mensal e no dia da coleta em área de monocultivo de híbridos de óleo de palma 35
- Figura 7- Painéis do lado esquerdo: regressão linear do EFCO₂ dos pontos de observação (a) – Base da palma de óleo (menos chuvoso); (b) – Base da palma (chuvoso); (c) – Carreador (menos chuvoso); (d) – Carreador (chuvoso); (e) – Empilhamento (menos chuvoso) e (f) – Empilhamento de folhas na área do plantio no monocultivo de palma de óleo *versus* a temperatura do solo (Ts) durante o período chuvoso..... 39

Figura 8 (a) – Base da palma de óleo (menos chuvoso); (b) – Base da palma (chuvoso); (c) - Carreador (menos chuvoso); (d) – Carreador (chuvoso); (e) – Empilhamento (menos chuvoso) e (f) – Empilhamento de folhas na área do plantio no monocultivo de palma de óleo versus a umidade do solo (Us) durante o período chuvoso.....	41
Figura 9 - Umidade volumétrica no solo com palma de óleo (<i>Elaeis guineenses</i> Jacq.) em três pontos de observação em área de monocultivo, base da planta, empilhamento e carreador, nas profundidades de 0-10cm (a); 10-20 cm (b) e 20-30 cm (c) em Moju – PA.	43
CAPÍTULO 3	
Figura 1 - Precipitação pluviométrica e temperaturas máxima, mínima e média durante o período experimental, em Castanhal-PA.....	52
Figura 2 - Precipitação pluviométrica 3 dias antes e durante as coletas durante o período experimental, em Castanhal-PA.....	53
Figura 3 - Efeito do pisoteio e da diminuição da área foliar no efluxo de CO ₂ (EFCO ₂) durante a colocação animal no mês de março de 2019 em área de iLPF em Terra Alta – PA.....	57
Figura 4 - Efluxo de CO ₂ do solo ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) medido nos sistemas de integração lavoura pecuária floresta com teca (a) e mogno (b) e área de controle (capoeira), e Temperatura do solo (Ts) em teca (C) e mogno (d) nos períodos da manhã em dois horários (08:00 e 12:00).....	60
Figura 5 - Média (n=32) do efluxo de CO ₂ do solo ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), em sistemas de integração lavoura pecuária floresta com teca (iLPFT) e mogno (iLPFM), pastagem (PT e PM) e área de controle (capoeira). Quadros a superiores mostram a Ts (a esquerda) e EFCO ₂ (a direita) em ILPF com Mogno. Quadros inferiores com a Ts (a esquerda) e EFCO ₂ (a direita) em ILPF com Teca.....	61
Figura 6 - Análise de variância ($p \leq 0,05$) em iLPF mogno (a) e teca (b). As barras correspondem a \pm o erro padrão. Médias (n=4) seguidas de mesma letra minúsculas comparam os sistemas em cada coleta, mesma letra não difere entre si pelo teste Tukey 5%. Durante um período de coleta (08:00) no ano de 2019.....	65

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2

Tabela 1 - Efluxo de CO ₂ do solo em outras áreas e experimentos.....	36
Tabela 2 - Correlação de Pearson entre o EFCO ₂ (μmol.m ⁻² .s ⁻¹) variáveis ambientais umidade do solo (Us), temperatura do solo (Ts), precipitação (mm) e temperatura do ar (T _{ar}).....	37

CAPÍTULO 3

Tabela 1 - Média (n=32) da temperatura do solo a 5 centímetros (Ts _{5cm}), umidade do solo (Us), Amplitude da temperatura entre 12 e 8 horas (ΔT (12-08)) nos sistemas de integração lavoura pecuária floresta com teca (iLPFT) e mogno (iLPFM) e pastagem (Pasto T e Pasto M) e área de controle (capoeira).	56
Tabela 2 - Efluxo de CO ₂ do solo (μmol m ⁻² s ⁻¹), erro padrão (ep) e coeficiente de variação (CV) medido nos sistemas de integração lavoura pecuária floresta com teca (iLPFT) e mogno (iLPFM), pastagem (PT e PM) e área de controle (capoeira).....	58
Tabela 3 - Correlação de Pearson entre o EFCO ₂ (μmol.m ⁻² .s ⁻¹) e variáveis ambientais umidade do solo (Us), temperatura do solo (Ts) , precipitação (mm) e temperatura do ar (T _{ar}) em iLPF com mogno em quatro pontos (BT - Base Teca, EPT – Entre plantas, TT – Transição área florestal e pasto e PT – Pasto Teca) e área controle (capoeira).....	62
Tabela 4 - Correlação de Pearson entre o EFCO ₂ (μmol.m ⁻² .s ⁻¹) e variáveis ambientais umidade do solo (Us), temperatura do solo (Ts) , precipitação (mm) e temperatura do ar (T _{ar}) em iLPF com mogno em quatro pontos (BM - Base Mogno, EPM – Entre plantas, TM – Transição área florestal e pasto e PM – Pasto Mogno) e área controle (capoeira).....	64

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL.....	14
1.1 A situação climática global.....	14
1.2 O clima e a segurança alimentar.....	14
1.2.1 Sequestro de carbono em sistemas agrícolas.....	15
1.3 O ciclo do carbono do ecossistema terrestre	16
1.3.1 Efluxo de CO ₂ do solo na agricultura.....	18
1.3.2 Principais fatores ambientais controladores do efluxo de CO ₂	19
1.3.3 Atmosfera do solo e o transporte de gás no solo.....	20
1.4 Variabilidade espacial e temporal do efluxo de CO₂ do solo.....	21
1.5 Objetivos da pesquisa	21
1.6 Hipóteses.....	21
1.7 Estrutura da tese.....	22
CAPÍTULO 2 CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DO EFLUXO DE CO₂ EM CULTIVO DE PALMA DE ÓLEO COM HÍBRIDOS INTERESPECÍFICOS (<i>Elaeis guineenses</i> x <i>E. oleífera</i>) NO LESTE DA AMAZÔNIA.....	23
1. INTRODUÇÃO.....	25
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	27
2.1 Área do experimento.....	27
2.2 Variáveis meteorológicas.....	28
2.3 Efluxo de CO ₂ e temperatura do solo.....	28
2.3.1 Cálculos de Respiração do solo.....	29
2.4 Umidade gravimétrica.....	30
2.5 Análise dos dados.....	30
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	31
4. CONCLUSÕES.....	44
CAPÍTULO 3 A INFLUENCIA DAS ÁRVORES NA DINÂMICA DE EFLUXO DE CO₂ DO SOLO EM SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA NO NORDESTE DA AMAZÔNIA.....	48
1. INTRODUÇÃO	49
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	52

2.1 Histórico da área.....	53
2.2 Efluxo de efluxo de CO₂ e temperatura do solo	54
2.3 Umidade gravimétrica	55
2.4 Análise estatística.....	55
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	56
4. CONCLUSÕES.....	66
CAPÍTULO 4 CONCLUSÃO GERAL.....	69
4.1 Resultados chave: impactos e implicações.....	69
4.2 Prioridades para pesquisas futuras.....	70
4.3 Considerações finais	70
REFERÊNCIAS	72
APÊNDICE A - CROQUI DA ÁREA DE ESTUDO EM TERRA ALTA, PA, BRASIL.....	75

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO GERAL

1.1 A situação climática global

Estudos apresentados pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel on Climate Change – IPCC) apontaram que parte do CO₂ armazenado na biosfera terrestre é perdido por emissões em decorrência de queimadas e decomposição da vegetação morta, elevando a emissão de gases de efeito estufa (GEE) que podem ocasionar alterações climáticas no planeta e nos ecossistemas (IPCC, 2014). É importante salientar que os gases de efeito estufa no planeta Terra, particularmente o CO₂ e o vapor d'água absorvem a radiação infravermelha e aquecem a atmosfera e sem esses gases a temperatura no planeta seria negativa.

No entanto, no último século foi percebido um aumento na temperatura média do planeta devido ao aumento na concentração desses gases. Corley e Tinker (2016) relatam que historicamente o nível de CO₂ na atmosfera era mais ou menos constante 290 ppm por 1000 anos ou mais até a Revolução Industrial na Europa, marco onde após o ocorrido passou a ser percebido um aumento nessa concentração, principalmente por causa das atividades do homem (queima de combustíveis fósseis, destruição dos estoques de carbono nas florestas), a princípio lentamente e depois mais rapidamente, até o nível de 400 ppm em 2013. Para o próximo século as previsões de temperatura e chuvas são incertas com previsões alarmantes de duplicação na concentração de dióxido de carbono, tal incremento nos níveis de CO₂ afetará diretamente as plantas nos sistemas naturais, agrícolas e florestais.

Até 2050, segundo a FAO (2011), serão necessários 70 % a mais de alimentos para alimentar populações em especial em países em desenvolvimento. Em relação a segurança alimentar as mudanças climáticas despertam um grande desafio já que seu impacto como o aumento da temperatura resultará na redução de alimentos e um cenário de insegurança. Padgham (2009) relata que o rendimento das principais culturas de cereais (arroz, trigo, milho, sorgo) nos tópicos e sub-trópicos deverão diminuir com um aumento de temperatura tão pequeno quanto 1° C, como poderá ocorrer por volta de 2030.

1.2 O clima e a segurança alimentar

O uso e a cobertura do solo têm um papel fundamental no delineamento do ambiente em escalas global, regional e local. Mudanças no uso e cobertura do solo podem resultar em

aumentos da temperatura do solo, da erosão, e em modificações do balanço hídrico e na disponibilidade de nutrientes. Entender como os processos e os controles ambientais variam entre florestas nativas e áreas agrícolas é de suma importância para identificar os fatores que podem comprometer o bom uso solo.

A agricultura é sensível a mudanças de curto prazo e a mudanças sazonais no clima assim como a variações de longo prazo. Khan et al. (2009) revela que os elementos climáticos que afetam o crescimento e desenvolvimento das plantas, logo a agricultura como um todo serem a carbono concentração de dióxido de carbono, temperatura, radiação, precipitação e a umidade.

Como sabemos a agricultura gera serviços ambientais que atendem à demanda por alimentos, energia, fibras, ração e outros. Raj, Jhariya e Bargali (2017) tratam às terras cultiváveis com uma nova denominação pela *Climate Smart Agriculture* (CSA) mostrando que as terras agricultáveis devem ser bem manejadas para aumentar o seu potencial de sequestro de carbono como exemplo, o reflorestamento e aumento de atividade de florestamento o estoque de carbono na vegetação (acima e abaixo do solo) e aumentar o solo carbono orgânico (SOC) para manter a fertilidade do solo e a saúde. Na pastagem relata que a otimização de práticas de gestão, como a otimização das taxas de lotação, incorporação de espécies melhoradas de pastagens e leguminosas em terras degradadas, aplicação de fertilizantes inorgânicos e esterco e introdução de minhocas são capazes de melhorar a biomassa acima e abaixo do solo, capturando e reduzindo emissão de GEEs.

Da mesma forma, práticas como agricultura de conservação, agrofloresta, aplicação de cobertura morta, introdução de plantas de cobertura, variedades de culturas melhoradas, aplicação de fertilizantes orgânicos e inorgânicos e práticas de gestão de resíduos no ecossistema das terras agrícolas podem melhorar a capacidade de armazenamento tanto na planta como no solo. (CSAS, 2012).

1.2.1 Sequestro de carbono em sistemas agrícolas

Globalmente mais de um terço da terra arável está na agricultura e nela seria considerado um importante componente do uso do solo como sumidouro. O potencial de sequestro global dos solos agrícolas é tipicamente feito para sequestro em uma base anual e variam de 0,4 a 1,2 Gt ano⁻¹ (Gt ano⁻¹) (LAL, 2004a). Hansen et al. (2013) afirmam que uma taxa de acumulação de carbono do solo otimista poderia sequestrar pelo menos 10% das emissões anuais atuais de 8-10 Gt ano⁻¹. As atividades agrícolas têm sido a principal fonte de

emissões de CO₂, juntamente com os de CH₄ (metano) e N₂O (óxido nitroso). Por outro lado uma agricultura bem gerenciada pode ser uma solução para inúmeros problemas ambientais. (RAL et al., 2017).

Para melhores resultados o cultivo de algumas espécies e utilização de sistemas de cultivo de baixa emissão de carbono podem ser usados para o sequestro do carbono da atmosfera e incorporação em sua biomassa. Veiga et al. (2000) apresenta resultados entre as culturas perenes, e a palma de óleo, em termos de absorção de CO₂, fica atrás em potencial apenas do eucalipto (*Eucalyptus* sp.) aproximando seus valores aos de florestas temperadas.

Nesse quesito o Brasil vem demonstrando capacidade de crescimento e modernização no agronegócio, que atualmente se apresenta como setor estratégico na economia, representando 23% do PIB nacional (CEPEA, 2015).

O Brasil investe em diferentes ações e estratégias que incentivem a expansão de áreas florestadas plantadas bem como a conservação das já existentes. Em 2010 foi criado o Plano Setorial para consolidação de uma economia de Baixa Emissão de carbono na Agricultura (plano ABC) com o intuito de mitigar a emissão dos gases de efeito estufa (GEE) por meio da agricultura. Esse plano é baseado em sete programas setoriais como, a recuperação de pastagens degradadas; Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF); Sistema de plantio direto (SPD). Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN); Florestas plantadas; Tratamento de dejetos de animais e adaptação à mudança do clima.

1.3 O ciclo do carbono do ecossistema terrestre

Os quatro principais compartimentos de carbono na Terra são: oceanos, atmosfera, formações geológicas contendo carbono fóssil e mineral e ecossistemas terrestres (biota + solo). O carbono das formações geológicas consiste de 4000 Pg C presentes no carvão, 500 Pg C no petróleo e 500 Pg C no gás natural. O compartimento de carbono do solo (2500 Pg C) é o maior nos ecossistemas terrestres (aproximadamente 4 vezes o compartimento de C da vegetação e 3,3 vezes o carbono da atmosfera) e é constituído pelo carbono orgânico (1500 Pg C) e mineral (1000 Pg C). O carbono orgânico representa o equilíbrio entre o carbono adicionado ao solo pela vegetação e o perdido para as águas profundas e, finalmente, para os oceanos via lixiviação como carbono orgânico dissolvido (0,4 Pg C) ou para a atmosfera via atividade microbiana como dióxido de carbono em solos aerados ou metano em solos saturados com água. Entretanto, pouco se sabe sobre valores precisos de perdas de carbono do solo para a atmosfera (MACHADO, 2005).

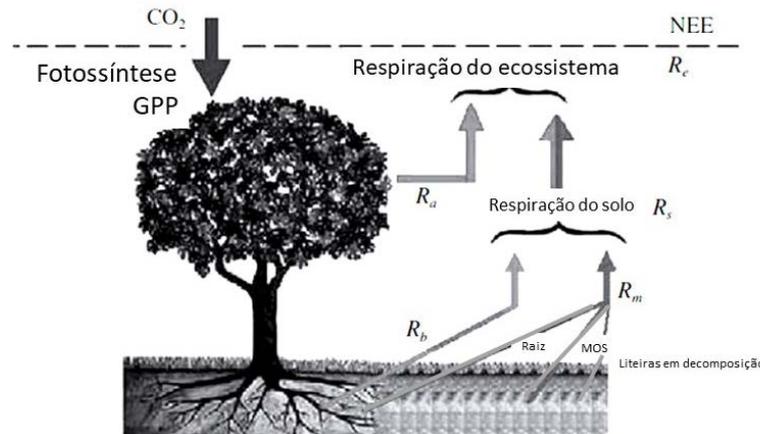
O Ciclo biogeoquímico do carbono flui entre a atmosfera, oceanos, sedimentos e ecossistemas terrestres (biomassa + solo). No seu ciclo geoquímico, as moléculas de CO₂ da atmosfera são dissolvidas nos oceanos na forma de carbonatos e são lentamente depositadas como sedimentos, retornando naturalmente à atmosfera somente com a movimentação de placas tectônicas, no processo de subducção, levando um tempo médio de 400 milhões de anos. O carbono atmosférico pode ainda ser absorvido por plantas e algas pela fotossíntese, entrando no ciclo biológico do C, no qual o tempo de ciclagem é bem menor 100-1.000 anos (WATSON et al., 2001).

A concentração de CO₂ na atmosfera é a resultante do balanço entre fontes e sumidouros nos ecossistemas terrestres, nos oceanos e na litosfera. As rochas sedimentares representam o maior reservatório de carbono no Planeta, sendo estimado em 66 bilhões de gigatons de C. As trocas entre a atmosfera e esse imenso reservatório ocorrem lentamente, com taxas anuais extremamente baixas. Uma vez na atmosfera, o CO₂ pode ser incorporado aos ecossistemas terrestres, principalmente pela fotossíntese, e aos oceanos, pela fotossíntese e dissolução na forma de carbonatos (WIGLEY; SCHIMEL, 2000).

Nos ecossistemas terrestres, o CO₂ fixado pela vegetação é parcialmente consumido pela respiração dos próprios autotróficos e entra como a fonte básica de energia para os demais sistemas heterotróficos, sendo consumido pela respiração dos mesmos em diferentes níveis tróficos e, finalmente, por processos de decomposição. Parte desse carbono acumula-se no solo, na forma de matéria orgânica do solo (MOS). A MOS é também decomposta, mas em taxas mais lentas, fazendo com que esta seja um importante reservatório de carbono nos sistemas terrestres. Calcula-se que os solos armazenam quatro vezes mais carbono que a vegetação (WATSON et al., 2000). O tempo de permanência do carbono nesses reservatórios terrestres varia entre dias a alguns poucos milhares de anos (WIGLEY; SCHIMEL, 2000).

Vale ressaltar que as emissões de CO₂ do solo na emissão de GEE na agricultura provém da respiração das raízes das plantas e da atividade microbiana de decomposição, representando, portanto, o carbono que está ciclando no ambiente (Figura 1). Assim, o balanço de carbono em diferentes usos ou condições de manejo deve ser feito em estudos de longo prazo, considerando a variação nos estoques desse elemento no solo ao longo do tempo.

Figura 1- Diagrama esquemático dos processos do carbono em ecossistemas. Ra corresponde a respiração autotrófica das folhas, Rb das raízes da árvore, Rm é somatório das respirações das raízes das plantas rasteiras, da MOS – matéria orgânica do solo e da liteiras em decomposição.



Fonte: Traduzido de Luo e Zhuo (2006).

Durante a decomposição de detritos orgânicos depositados sobre o solo, a maioria do carbono volta para a atmosfera como CO_2 , porém uma proporção não decomposta fica armazenada no solo, tomando a serapilheira e o húmus, importantes componentes para o sequestro do carbono à longo prazo (DIAS-FILHO, 2006).

1.3.1 Efluxo de CO_2 do solo na agricultura

Métodos de Medições e Estimativas

A saída do gás carbônico para a atmosfera, resultante desses vários processos que ocorrem na serapilheira, na superfície e nas camadas mais profundas do solo, é chamada de efluxo de CO_2 e pode ser medida por métodos de covariância de vórtices turbulentos, por uso de infravermelho (IRGAs) em câmaras fechadas (DAVIDSON et al., 2002), ou ainda por métodos químicos baseados na absorção de CO_2 usando solução alcalina. Mas, devido à variedade espacial e temporal intrínseca à respiração do solo e a fatores ambientais é difícil atingir um valor preciso associado ao método empregado.

Luo e Zhuo (2006) explicam que o método de câmara dinâmica fechada com leitor de infravermelho consiste na utilização de uma câmara para cobrir uma área da superfície do solo enquanto isso, permite que o ar circule em um loop entre a câmara e um sensor de detecção de CO_2 (IRGA) durante as medições. Quando a câmara fechada cobre a superfície do solo, a concentração de CO_2 na câmara aumenta devido à liberação de CO_2 sob a superfície do solo. A taxa de aumento de CO_2 é proporcional ao efluxo de CO_2 do solo. Para determinar

a taxa de respiração, geralmente usamos um IRGA para medir o aumento de concentração de CO₂ da câmara ao longo do tempo. Com dois valores de concentração de CO₂ medido nos pontos inicial e final, respectivamente, durante um curto período de tempo, o incremento na quantidade de CO₂ na câmara pode ser usado para estimar a taxa de efluxo de CO₂ do solo.

1.3.2 Principais fatores ambientais controladores do efluxo de CO₂

Ghaha (2010) apontam o efluxo como um processo físico de liberação do CO₂ para atmosfera onde tal processo está ligado a fatores como temperatura, umidade do solo, textura do solo, deposição de serapilheira, biomassa radicular e atividade microbiológica. Ambos fatores intrinsecamente ligados a cobertura e uso do solo.

Temperatura e Umidade

A temperatura do solo tem influência no crescimento das plantas dado ao seu efeito na atividade fisiológica e de uma forma indireta na disponibilidade de nutrientes do solo.

A temperatura é influenciada por uma série de fatores, como as condições meteorológicas, topografia local, tipo de solo, teor de água, textura, área de superfície coberta e copa das plantas. Assim como pode ser afetada pela irrigação, usada além de suprir a necessidade de água das plantas para modificar o comportamento térmico do solo.

Graham, Lam e Yuen (2013) descrevem as influências diárias e anuais da temperatura do solo nos processos biológicos e químicos do solo nas taxas de decomposição e de mineração da matéria orgânica e conseqüentemente da liberação de CO₂ relatando a sua influência na respiração do solo, particularmente em florestas naturais.

Sotta et al. (2004) relatam que as variações de temperatura são relativamente pequenas. No caso especial de solos de floresta tropical em que as variações são baixas este fator não explica a grande variação de fluxo de CO₂. Por outro lado, onde a umidade do solo apresenta maior variação, tem sido indicada como um dos mais importantes fatores para definir o ritmo da atividade biológica, e portanto determinante do fluxo de CO₂.

A umidade do solo exerce grande influência nas emissões de CO₂. A umidade do solo pode tanto favorecer como inibir a produção de CO₂.

Luo e Zhuo (2006) descrevem a umidade do solo como um fator importante que influencia na respiração do solo podendo tornar o efluxo de CO₂ baixo em condições secas e ou até atingir uma taxa máxima em níveis intermediários de umidade do solo por outro lado

pode diminuir com alto teor de umidade do solo quando prevalecem condições anaeróbicas. Esses mesmos autores apontam que o teor ideal de água é geralmente em algum lugar perto da capacidade de campo, onde os espaços macroporos são principalmente preenchidos com ar, facilitando a difusão de O_2 , e os espaços microporos são principalmente preenchidos com água, facilitando assim a difusão de substratos solúveis.

Em condições de alta umidade do solo, os efeitos da água do solo na respiração são regulados

principalmente pela concentração de oxigênio. Embora estudos de laboratório sugiram a taxa máxima de respiração do solo com o teor ideal de água no solo muitas das observações em campo sugerem que a umidade do solo limita o efluxo de CO_2 do solo apenas nos níveis mais baixo e mais alto (LIU et al., 2002; XU; BALDOCCHI; TANG et al., 2004).

1.3.3 Atmosfera do solo e o transporte de gás no solo

A fração gasosa do solo é constituída do ar do solo ou da atmosfera do solo. Sua composição química é semelhante à da atmosfera livre, junto à superfície do solo. Apresentando diferenças nos teores de O_2 e CO_2 . O oxigênio é consumido por microrganismos e pelo sistema radicular das plantas superiores tornando sua concentração menor em relação à atmosfera livre. Ao contrário, o CO_2 é liberado em processos metabólicos que ocorrem no solo e por isso seu teor em geral é mais alto. O ar do solo ocupa o espaço poroso não preenchido pela água (REICHARDT; TIMM, 2012).

O estudo físico-analítico dos processos de transferência de gases no solo é bastante complicado. Além da atmosfera superior de concentração praticamente constante há no solo “fontes” e “sumidouros” de CO_2 , O_2 , NH_4 , N_2 , SO_2 e uma série de compostos orgânicos voláteis. A renovação do O_2 no solo vem da atmosfera superior por difusão, em solução com água ou por fluxo de massa. Quando chove, a entrada de água no espaço poroso do solo expulsa dele certa quantidade de ar e durante a evaporação ou drenagem do solo o ar é reposto por fluxo de massa, esse por sua vez induzido por diferença de temperatura que provocam correntes de convecção e estabelecem diferenças de pressão. Contudo, acredita-se que a difusão seja o principal processo responsável pela transferência de gases do solo. (REICHARDT ; TIMM, 2012).

1.4 Variabilidade espacial e temporal do efluxo de CO₂ do solo

A variação diária do efluxo de CO₂ é determinada a partir de medidas de 24 horas para uma melhor observação do intercâmbio que ocorre nos processos de fotossíntese e respiração. Onde, o consumo de CO₂ pelas plantas vivas é equilibrado por uma correspondente produção de CO₂ durante a respiração das próprias plantas, e da degradação da matéria orgânica, que ocorre principalmente no solo através da atividade de bactérias (respiração do solo).

A variação sazonal em geral é determinada por observações mensais para obtenção de comportamento do sistema ao longo das estações do ano. Apresentando o resultado das variações sazonais como o resultado da fotossíntese realizada pelas plantas terrestres no verão, e respiração de plantas e solos ao longo do ano.

1.5 Objetivos da pesquisa

Objetivo geral: Avaliar e quantificar as emissões de CO₂ no solo em cultivo de palma de óleo com HIE e em área de iLPF no leste da Amazônia.

Objetivos específicos:

- Caracterizar a variação sazonal do efluxo de CO₂ no monocultivo com palma de óleo;
- Caracterizar a variação sazonal do efluxo de CO₂ do solo no sistema ILPF;
- Comparar as relações entre temperatura e umidade do solo com o efluxo de CO₂ do solo;
- Entendimento de como o efluxo de CO₂ do solo se comportam em relação a diferentes formas de uso da terra.

1.6 Hipóteses

1.6.1 Em relação à emissão de CO₂ em plantio de palma de óleo, formula-se a hipótese:

H0: Área de monocultivo de palma é homogênea espacialmente em relação ao EFCO₂

H1: Área de monocultivo de palma não homogênea espacialmente em relação ao EFCO₂, apresentando variação espacial.

1.6.2 Em relação a plantios de baixa emissão de carbono (ex.: ILPF)

H0: As árvores apresentam maior emissão de CO₂ do solo em sistemas ILPF (Integração Lavoura Pecuária Floresta)

H1: O pasto apresenta maior emissão de CO₂ do solo em sistemas ILPF (Integração Lavoura Pecuária Floresta)

1.6.3 O tipo de uso do solo associado à resíduos culturais regula as emissões de CO₂ e a mudança de estoque de carbono no solo.

H0: Quanto maior for a quantidade de resíduos cultural maiores os estoques de carbono e menores as emissões de CO₂.

H1: Quanto maior for a quantidade de resíduos cultural maiores os estoques de carbono e maiores as emissões de CO₂.

1.7 Estrutura da tese

Os resultados obtidos com a tese serão apresentados em capítulos e serão discutidos da seguinte forma: Sendo o primeiro uma introdução geral de forma a colocar o leitor a par da temática a ser abordando de forma breve o tema proposto. O segundo, Caracterização espaço-temporal do efluxo de CO₂ em cultivo de palma de óleo com híbridos interespecíficos (*Elaeis guineenses x Elaeis oleífera*) no leste da Amazônia, traz valores de efluxo de CO₂ do solo no cultivo de palma de óleo durante um ano e meio de amostragem e mudanças no manejo no período de observações. No capítulo 3, Árvores modificam a dinâmica de efluxo de CO₂ do solo em sistemas de integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF) no leste da Amazônia, as coletas foram realizadas durante cinco meses no período chuvoso amazônico, com o fim de analisar as variáveis físicas que atuam nos processos de emissão de CO₂ do solo e a influência espacial nesse tipo de uso do solo. O quarto, Variação diária de efluxo de CO₂ em área de Integração Lavoura Pecuária Floresta (ILPF) com teca (*Tectona grandis L. f.*) e mogno africano (*Khaya ivorensis*), trata de um experimento realizado em área de ILPF pertencente à Embrapa Amazônia Oriental, no campo experimental de Terra Alta – PA, durante períodos chuvoso durante o ano de 2019 com o objetivo de compreender as interações biofísicas entre atmosfera e vegetação de um sistema integrado (ILPF) na Amazônia. No quarto e último capítulo, considero integrador, são feitas considerações finais e as conclusões obtidas nos capítulos dois, três e quatro, onde também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2 CARACTERIZAÇÃO ESPAÇO TEMPORAL DO EFLUXO DE CO₂ EM CULTIVO DE PALMA DE ÓLEO COM HÍBRIDOS INTERESPECÍFICOS (*Elaeis guineenses* x *E. oleífera*) NO LESTE DA AMAZÔNIA

Emanuelly Melo de Oliveira Mendes; Alessandro Carioca de Araújo;

RESUMO

O óleo de palma possui grande potencial para a produção de biocombustível renovável por existir um balanço de carbono apontado por alguns estudos como positivo, entre o que se emite com uso desse combustível e o dióxido de carbono capturado no processo de fotossíntese. O objetivo desse trabalho foi investigar a distribuição espacial do efluxo de CO₂ (EFCO₂), temperatura e umidade do solo (Ts e Us, respectivamente) em área de cultivo de palma de óleo (*Elaeis guineenses* Jacq.) no leste da Amazônia. Em pontos do cultivo como base da planta, empilhamento de folhas e carreador. Foram amostrados 24 pontos em quatro sub-parcelas ao longo de 18 meses. Após a etapa de coleta dos dados do EFCO₂, Ts e Us, foi realizada análise de variância de dois fatores, onde foi possível observar a variabilidade espacial ao longo do tempo na área amostrada. Para efeito de análise de dependência do EFCO₂ com a Ts e a Us foi realizada regressão múltipla e correlação linear de Pearson sendo observada dependência do EFCO₂ com a Ts durante o período menos chuvoso. Os resultados indicaram diferença entre os pontos observados. As menores médias de efluxo de CO₂ foram observadas nos pontos com menor quantidade de material vegetal em ambos períodos amostrados (chuvoso e menos chuva). Foi observada dependência espacial no monocultivo de palma de óleo. O EFCO₂ no ponto de empilhamento de folhas foi superior com 4,648 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ durante o período chuvoso e 4,236 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ no período menos chuvoso comparado a base da planta (4,18 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, chuvoso e 3,737 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, menos chuvoso) e o carreador (3,01 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$, chuvoso e 2,801 no menos chuvoso), embora não tenha havido diferença estatística entre a base da planta e o empilhamento, na maioria dos meses amostrados em ambos períodos. As menores médias ocorreram no período menos chuvoso e as maiores no período chuvoso.

Palavras-chave: Palma de óleo. Sistema de manejo. Efluxo de CO₂, variabilidade espacial.

ABSTRACT

Palm oil has great potential for the production of renewable biofuel because there is a carbon balance pointed out by some studies as positive, between what is emitted with the use of this

fuel and the carbon dioxide captured in the process of photosynthesis. The objective of this work was to investigate the spatial distribution of CO₂ efflux (EFCO₂), temperature and soil moisture (Ts and Us, respectively) in an oil palm cultivation area (*Elaeis guineenses* Jacq.) In eastern Amazonia. At points of cultivation as a base of the plant, stacking leaves and carrier. 24 points were sampled in four sub-plots over 18 months. After the EFCO₂, Ts and Us data collection stage, two-way analysis of variance was performed, where it was possible to observe spatial variability over time in the sampled area. For the purpose of analyzing EFCO₂ dependence with Ts and Us, multiple regression and Pearson's linear correlation were performed, with EFCO₂ dependence on Ts during the less rainy period. The results indicated a difference between the points observed. The lowest CO₂ efflux averages were observed in the points with the lowest amount of plant material in both sampled periods (rainy and less rainy). Spatial dependence was observed in the oil palm monoculture. EFCO₂ at the leaf stacking point was higher with 4,648 $\mu\text{mol } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ during the rainy season and 4,236 $\mu\text{mol } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ in the less rainy period compared to the plant base (4.18 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, rainy and 3.737 $\mu\text{mol } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, less rainy) and the carrier (3.01 $\mu\text{mol } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, rainy and 2.801 in less rainy), although there was no statistical difference between the base of the plant and stacking, in most months sampled in both periods. The lowest averages occurred in the least rainy season and the highest in the rainy season.

Key words: Palm oil. Management system. CO₂ Efflux.

1. INTRODUÇÃO

Os gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, em especial o dióxido de carbono (CO₂), têm aumentado sua concentração na atmosfera, devido à queima de combustíveis fósseis e à conversão de florestas tropicais em terras agrícolas tais efeitos na atualidade foram identificadas por Field et al. (2014) como a causa das mudanças climáticas globais. No campo a atividade agrícola é apontada por Stockmann et al. (2013) como a responsável pela maioria das emissões de CO₂ originárias do solo, considerado também como o maior reservatório de carbono (~2344 PgC) na biosfera terrestre.

Nesse campo a respiração do solo é considerada um indicador do metabolismo de ecossistemas podendo ser o maior componente da respiração dentro dele. Luo e Zhou (2006) comentam que a respiração do solo não pode mais ser apenas uma questão acadêmica, mas como uma questão relevante para agricultores, silvicultores e funcionários governamentais já que, as emissões e absorção de carbono fotossintético podem ser usadas para maximização de armazenamento de carbono.

Embora os estoques de carbono do solo de florestas e sistemas de manejo de cultivos em regiões tropicais sejam frequentemente estudados, ainda há incertezas sobre o tamanho e os fatores que controlam as perdas de carbono e como as práticas agrícolas poderiam mitigar as emissões de CO₂ do solo nesses ecossistemas. Vários fatores podem influenciar profundamente a respiração do solo, como a qualidade do solo, deposição de nitrogênio, condição climática e ações antrópicas (DAVIDSON; JANSSENS, 2006). Vincent et al. (2006) relatam que entre os diversos fatores bióticos e abióticos que controlam o efluxo de CO₂ do solo (EFCO₂), geralmente a disponibilidade de água e a temperatura do solo são os principais controladores.

Entre esses fatores, a mudança climática, particularmente o aquecimento global, tem sido sugerida como a principal causa da aceleração da perda global de carbono no solo (JONES et al., 2003). Cox et al. (2000) dizem que o aumento na respiração do solo em resposta ao aumento da temperatura poderá fornecer um feedback positivo para o aquecimento global. Peng et al. (2009) ao sintetizarem 52 artigos publicados relata como nos últimos anos a importância da compreensão da sensibilidade da respiração do solo à mudança de temperatura e seus fatores de impacto como resposta do balanço de carbono terrestre às mudanças climáticas futuras têm recebido atenção.

No Brasil, segundo Ramalho Filho et al. (2010) há mais de 30 milhões de hectares

zoneados em áreas desflorestadas aptos ao cultivo do dendezeiro. Na Amazônia são sugeridas algumas alternativas as áreas desmatadas uma delas comentada por Homma (2010) como a adoção de plantios de cultivos perenes compartilhada por Veiga, Smit e Fúria (2000) que acrescenta que a palma de óleo, como planta perene de porte arbóreo, apresenta um potencial considerável para imobilização de carbono atmosférico, perdendo apenas para o eucalipto.

Corley (2009) relata que em 2050 o consumo alimentar será de 240 milhões de toneladas de óleo vegetal. Além da crescente demanda mundial por biocombustíveis. A palma de óleo tem sido apontada como uma das oleaginosas com potencial mais viável à produção de biodiesel no Brasil (FRAZÃO et al., 2013) e ainda ser fonte mundial de óleo vegetal saudável e de baixo custo para uso em aditivos alimentares e em uma multiplicidade de produtos alimentares cada vez mais consumidos em todo o mundo (JARDINE et al., 2016). É despertado o interesse pelo entendimento do cultivo intensivo e seu efeito no EFCO₂ do solo.

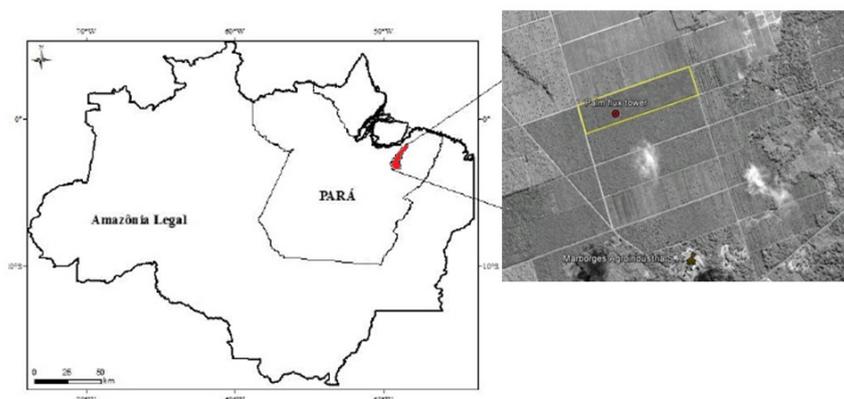
Nesse contexto o presente trabalho objetivou caracterizar a influência de fatores físicos como a temperatura do ar (Tar), Temperatura do solo (Ts), precipitação e da umidade gravimétrica do solo (%) no EFCO₂ em palma de óleo em três pontos de monitoramento em área de monocultivo, durante os meses de maio de 2016 a janeiro de 2018.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área do experimento

O presente estudo foi desenvolvido em uma área com quarenta e dois híbridos de cruzamentos diferentes, instalados pelo Pró Dendê em fevereiro de 2007, em sistema de replantio com elevada incidência de AF, na empresa Marborges Agroindústria S.A., localizada no município de Moju (Figura 1), mais especificamente na vila de Bacuriteua, Moju, do Pará (Latitude 01° 58'43.22" S e Longitude 48°36'52.36" W). Os solos existentes no município são classificados como Latossolo Amarelo, distrófico, textura média (MUNIZ et al.,2012). O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, pertence à categoria climática mesotérmico e úmido, do tipo *Af*, com temperatura média anual em torno de 25°C. Na área do experimento estão os únicos ensaios de competição de HIE (*E. guineensis* x *E. oleifera*) em área de incidência de AF no Brasil. Na área as plantas foram dispostas na forma de triângulo equilátero, com espaçamento de 9 x 9 x 9 m e densidade de plantio igual a 143 plantas por hectare (Figura 3). A área onde o experimento foi instalado possui 5,84 hectares pertencentes a parcela C22 onde há 806 indivíduos plantados desde 2007. Para a amostragem desse estudo foram utilizadas quatro parcelas com 869 m² distribuídas aleatoriamente em blocos com quatro repetições. Cada parcela com doze plantas onde duas plantas centrais foram escolhidas para avaliações (sendo divididas em duas sub-parcelas) e as outras dez serviram como bordadura. A escolha dessa área deveu-se a possibilidade de obtenção de maiores informações sobre a interação desse monocultivo com HIE em relação ao solo e a atmosfera.

Figura 1 - Local do experimento Moju-Pa, Brasil.

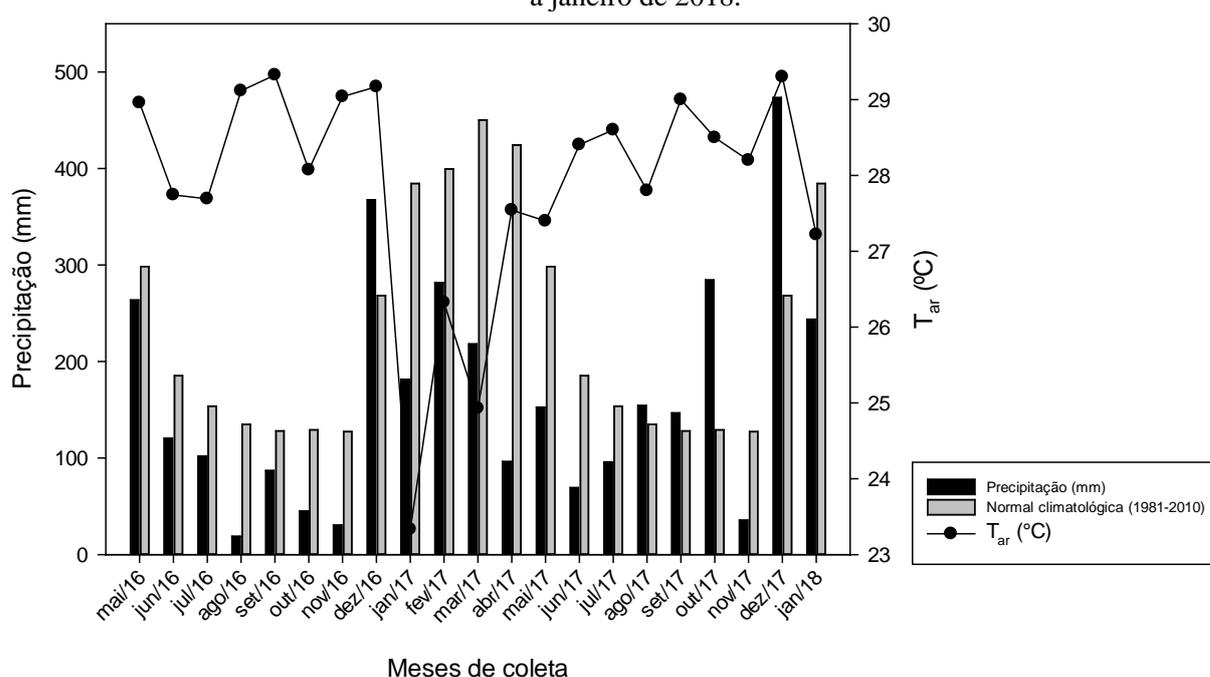


2.2 Variáveis meteorológicas

Os dados de temperatura média mensal do ar e precipitação acumulada foram obtidos por meio de uma torre de observações micrometeorológicas, de estrutura metálica com 25 m de altura, mantida na área do experimento (Figura 2).

A Temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) foi adquirida através de termohigrômetros (HCS213, Campbell Scientific Inc., Logan, UT, EUA), instalados à 22,7; 15,94; 10,4; 6,74; e 2,25 metros a partir da superfície, e registradas em microcontrolador eletrônico (CR1000, Campbell Scientific Inc.) a intervalos de 1 minuto, sendo os mesmos também armazenados em cartões de memória. Coletados e descarregados quinzenalmente e a precipitação acumulada através do pluviômetro (TB4, Campbell) instalado a 25 metros de altura, no topo da torre.

Figura 2 - Precipitação acumulada (mm) e temperatura média diária mensal do ar ($^{\circ}\text{C}$) em área de monocultivo de híbridos de palma de óleo no período de maio de 2016 a janeiro de 2018.



2.3 Efluxo de CO_2 e temperatura do solo

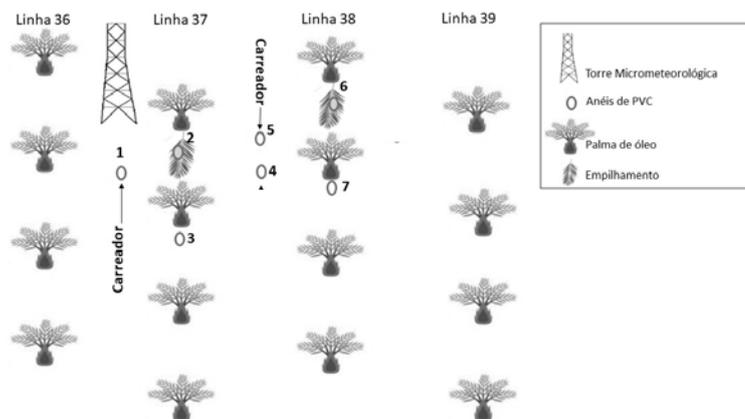
As medições do efluxo de CO_2 do solo foram realizadas mensalmente durante o período de maio de 2016 à janeiro de 2018 com a utilização de um analisador portátil de gás por infravermelho IRGA - (EGM-4, PP Systems, Massachusetts, USA) conectado a uma câmara de respiração do solo (SRC-1, PP Systems, Massachusetts, USA). Em cada ponto

amostral foi inserido um tubo de PVC com dimensões de 0,1 x 0,05 m para promover um selo entre a câmara de respiração do solo e o solo. Onde foi estimado o EFCO₂.

As medidas foram realizadas em 24 anéis de PVC (cloreto de polivinil) com 10 cm de diâmetro e 8,5 cm de altura, inseridos cerca de 2 cm no solo com oito pontos representando cada um dos três pontos observados na área (base da planta; carreador, local por onde a carroça com traçado animal realiza a colheita dos frutos; e empilhamento, local aonde as folhas são amontoadas após a colheitas dos cachos)

Para aferição da temperatura do solo (Ts) foi utilizado um termômetro acoplado ao EGM-4 e inserido à uma profundidade de 0,05 metros.

Figura 3 - Localização dos anéis na sub parcela 1 de 4 em área de monocultivo de híbridos de palma de óleo.



Fonte: A autora.

2.3.1 Cálculos de Respiração do solo

$$Rs = \frac{\Delta C}{\Delta T} \cdot \frac{P}{1000} \cdot \frac{273}{T+273} \cdot \frac{44,01}{22,01} \cdot \frac{Vd}{A} \quad (1)$$

Para o cálculo de efluxo de CO₂ do solo foram utilizadas as variáveis da equação 1 baseada na fórmula utilizada por Metcalfe et al. (2007) para estimar a respiração total do solo (g. m⁻².h⁻¹ e posteriormente convertê-la para μmol.m⁻².s⁻¹. Todos os valores de P (Pressão atmosférica) e T (Temperatura do solo °C) foram obtidos pelo aparelho EGM-4. No entanto os valores de Vd (volume da câmara) foi obtido a partir da medição da altura e do valor do diâmetro do anel. A área (A) para efeito de cálculo foi padronizada em 0,007853 m². E os valores de ΔC (variação de CO₂) bem como os valores de ΔT (variação do tempo) foram obtidos pelo aparelho.

2.4 Umidade gravimétrica

Para obtenção da umidade gravimétrica foram coletadas em cada um dos 24 pontos três amostras compostas, com trado tipo copo à uma profundidade de 0,05 m. A coleta foi realizada em torno do anel e acondicionada em frascos herméticos logo após a medição do efluxo de CO₂. Para obtenção dos valores de massa úmida foram realizadas pesagens em balança de precisão e em seguida para obtenção da massa seca todas as amostras foram colocadas em estufa durante 48 horas à uma temperatura de 105°C (EMBRAPA, 1997) para posteriormente serem realizados os cálculos da equação 2.

$$H_2O(\%) = \frac{(m_{umida} - m_{seca})}{m_{seca}} * 100 \quad (2)$$

2.5 Análise dos dados

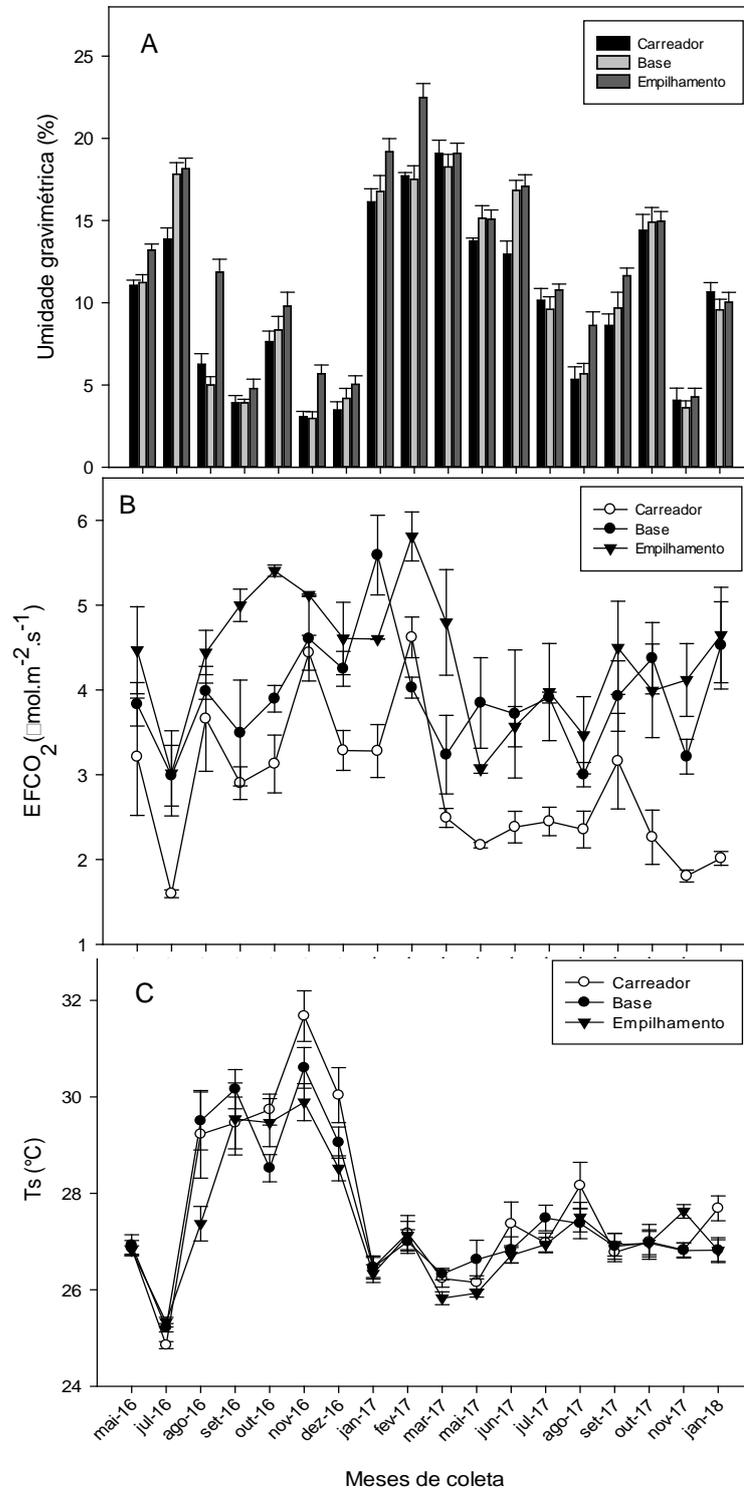
Os dados foram submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$) de dois critérios (two-way ANOVA) com auxílio do programa SigmaPlot 12.0 (SYSTAT Inc., San Jose, CA, EUA). Para testar o efeito de efluxo de CO₂ dos pontos observados ao longo do tempo e espaço para comparação das médias, foi aplicado o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). (Figura 5). Os dados foram submetidos a teste de normalidade e homogeneidade Shapiro Wilk ($P > 0,05$). Para descrever a relação da T_s e U_s com o EFCO₂ foi realizada regressão linear múltipla para o período menos chuvoso e chuvoso. Por meio da correlação linear de Pearson foi possível obter o quanto as variáveis ambientais influenciam no EFCO₂ e através de regressão linear foi gerado um modelo para os três pontos estudados nos dois períodos observados (chuvoso e menos chuvoso).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As coletas iniciaram no mês de maio de 2016 e podem ter sofrido influência do El Niño, fenômeno capaz de alterar o clima regional e global, que tende a inibir as chuvas na região amazônica ocorrido em 2015. Como é mostrada na figura 4C em relação à temperatura do solo durante os meses de agosto a novembro de 2016 foram observados os maiores valores de temperatura. As amostragens de efluxo foram realizadas entre as 08:30 às 10:30 horário que foram observadas incidências de radiação na base da planta. É possível observar que o carreador e a base da planta apresentam em sua maioria valores médios semelhantes de T_s .

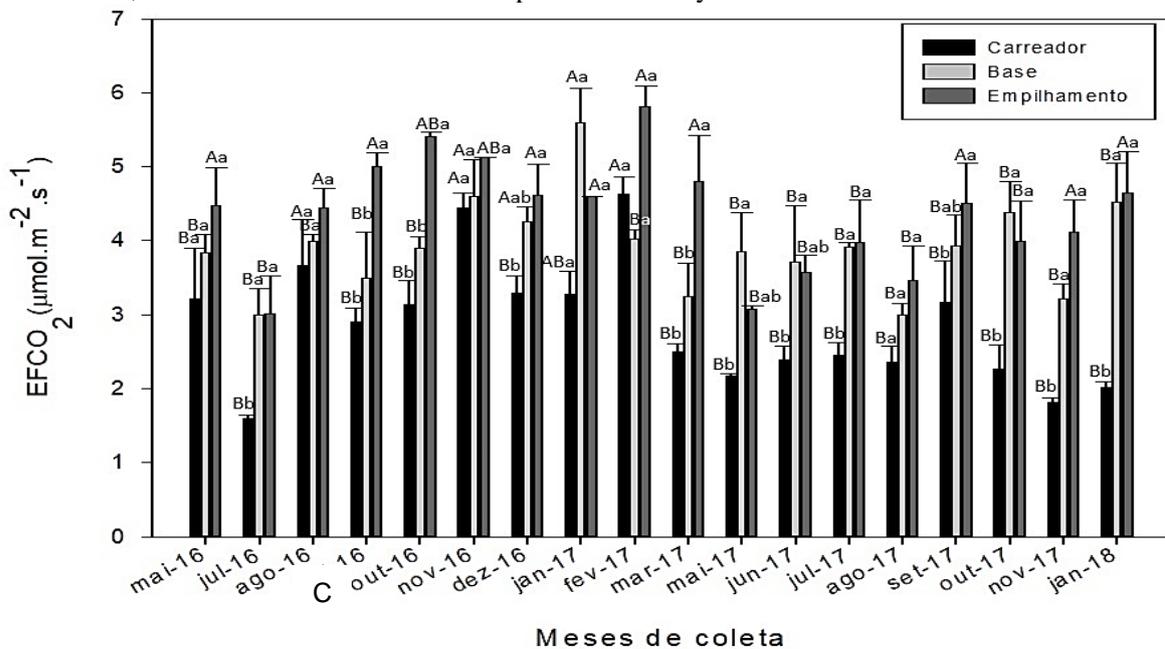
É notado um comportamento semelhante das curvas de temperatura do solo (T_s) (Figura 4C) em relação ao EF CO_2 (Figura 4B). Alguns autores relatam um aumento da difusividade do CO_2 sob temperaturas mais altas. A umidade do solo (U_s) foi maior no sistema com maior quantidade de material vegetal depositado (empilhamento) seguida da base da planta. O carreador por não ser sombreado e também devido a ausência de material vegetal ou outra barreira física acima do solo apresentou menores valores de U_s . Nesse mesmo ponto observado (carreador) foram apresentados os menores valores de efluxo para todas as coletas realizadas.

Figura 4 – Umidade gravimétrica do solo – Us (%) (A), efluxo de CO₂ (B) e Temperatura do solo - Ts (C) e \pm erros padrão em 3 pontos observados em área com monocultivo de palma de óleo.



Para análises espaciais e temporais os dados foram submetidos à análise de variância ($p \leq 0,05$) de dois critérios (*two-way ANOVA*) no programa SigmaPlot 12.0, para testar o efeito dos sistemas e das coletas no efluxo de CO_2 (Figura 5). Nessa análise foi possível observar que ao longo do tempo tomando como base os períodos chuvosos (dezembro a maio), e o período menos chuvoso (junho a novembro), conforme a distribuição definida por Verheye (2010), onde a precipitação abaixo de 150 mm/mês influencia ao déficit hídrico para a palma de óleo. Foi observada uma variação espacial na área estudada, onde o empilhamento é diferente dos outros dois pontos estudados, independente do período analisado.

Figura 5 - Análise de variância ($p \leq 0,05$) de dois critérios (*two-way ANOVA*) em monocultivo de palma de óleo com híbridos interespecíficos para efeito do efluxo de CO_2 ao longo do período de coletas e pontos observados. As barras correspondem a \pm o erro padrão. Médias seguidas de mesma letra maiúscula comparam as coletas para cada sistemas e letras minúsculas comparam os sistemas em cada coleta, mesma letra não difere entre si pelo teste Tukey 5%.



Davidson et al. (2000) em estudos com pastagens e florestas menciona que geralmente as taxas de respiração diminuem com um menor teor de água do solo à 0,10 m de profundidade. Efeito observado também nesse estudo, especialmente no carreador que durante os meses menos chuvosos apresentou menores valores em relação ao período chuvoso. Comeau et al. (2016) em estudos com palma de óleo na Indonésia concluíram que a precipitação é certamente um parâmetro que afeta a respiração do solo.

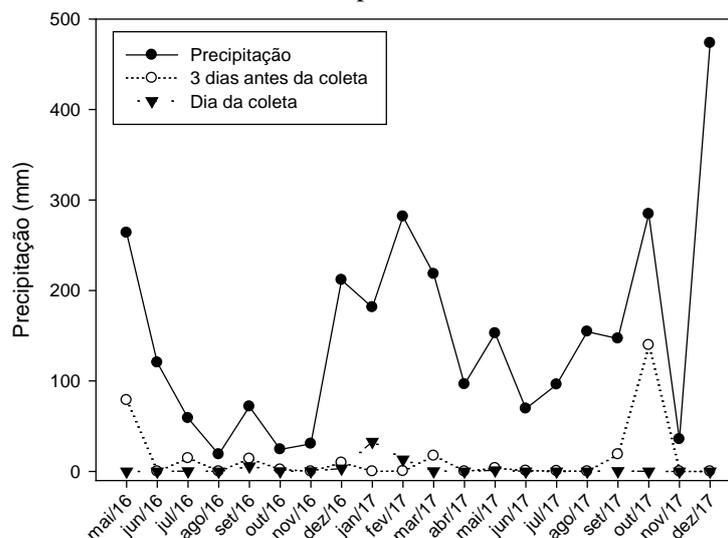
Entre os pontos observados de maio de 2016 até o mês de março de 2017 o empilhamento foi diferente dos outros pontos observados, durante este período o manejo da área foi igual aos anos anteriores. Após dez anos de cultivo o empilhamento que anteriormente era localizado foi alterado passando a ser disposto em toda a área do

experimento. Com isso nos meses subsequentes tomando como ponto de partida o mês maio de 2017 o empilhamento se assemelha a base da palma durante os meses menos chuvosos voltando a se diferenciar nos meses mais chuvosos. Tal efeito pode ser explicado pela bioquímica do solo, onde a escassez de água pode restringir a solubilidade de compostos orgânicos necessários ao metabolismo de microorganismos decompositores. Os solos devem possuir uma faixa ótima de umidade para a atividade de microorganismos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2006). Esse efeito é observado no período de transição e chuvoso quando a fonte de carbono (o material vegetal depositado - empilhamento) encontra os fatores físicos adequados para melhor decomposição pelos microorganismos.

Para os meses em que ocorreu aumento no volume de chuvas e, conseqüentemente, aumento no conteúdo de água no solo, o que ocorreu entre os meses de dezembro a maio, a temperatura média verificada no solo diminuiu. Todavia, a partir de março de 2017 ao contrário do que se esperava, a temperatura do solo foi menor em relação ao ano anterior. Efeito em resposta ao evento extremo (El Niño-Oscilação Sul - ENOS ocorrido em 2015 e sentido até meados de maio de 2016 na Amazônia).

Durante o período de coletas não houve evento de chuva (Figura 6), durante o mês de janeiro de 2017 o evento observado ocorreu após o período da coleta e não foi suficiente para chegada ao solo e assim comprometer a coleta. Ainda sobre a deposição de material vegetal no solo Novais et al. (2017) comentam que o conhecimento da dinâmica da serapilheira, produção ou aporte, acúmulo e decomposição, é o ponto de partida para a compreensão dos processos, que mantém grande parte dos fluxos de nutrientes no solo, que são altamente relacionados à produtividade primária, regulação do fluxo de energia nos ecossistemas, atividade biológica do solo e o grau de perturbação dos ecossistemas assim como, o padrão de distribuição espacial e temporal da serapilheira se constitui como um indicador eficiente da função dos ecossistemas com relação aos estoques e fontes de nutrientes, aspectos da estabilidade da vegetação e interação da vegetação ao clima. Além disso, a análise do aporte de serapilheira e o EFCO₂ permite em parte, determinar o papel do tipo de vegetação e o impacto das condições de estresse hídrico sobre a química, a física e a biologia do solo nesse ecossistema.

Figura 6 – Precipitação mensal e no dia da coleta em área de monocultivo de híbridos de óleo de palma .



É possível observar que a base da palma ao longo das coletas assemelhasse ao empilhamento durante o período chuvoso e no período seco ao ponto do carregador. Os maiores valores de EFCO₂ para o empilhamento (5,811 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e base (5,46 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$) foram encontrados nos meses mais chuvosos de 2017 (janeiro e fevereiro). Frazão et al. (2013) encontrou maiores estoques de carbono no solo sob as pilhas de frondes em relação às outras áreas de cultivo em áreas de monocultivo de dendzeiro. Nesse experimento em especial as pilhas estavam próximas à base da palma, caso diferente do avaliado nesse estudo. Silva, Santos e Batista (2010) relata que práticas que contribuem com a adição, ou remoção de material vegetal do solo, acarretam alterações na biomassa microbiana, as quais podem ser avaliadas pelos quantitativos de gás carbônico produzido.

Frazão et al. (2013) relatam que o carbono orgânico do solo é mais variável no espaço e no tempo nas plantações de dendê do que na maioria das outras culturas e que o sequestro de carbono é afetado pelo gerenciamento de culturas em relação à quantidade e qualidade de resíduos da cultura adicionados ao solo e a taxa de decomposição. Com isso podemos acrescentar que dependendo do manejo nessas áreas também é possível encontrar valores diferentes entre a base e a palma de óleo.

Em trabalhos desenvolvidos em áreas florestais foram observados efluxos entre 4 a 6 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por Metcalfe et al. (2007) e 4,12 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ por Zanchi et al. (2012). Já em outros casos como sistemas agroflorestais com dendzeiro o efluxo encontrado ficou em torno de 4,2 $\mu\text{mol CO}_2 \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, relatados por Silva et al. (2016), não diferentes e até menores em alguns casos relacionados aos encontrados nesse trabalho com híbridos de dendzeiro. (Tabela 1).

Tabela 1 - Efluxo de CO₂ do solo em outras áreas e experimentos.

Área	Localização	Estação	Método	Efluxo de CO ₂ do solo	Autor
Reserva Nacional de Caxiuanã	Nordeste do Pará, Brasil	Chuvosa	EGM-4	0,4 a 1 g CO ₂ m ² hr ⁻¹	Metcalf et al. (2007)
Reserva Biológica do Cuieiras (matas ciliares)	Norte de Manaus, Brasil	Chuvosa	LI-8100-101	0,66 g CO ₂ m ² hr ⁻¹	Zanchi et al. (2012)
SAF com dendê	Mesorregião do Nordeste Paraense e Microrregião Tomé-Açu.	Chuvosa	EGM-4	0,81 g CO ₂ m ² hr ⁻¹	Silva et al. (2016)
Monocultivo híbridos interespecíficos de dendê	com Moju/PA	Chuvosa	EGM-4	0,73 g CO ₂ m ² hr ⁻¹	Este estudo

A análise de regressão linear múltipla entre as medidas de EFCO₂ e as variáveis Ts e Us durante o período menos chuvoso foi útil para prever a variabilidade do EFCO₂, pois o vapor de p do teste f foi menor que 0,05. Nesse caso há evidências de que a Ts e a Us estão relacionadas com o EFCO₂. O coeficiente de correlação (r) igual a 0,58 durante o período menos chuvoso sugere uma relação linear positiva entre as variáveis, que tendem a variar no mesmo sentido. Além disso, o coeficiente de determinação (r²) foi equivalente a 0,33, o que explica 33% da variabilidade do EFCO₂ embora ainda sejam necessárias a inserção de outras variáveis para o aumento desta porcentagem. A equação obtida $y = -10,0253 + 0,462 \cdot Ts + 0,0803 \cdot Us$ torna possível a interpretação da influência dos dois fatores estudados. Onde, há o aumento de 0,462 $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ de EFCO₂ a cada 1°C aumentados na temperatura do solo desde que a Us permaneça constante, ou ainda, fazendo uso do fator de conversão usado por Pinto-Junior (2009) seria observado um aumento de 0,073 g. m⁻². hr⁻¹ e 1,756 g. m⁻².dia nas mesmas condições.

Para o período chuvoso o p do teste f foi >0,05 não sendo possível explicar a influência da Ts e Us na variabilidade de EFCO₂.

Para entender a relação das variáveis ambientais sob os pontos de coleta amostrados foram realizadas correlações de Pearson (Tabela 2). Onde o resultado encontrado foi o EFCO₂ correlacionado positivamente, de forma significativa (P<0,050), nos pontos de empilhamento e carreador com a temperatura do solo de forma moderada. Para o ponto de observação da base da planta a coeficiente encontrado foi fraco para a mesma variável ambiental.

Tabela 2 - Correlação de Pearson entre o EFCO₂ ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) variáveis ambientais umidade do solo (Us), temperatura do solo (Ts), precipitação (mm) e temperatura do ar (T_{ar}).

Tratamento		Us	Ts (°C)	Precipitação (mm)	T _{ar} (°C)
Base	EFCO ₂	0,0566* (p=0,824)	0,190* (p=0,451)	0,249* (p=0,320)	-0,298* (p=0,246)
	Us (%)	1	-0,763* (p=0,000228)	0,314* (p=0,204)	-0,640* (p=0,00564)
	Ts (°C)		1	-0,281* (p=0,259)	0,514* (p=0,0346)
	Precipitação (mm)			1	-0,217* (p=0,402)
	T _{ar} (°C)				1
Carreador	EFCO ₂	-0,114* (p=0,651)	0,574* (p=0,0127) [#]	0,0729* (p=0,774)	-0,000371* (p=0,999)
	Us (%)	1	-0,723* (p=0,000704)	0,375* (p=0,125)	-0,708* (p=0,00148)
	Ts (°C)		1	-0,197* (p=0,434)	0,463* (p=0,0612)
	Precipitação (mm)			1	-0,217* (p=0,402)
	T _{ar} (°C)				1
Empilhamento	EFCO ₂	-0,0834* (p=0,742)	0,570* (p=0,0136) [#]	0,141* (p=0,576)	-0,0980* (p=0,708)
	Us (%)	1	-0,728* (p=0,000612)	0,269* (p=0,281)	-0,663* (p=0,00373)
	Ts (°C)		1	-0,265* (p=0,287)	0,487* (p=0,0474)
	Precipitação (mm)			1	-0,217 (p=0,402) [#]
	T _{ar} (°C)				1

*Coeficiente de correlação linear de Pearson; [#]p<0,050

Luo e Zhuo (2006) comentam que o aumento da temperatura estimula a respiração microbiana e das plantas o que ocasiona a oxidação da matéria orgânica em solos mais quentes. Peng et al. (2009) também comentam a relação positiva do aumento de EFCO₂ com o aumento da Ts devido a alterações na respiração da raiz e nas taxas de decomposição da matéria orgânica. No caso do presente estudo, o ponto de coleta empilhamento possui grande deposição de folhas acima do solo e o aumento da temperatura em determinados períodos do ano auxiliariam a decomposição da matéria orgânica nesse ponto.

No histórico da área, informado pela empresa, a área de estudo era de floresta primária até os anos 70, com a mudança do uso da terra principalmente com a plantação da palma de

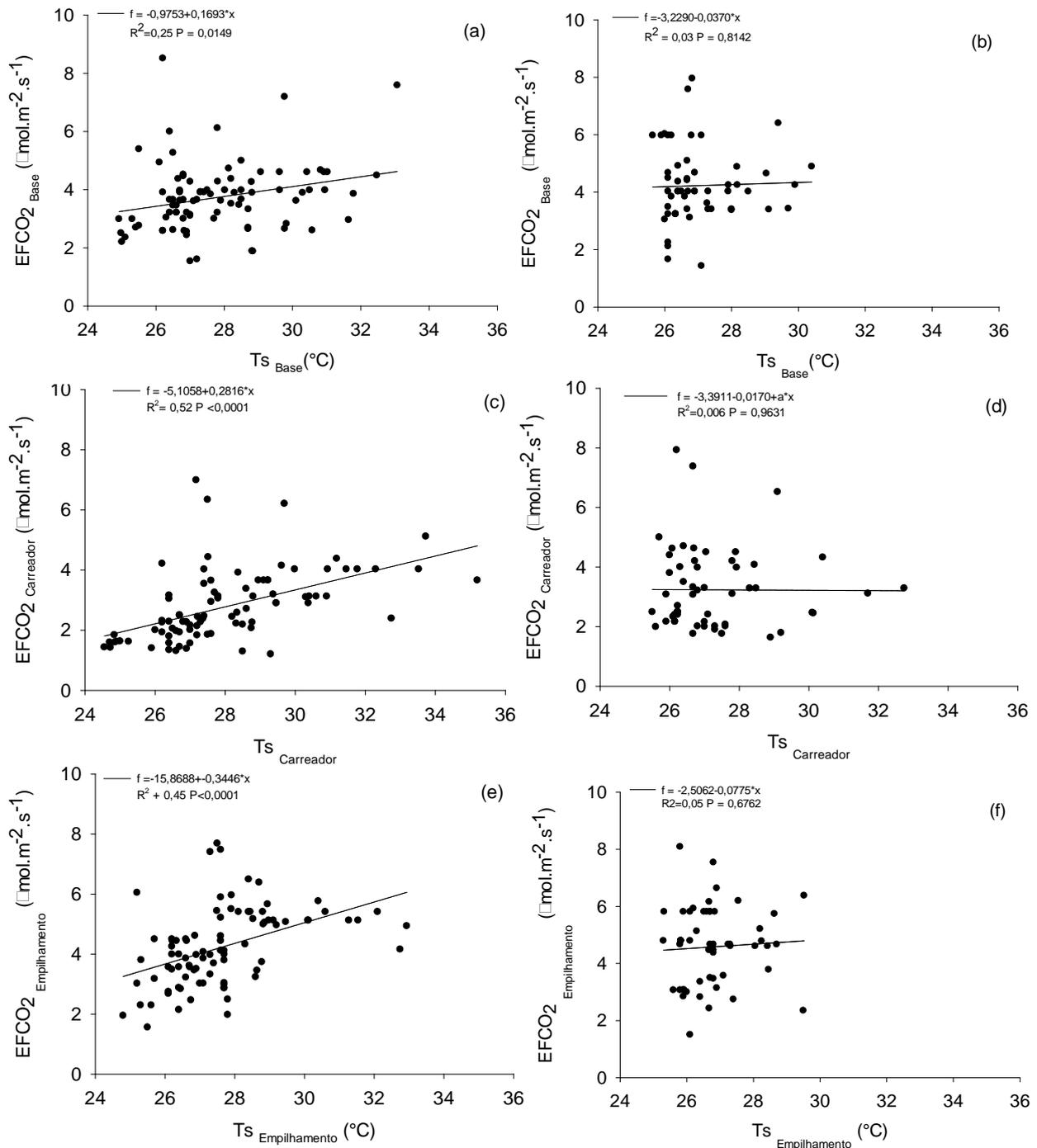
óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.), através do monocultivo, surgiram os primeiros focos do AF (Amarelecimento fatal), ocasionando a perda de uma grande área da plantação. Em 2000 ocorreu uma grande queimada nas plantações próximo a área de estudo sem uma causa definida, o que prejudicou a cultura necessitando aos poucos a retirada da plantação e substituição com os HIE (*Elaeis guineensis* Jacq. x *Elaeis oleifera* (H. B. K.) Cortés).

No ponto amostrado determinado como carreador havia o plantio anterior de *Elaeis guineensis* Jacq. o que faz um alerta para uma influência das raízes no local. Em estudo realizado na área (dados não publicados) nesse mesmo local os teores de carbono a 3,5 e 4 metros da planta (local onde é encontrado o carreador foram equivalentes ao da base da palma. Nesse caso específico a biomassa de raízes (não avaliada nesse estudo) poderia estar relacionada a correlação positiva nesse ponto amostrado.

A precipitação foi correlacionada negativamente com a Ts e Tar uma vez que a umidade e temperatura do solo se alteram simultaneamente (IAMAGUTI et al., 2015). Em relação aos pontos de observação foram observadas correlações muito fracas com o empilhamento e o carreador e fraca embora um pouco maior com a base da palma. Isso ocorre em razão da arquitetura da planta que conforme Squire (1984) é capaz de interceptar entre 10 e 13% da chuva.

No caso ainda da tabela 2 os pares de variáveis com coeficientes de correlação positivos e valores de P abaixo de 0,050 tendem a aumentar juntos. Para os pares com coeficientes de correlação negativos e valores P abaixo de 0,050 uma variável tende a diminuir enquanto a outra aumenta. Para pares com valores de P maiores que 0,050, não há relação significativa entre as variáveis. Após essa análise é observado que o EFCO₂ foi correlacionado negativamente com a umidade do solo no empilhamento e carreador e de forma positiva embora fraca com a base da palma.

Figura 7 - Painéis do lado esquerdo: regressão linear do EFCO₂ dos pontos de observação (a) – Base da palma de óleo (menos chuvoso); (b) – Base da palma (chuvoso); (c) – Carreador (menos chuvoso); (d) – Carreador (chuvoso); (e) – Empilhamento (menos chuvoso) e (f) – Empilhamento de folhas na área do plantio no monocultivo de palma de óleo *versus* a temperatura do solo (Ts) durante o período chuvoso.



Muitos estudos têm mostrado a taxa de respiração do solo, como um indicador de atividade microbológica do solo, aumentando exponencialmente ou linearmente com a temperatura (BEKKU et al., 2003), que consideraram que a produção do CO₂ dentro do solo é

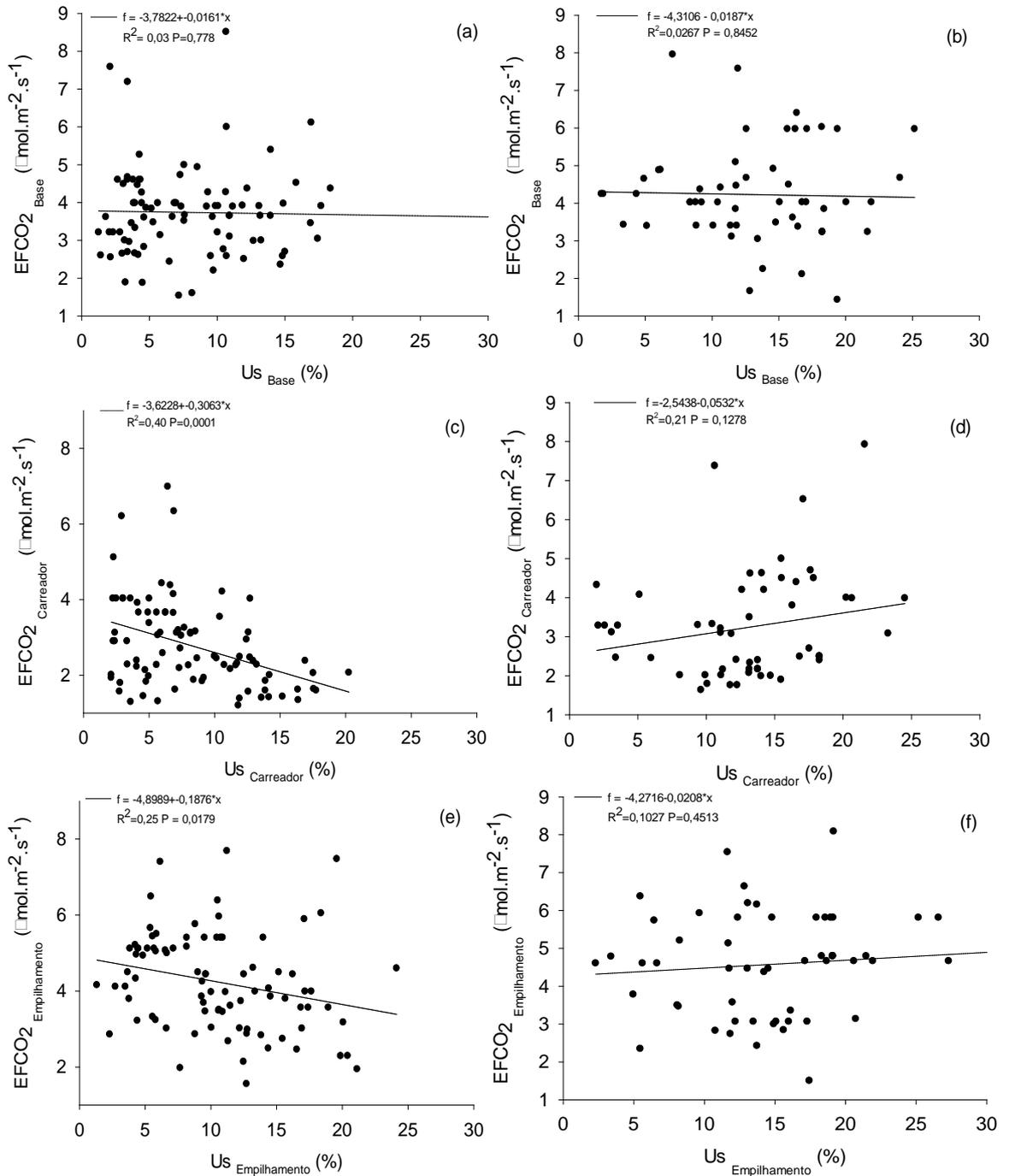
basicamente um processo bioquímico e responde assim fortemente às variações de temperatura, sendo que isto pode mudar com a idade da matéria orgânica, e também com a disponibilidade da água para as reações bioquímicas relevantes.

No caso do presente trabalho além da relação positiva da T_s foi observado que durante o período menos chuvoso houve uma relação positiva da temperatura em todos os pontos estudados (Figuras 7(a), 7(c) e 7(e)), diferente do período chuvoso onde não houve relação com temperatura do solo. Davidson et al. (2005) relata que a difusão de gases e solutos aumenta com o aumento da temperatura. Por outro lado, os solos também se tornam mais secos à medida que se tornam mais quentes, causando uma diminuição na taxa de difusão de substratos solúveis à medida que os filmes de água do solo se tornam mais finos. A difusão de enzimas extracelulares produzidas por micróbios para decompor a matéria orgânica e a difusão de carbono solúvel substratos que podem ser assimilados pelas células microbianas devem ocorrer dentro da fase líquida do solo.

Nas figuras 8 (b), 8 (d) e 8 (f) são encontrados os maiores valores de U_s e $EFCO_2$. Isso pode ocorrer dependendo do tipo de solo, podendo também ser explicado pelo teor médio de umidade do solo nos solos que segundo Merino, Pérez-Batallón e Macías (2004) pode limitar a difusão de O_2 no solo e, assim, a decomposição aeróbica de carbono orgânico. O contrário ocorreu nas figuras 8(a), 8(c) e 8(e) que durante o período menos chuvoso com condições de solos mais drenados apresentou uma relação negativa da U_s com os pontos amostrados. O R considerado baixo na base da palma em relação a U_s pode ser explicado nas figuras 9 (a) e 9 (b), pois a U_s disponível atua no desempenho de atividades metabólicas da espécie e na região apresentada nessas figuras há uma maior concentração de raízes potencialmente ativas como falado anteriormente.

Wu et al. (2010) relatam que quando há temperaturas mais altas do solo, é necessário um teor suficiente de umidade no solo para permitir e apoiar a difusão do substrato para os locais de atividade microbiana. No entanto, se os valores de umidade do solo excederem certos limiares que dependem das propriedades do solo, como porosidade, densidade aparente ou teor de carbono orgânico do solo a respiração microbiana do solo pode receber limitações de difusão devido ao O_2 .

Figura 8 - (a) – Base da palma de óleo (menos chuvoso); (b) – Base da palma (chuvoso); (c) – Carreador (menos chuvoso); (d) – Carreador (chuvoso); (e) – Empilhamento (menos chuvoso) e (f) – Empilhamento de folhas na área do plantio no monocultivo de palma de óleo versus a umidade do solo (Us) durante o período chuvoso.



Na Figura 8 nos gráfico (b), (d) e (f) é possível notar que o solo nos meses mais úmidos apresentou maior relação com o EFCO₂, segundo Zanchi et al. (2009), a maior taxa de respiração do solo observada na estação chuvosa na região amazônica, provavelmente, deve-se ao aumento da produtividade neste período, o que pode afetar positivamente a respiração

das raízes e os microrganismos do solo, que encontram condições favoráveis para a decomposição da matéria orgânica no período chuvoso.

A princípio foi imaginado que os maiores valores de umidade ocorreriam no empilhamento, uma vez que, o material vegetal depositado no solo permitindo a manutenção da umidade no solo por mais tempo assim como o observado por Campanha et al. (2007) em sistemas agroflorestais com café melhorou as características químicas e físicas do solo, diminuindo a erosão. A camada de folhas acima do solo funciona como um isolante térmico, contribuindo para a redução da evaporação e manutenção de um microclima estável na superfície do solo. Mas, em meses como os de novembro de 2017 e janeiro de 2018 foram observados semelhança entre os tratamentos em relação a umidade do solo (Figura 4). Costa et al. (2014) encontrou valores mais elevados de umidade do solo na superfície na floresta Nacional de Caxiuanã e mencionou que esse achado está relacionado às características da textura do solo dessa área, a qual se apresenta com alto teor de argila, tornando ineficiente a drenagem da água das chuvas. No carreador ponto amostral considerado compactado pode ocorrer o mesmo pelo manejo e características do solo, observadas na figura 9 (a), onde nas camadas mais superficiais do solo (0 a 10 cm) o ponto carreador apresentou a maiores valores de umidade.

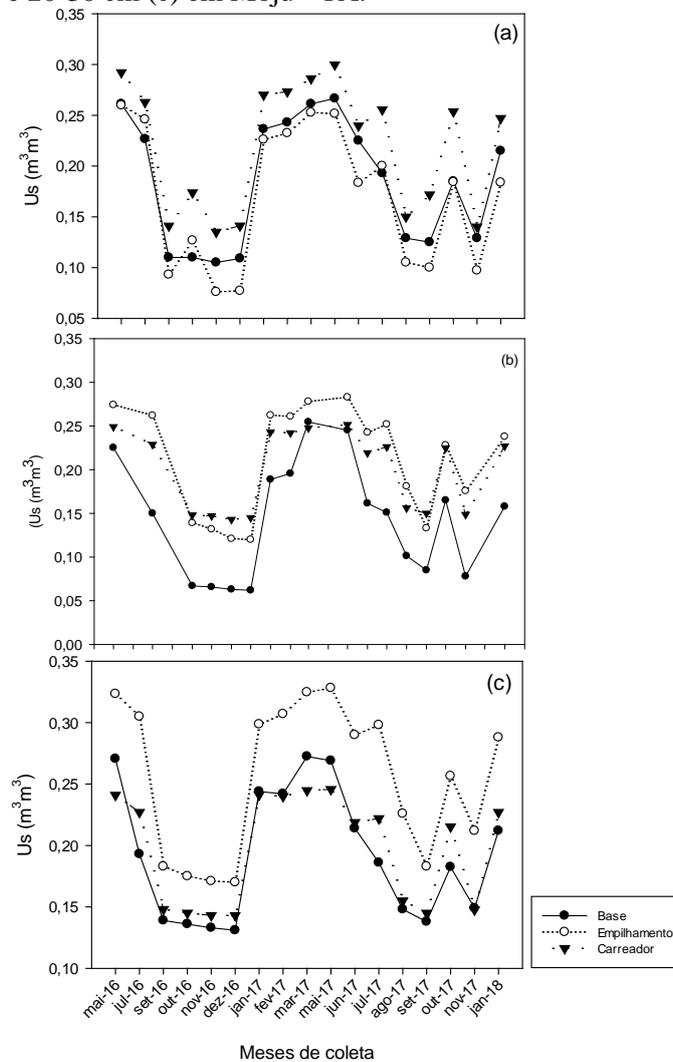
Na figura 9 (b) é possível observar que na profundidade de 10 a 20 cm do solo no ponto da base da planta é observado o menor valor de umidade volumétrica em todos os meses de coleta desse estudo. Gloria (comunicação pessoal) realizando trabalhos de distribuição de raízes no local onde esse experimento foi realizado observou que a biomassa de raízes do híbrido interespecífico de palma de óleo se concentra nos primeiros 30 cm de solo, sendo as raízes primárias as que representam a maior parte desta biomassa. As raízes terciárias apresentam maior densidade de massa nos primeiros 15 cm de solo, e na distância 0-100 cm da planta. Além de ter sido percebido que com a distância da planta e profundidade do solo houve uma tendência à diminuição dos valores de densidade de massa de raízes (DMR) foi observado uma maior concentração de raízes nas camadas superficiais (0-30 cm) com 92,4% da DMR total no perfil avaliado.

A palma de óleo apresenta um sistema de raízes adventícias, composto por raízes primárias, secundárias, terciárias e quaternárias. A primeira é responsável pela sustentação da planta no solo. E as duas ultimas, são responsáveis pela absorção de água e nutrientes (CORLEY; TINKER, 2003). Com isso na Figura 9 (b) a baixa umidade volumétrica encontrada na base da planta e no carreador na profundidade de 10 a 20 cm independente do

período sugere uma maior concentração de raízes finas nessa profundidade ao longo de todo o período amostral, ressaltando a diminuição do espaço poroso ocasionado pela compactação do maquinário na área.

O sistema radicular após dez anos de cultivo pode apresentar um alto desenvolvimento trabalhos desenvolvidos por Carvalho (1991) em solos areno-argilosos com *Elaeis guineensis* Jacq. com doze anos após o plantio mostraram uma distribuição de 30% de massa de raízes absorventes (RII, RIII e RIV) nos primeiros 20 centímetros de solo. Com isso, na figura na base da palma a umidade disponível do solo é menor que os demais tratamentos (Figura 9 (b)), onde foi encontrado maior densidade de raízes absorventes nesse ponto.

Figura 9 - Umidade volumétrica no solo com palma de óleo (*Elaeis guineensis* Jacq.) em três pontos de observação em área de monocultivo, base da planta, empilhamento e carreador, nas profundidades de 0-10cm (a); 10-20 cm (b) e 20-30 cm (c) em Moju – PA.



4. CONCLUSÕES

Há variação espacial do efluxo de CO₂ do solo em monocultivo de palma de óleo, uma vez que o EFCO₂ foi sensível a sistema de manejo, sendo maior nos pontos com maior deposição de material vegetal e base da planta. Análises de regressão linear múltipla apontaram influência da temperatura do solo no período menos chuvoso e não significativa no período chuvoso. A temperatura do solo com o EFCO₂ foram positivas nas análises de regressão linear para o período menos chuvoso e no chuvoso a umidade foi positivamente correlacionada.

A correlação de Pearson foi moderada com os pontos empilhamento e carreador em relação ao EFCO₂ e a temperatura do solo. Variáveis ambientais bióticas são necessárias para determinar quais outros fatores são controladores dos resultados obtidos em relação à respiração do solo, tais como a determinação por meio de componentes do solo (liteira, respiração heterotrófica e respiração autotrófica) para um melhor entendimento da produção desse gás no solo.

AGRADECIMENTOS

A CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de doutoramento, a EMBRAPA Amazônia Oriental pelo suporte logístico, a toda equipe pelo apoio técnicos e científico e ao Dr. Celso Van Randow pelo apoio instrumental.

REFERÊNCIAS

- BEKKU, Y. S.; NAKATSUBO T.; KUME, A.; ADACHI, M.; KOIZUMI, H. Effect of warming on the temperature dependence of soil respiration rate in arctic, temperate and tropical soils. *Applied Soil Ecology*. v.22 , p.205-210, 2003.
- BRANDFORD, J. B.; RYAN, M. G. Quantifying soil respiration at Landscape scales. In: HOOVER, C.M. (ed.) *Field measurements for forest carbon monitoring*. [S.l.]: Springer Science + Business Media B.V., 2008.
- CAMPANHA, M. M.; SANTOS, R. H. S.; FREITAS, G. B. de.; MARTINEZ, H. E. P.; JARAMILLO-BOTERO, C.; GARCIA, S. L. Análise comparativa das características da serrapilheira e do solo em cafezais (*Coffea arabica* L.) cultivados em sistema agroflorestal e em monocultura, na Zona da Mata Mg¹. *R. Árvore*, Viçosa-Mg, v.31, n.5, p.805-812, 2007.
- CARVALHO, C. J. R. *Mècanismes de resistance a la sècheresse chez des plantes jeunes et adultes d epalmier à huile (Elaeis quineesnsis Jacq.)*. 1991. 205f. Thèse de Doctorat - Université de Paris-Sud, Centre D'Orsay, 1991.
- CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA (CEPEA). *Perspectiva para o agronegócio em 2015*. Piracicaba, 2015.

COMEAU, L. P.; HERGOUALC'H, K.; HARTILL, J. ; SMITH, J.; VERCHOT, L. V.; PEAK, D.; SALIM, A. M. How do the heterotrophic and the total soil respiration of an oil palm plantation on peat respond to nitrogen fertilizer application? *Geoderma Journal*, v.268, p. 41-51, Apr. 2016.

CORLEY, R. H. V. How much palm oil do we need? *Environmental Science Policy* 12, p.134-139, 2009.

CORLEY, R. H. V.; TINKER, P. B. (ed.). *The oil palm*. Oxford: Blackwell Science, 2003. 608 p.

COSTA, M. C.; COSTA, A. C. L.; COELHO, L. T. S.; SILVA, T. M. L.; AZEVEDO, A. F.. Correlação entre precipitação pluviométrica e umidade do solo na produção de serapilheira em Caxiuanã (PA). *Revista Ibero- Americana de Ciências Ambientais*, Aquidabã, v.5, n.1, p.170-179, 2014.

DAVIDSON, E.A.; JANSSENS, I.A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, v.440, n.7081, p. 165-173, 2006.

DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I.A; LUO, Y. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q_{10} . *Global Change Biology*, v.2, n.2, p. 154-164, Dec. 2005.

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, p. 53–69, 2000.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. ver. atual. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisas de Solos, 1997. 212p.

FIELD, C.B. *et al.* IPCC, 2014: climate change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2014.

FONSECA, L. C. N. da; ARAÚJO, A. C. de; MANZI, A. O.; CARVALHO, C. J.R. de.; OLIVEIRA, L. R.de. Fluxos de CO₂ em plantio de palma de óleo no Leste da Amazônia. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v. 33, n. 1, 181-192, 2018.

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. *Global Change Biology Bioenergy*, v. 5, n. 4, p. 384–390, Jul. 2013.

GOMES, L. de C.; CARDOSO, I. M.; MENDONÇA, E. de S.; FERNANDES, R. B. A.; LOPES, V. S.; OLIVEIRA, T. S. Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 224, n. 15, p. 30-39, Aug. 2016.

GLORIA, G. C. P.; AMADOR, J. T.; VASCONCELOS, S. S. Distribuição da biomassa de raízes em plantio de híbrido interespecífico de palma de óleo. *In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA*, 20. & SEMINÁRIO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA EMBRAPA

AMAZÔNIA ORIENTAL, 4., 2016, Belém, PA. [Anais...]. Belém-PA: EMBRAPA;[UFPA], 2016.

HOMMA, A. K. O. Agroenergia: a entrada de um novo ciclo na Amazônia. In: GOMES JÚNIOR, R. A. (ed.). *Bases técnicas para a cultura da palma de óleo integrado na unidade produtiva da agricultura familiar*. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2010. Parte I, p. 3-8.

IAMAGUTI, J. L.; MOITINHO, M. R.; TEIXEIRA, D. D.; BICALHO, E. D. S.; PANOSSO, A. R.; LA SCALA, N. Preparo do solo e emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo em área canavieira. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v. 19, n. 5, p. 497–504, 2015.

INTERGOVERNMENTAL PAINEL ON CLIMATE CHANGE- IPCC. *Carbon and other biogeochemical cycles.*, 2014. Disponível em: https://www.ipcc.ch/pdf/assessmentreport/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter06_FINAL.pdf. Acesso em 16 de mar 2018.

JARDINE, K. J.; GIMENEZ, B. O.; ARAUJO, A. C.; CUNHA, R. L.; FELIZZOLA, J. F.; PIVA, L. R.; CHAMBERS, J. Q.; HIGUCHI, N. Diurnal Pattern of Leaf, Flower and Fruit Specific Ambient Volatiles above an Oil Palm Plantation in Pará State, Brazil. *J. Braz. Chem. Soc.*, v. 27, n. 8, p. 1484-1492, 2016.

LUO, Y.; ZHOU, X. Importance and roles of soil respiration. In: LUO, Y.; ZHOU, X. (ed.). *Soil respiration and the environment*. San Diego, CA: Academic Press, Elsevier, 2006. p. 17–28.

MERINO, A.; PÉREZ-BATALLÓN, P.; MACÍAS., F. Respostas de matéria orgânica do solo e gases de efeito estufa fluxos para mudanças de manejo do solo e uso da terra em uma região de clima temperado úmido do sul da Europa. *Soil Biology and Biochemistry*, v.36, p.917–925, 2004.

METCALFE. Factors controlling spatio-temporal variation in carbon dioxide efflux from surface litter, roots, and soil organic matter at four rain forest sites in the eastern Amazon. *Journal of Geophysical Research*, v. 112, G04001, 2007. Doi:10.1029/2007JG000443.

MOREIRA, F. S.; SIQUEIRA, J. O. *Microbiologia e bioquímica do solo*. Lavras: UFLA, 2006. 744 p.

MUNIZ, R. S.; TEIXEIRA, W. G.; BUENO FILHO, S. S. S.; PÉREZ, D. V.; BOARI, A.; PINA, A. J. A. Dinâmica do potencial redox em condições de alagamento em amostras de latossolo amarelo, textura média do nordeste paraense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2012, Uberlândia, Minas Gerais. [Anais...] Uberlândia, Minas Gerais, 2012. 4p. Disponível em: <https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/69564/1/DINAMICA-DO-POTENCIAL-REDOX-EM-CONDICOES.PDF>. Acesso em: 21/06/2019.

NOVAIS, J. W. Z.; SANCHESB, L.; SILVAC, L. B. da; MACHADO, D. N. G.; AQUINOB, A. M.; SALLO, F. S. Serrapilheira e Efluxo de CO₂ do Solo em Floresta Sazonalmente Alagável no Pantanal Brasileiro. *Ensaio Cienc., Cienc. Biol. Agrar. Saúde*, v.21, n.3, p. 178-

182, 2017

PENG, S.; PIAO, S.; WANG, T.; SUN, J.; SHEN, Z. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China. *Soil Biol. Biochem*, v. 41, n. 5, p.1008–1014, 2009.

PINTO-JUNIOR, O. B.; SANCHES, L.; DALMOLIN, A. C.; NOGUEIRA, J. S. de. Efluxo de CO₂ do solo em floresta de transição Amazônia Cerrado e em área de pastagem. *Acta Amazônica*. vol. 39(4) 2009: 813 – 822.

RYAN, M. G.; LAW, B. E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, v. 73, n. 1, p. 3–27, 2005.

SILVA, R. B.; SANTOS, A. C.; BATISTA, R. B. Respiração edáfica como indicativo da qualidade do solo em três agrossistemas. *Enciclopédia Biosfera*, v. 6, n. 11, p. 1-15, 2010.

SILVA, C. M. da; 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.

SQUIRE, G. R. Technique in environmental physiology of oil palm: Partitioning of rainfall above ground. *Porim Bulletin*, n.9, p. 1-9, 1984.

STOCKMANN, U. *et al.* The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agric. Ecosyst. Environ.*, v.164, p. 80-99, 2013.

VEIGA, A. S.; SMIT, L; FÚRIA, L. R. R. Avaliação do dendezeiro como opção para o sequestro de carbono na Amazônia. In: VIEGAS, I. de J. M.; MULLER, A. A. (eds.). *A cultura do dendezeiro na Amazônia brasileira*, Belém: EMBRAPA Amazônia Oriental/Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 2000. p. 125-144.

VERHEYE, W. Growth and production of oil palm. In: VERHEYE, W. (ed.). *Land use, land cover and soil sciences*. Oxford, UK: UNESCO-EOLSS Publishers, 2010. (Encyclopedia of Life Support Systems (EOLSS)).

WU, X.;YAO, Z.;BRÜGGEMANN, N.;SHEN, Z.Y.;WOLF, B.; DANNENMANN, M.;ZHENG, X.; BUTTERBACH-BAHL, K. Effects of soil moisture and temperature on CO₂ and CH₄ soil–atmosphere exchange of various land use/cover types in a semi-arid grassland in Inner Mongolia, China. *Soil Biology and Biochemistry*. v. 42, n. 5, p. 773-787, 2010.

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.

ZANCHI, F.B.; ROCHA, H.R. da; FREITAS, H.C.de; 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 Discuss*, v. 6, n.3, p. 6147-6177, 2009.

CAPÍTULO 3 A INFLUENCIA DAS ÁRVORES NA DINÂMICA DE EFLUXO DE CO₂ DO SOLO EM SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA PECUÁRIA FLORESTA NO NORDESTE DA AMAZÔNIA.

RESUMO

Esse estudo teve por objetivo caracterizar a dinâmica do EFCO₂ (Efluxo de CO₂) em área de iLPF (Integração Lavoura Pecuária Floresta) e identificar quais fatores físicos controlam este processo. O estudo foi realizado em dois sistemas agroflorestais (iLPF) um com mogno-africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) e o outro com teca (*Tectona grandis* L. f.) e em área de capoeira como controle em Terra Alta, PA durante cinco meses do período chuvoso da região Amazônica. Foram mensurados 4 pontos em cada um dos iLPFs com 4 repetições cada (base da árvore, entre árvores, transição plantio florestal-pasto e pasto) e 25 pontos na área controle, pela manhã às 08:00 e às 12:00 nos meses de dezembro e janeiro, nos demais meses a chuva no horário da segunda coleta impossibilitou a análise. As maiores variações de temperatura ocorreram no sistema de iLPF teca e as menores em capoeira. Cada sistema apresentou comportamento diferenciado quando correlacionado com as variáveis ambientais estudadas (Temperatura do solo – Ts; Umidade do solo – Us, Precipitação e Temperatura do ar). Os maiores valores de efluxo ocorreram no iLPF mogno (base das árvores) durante os meses de dezembro, janeiro e fevereiro de 2019 (5,5; 5,9 e 4,49 $\mu\text{mol. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, respectivamente). Durante o mês de março e abril do mesmo ano a área sombreada do iLPF teca passou a apresentar os maiores resultados (6,8 e 6,46 $\mu\text{mol. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). Em conclusão, nos sistemas de iLPF as árvores apresentam as maiores perdas de CO₂ comparado a áreas florestais.

Palavras-chave: iLPF, Amazônia, efluxo de CO₂

ABSTRACT

This study aimed to characterize the dynamics of EFCO₂ (Efflux of CO₂) in the area of iLPF (integration crop livestock forest) and to identify which physical factors control this process. The study was carried out in two agroforestry systems (iLPF) One with African Mahogany (*Khaya ivorensis* A. Chev.) And the other with teak (*Tectona grandis* L. F.) and in a capoeira area as control in Terra Alta, PA during five months of the rainy season of the Amazon region. Four points were measured in each of the iLPFs with 4 replications each (tree base, between trees, forest planting transition-pasture and pasture) and 25 points in the control area, in the morning at 08:00 and 12:00 in the months of December and January, in the other months the rain in the Hours Of the second collection precluded the analysis. The highest temperature variations occurred in the iLPF teak system and the lowest in control area. Each system

presented differentiated behavior when correlated with the environmental variables studied (soil temperature-Ts; Soil moisture – Us, precipitation and temperature – air). The highest efflux values occurred in the mahogany iLPF (tree base) during the months of December, January and February 2019 (5.5; 5.9 and 4.49 $\mu\text{mol. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, respectively). During the month of March and April of the same year the shaded area of the iLPF teak began to present the highest results (6.8 and 6.46 $\mu\text{mol. m}^{-2}.\text{s}^{-1}$). In conclusion, in the iLPF systems, the trees present the highest CO₂ losses compared to forest areas.

Key words: iLPF; Amazon; CO₂ efflux.

1. INTRODUÇÃO

O Brasil é o maior exportador de carne bovina, soja e seus derivados devido ao avanço tecnológico alcançado no manejo utilizado pelos produtores. Em consequência disso também possui 30 milhões de hectares de pastagem em algum estágio de degradação (EMBRAPA, 2014).

Na Amazônia, a derrubada de floresta seguida da queima tem constituído o processo usual de preparo da área para formação de pastagens (COSTA, 2004). Os impactos globais mais importantes deste processo estão relacionados com a emissão de gases de efeito estufa por ocasião da queima da biomassa, sobretudo CO₂ perdas da biodiversidade e efeitos da fumaça (FEARNSIDE, 1997). Contudo, as modificações recaem, principalmente, sobre um dos componentes do sistema, o solo, em função da nova cobertura vegetal e presença do animal em pastejo (HYNES; WILLIAMS, 1993).

A cobertura vegetal pode ser o principal fator controlador do efluxo de CO₂ do solo, uma vez que controla as condições do microclima, qualidade física, biológica e química do solo. Em sistemas agroflorestais com o uso de culturas, o sequestro de carbono ocorre na biomassa vegetal e aumentam a entrada de resíduos de matéria orgânica do solo (EHRENBERGEROVÁ et al., 2016) com a implementação global podem contribuir para remoção de quantidades significativas de carbono (1.1-2.2 Pg C) da atmosfera nos próximos 50 anos (ALBRECHT; KANDJI, 2003).

Integração lavoura-pecuária-floresta (iLPF) é uma estratégia de produção que integra diferentes sistemas produtivos, agrícolas, pecuários e florestais dentro de uma mesma área. Pode ser feita em cultivo consorciado, em sucessão ou em rotação, de forma que haja benefício mútuo para todas as atividades. Esta forma de sistema integrado busca otimizar o

uso da terra, elevando os patamares de produtividade, diversificando a produção e gerando produtos de qualidade. Com isso reduz a pressão sobre a abertura de novas áreas.

Além disso, esses ecossistemas vêm ganhando destaque nos últimos anos por causa do potencial de sequestro de gás carbônico da atmosfera (SENAPATI et al., 2016), devido à característica das gramíneas de promover acúmulo de biomassa em função do rápido crescimento da parte aérea e do sistema radicular. Estima-se que até 2030, esse ecossistema sequestre, ao nível global, entre 0,2 e 0,8 Gt CO₂ ano⁻¹ do carbono orgânico no solo (SMITH et al., 2008).

Conforme explicam Balbino, Cordeiro e Martinez (2011), a integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF) envolve sistemas produtivos diversificados (que contemplam a produção de alimentos, fibras, energia, produtos madeireiros e não madeireiros), de origem vegetal e animal, realizados para otimizar os ciclos biológicos das plantas e dos animais, bem como dos insumos e seus respectivos resíduos.

A produção observada em sistemas iLPF apresenta diversos benefícios ao produtor e ao meio ambiente, como: a melhoria de condições físicas, químicas e biológicas do solo; aumento da ciclagem e eficiência na utilização de nutrientes; redução de custos de produção da atividade agrícola pecuária; diversidade e estabilidade da renda na propriedade rural e a recuperação de áreas com pastagens degradadas (ALVARENGA et al., 2010).

Recentemente estudos têm demonstrado que pastagens bem manejadas, em geral, a acumulação de carbono pode ser observada, enquanto que em pastagens degradadas são verificadas perdas de carbono (CARVALHO et al., 2010; SALTON et al., 2011). Carvalho et al. (2014) avaliando o sistema de integração lavoura-pecuária (iLP) como uma estratégia para reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) provenientes do solo no Cerrado brasileiro, observaram que a implantação do sistema de iLP se revelou eficiente no sequestro de carbono do solo.

A respiração do solo é um processo importante que controla a perda de carbono dos ecossistemas terrestres (PENG, et al., 2009). Os mecanismos da respiração do solo podem sofrer influência também de fatores abióticos, tais como, temperatura e umidade do solo. Com isso, o efluxo de CO₂ torna-se, dependente da variabilidade temporal e espacial destas variáveis, que exercem forte influência no processo de decomposição microbiana, independentemente do manejo do solo adotado.

A avaliação de sistemas, como no caso a integração Lavoura- Pecuária-Floresta (iLPF), assim como de outras tecnologias sustentáveis, tem despertando interesse pela

contribuição na mitigação de gases de efeito estufa (GEE) e análise de retenção de carbono na biomassa e no solo. (BALBINO; CORDEIRO; MARTINEZ, 2011). Com isso, o objetivo desse experimento foi avaliar a influência das árvores na dinâmica de efluxo de CO₂ sob interferência da umidade e temperatura do em duas áreas distintas de cobertura do solo (capoeira) e área com iLPF (pelas componentes arbóreas e pastagem) assim como avaliar a sensibilidade à temperatura do solo do efluxo de CO₂ (EFCO₂) nas mesmas áreas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado no Campo Experimental da Embrapa Amazônia Oriental, localizado no município de Terra Alta, região nordeste paraense, a uma altitude de 35 metros a $1^{\circ} 1' 36,60''$ S de latitude e a $47^{\circ} 53' 58''$ W de longitude. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo Am (clima tropical úmido), caracterizado por temperatura e precipitação anuais elevadas, com período de escassez de chuva relativamente curto. O solo da área de estudo foi classificado como Argissolo Amarelo Distrófico típico, textura arenosa/média (GAMA; RODRIGUES; CARDOSO, 2000).

Os dados meteorológicos de precipitação pluviométrica e temperatura do ar foram obtidos por dados de torres automáticas coletados pelo InMet (Instituto Nacional de Meteorologia) instaladas em Castanhal a uma distância de 32 km do município de Terra Alta, O tempo estimado do percurso da viagem entre as duas cidades é de aproximadamente 28 minutos para o local do experimento (Figura 1).

Figura 1 - Precipitação pluviométrica e temperaturas máxima, mínima e média durante o período experimental, em Castanhal-PA.

Fonte: Inmet

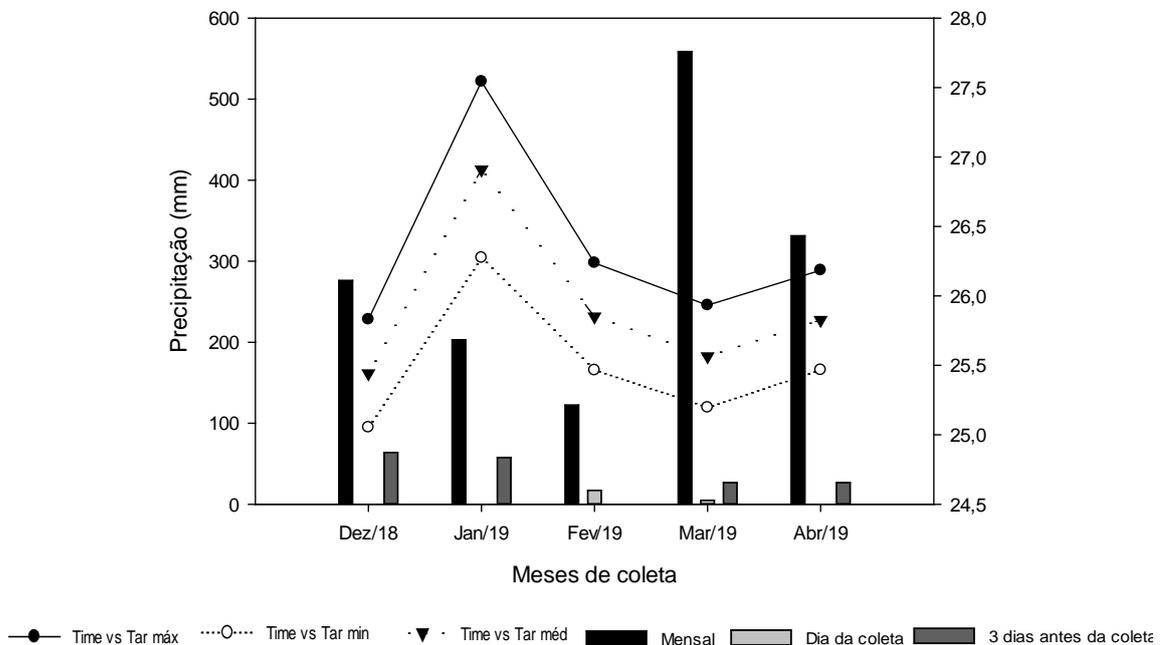
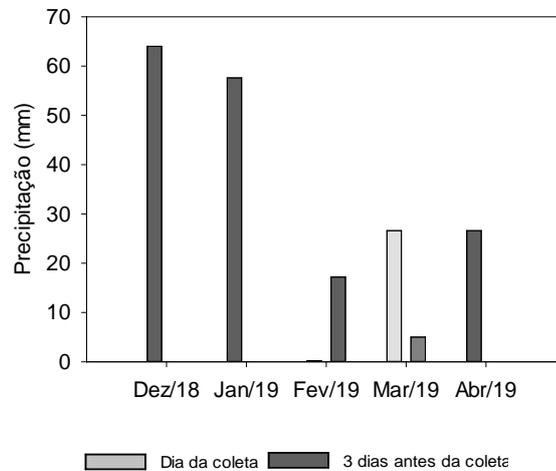


Figura 2 - Precipitação pluviométrica 3 dias antes e durante as coletas durante o período experimental, em Castanhal-PA.



2.1 Histórico da área

Dois sistemas de Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (ILPFs) foram instalados na área em fevereiro de 2009, um com mogno-africano (*Khaya ivorensis* A. Chev.) e outro com teca (*Tectona grandis* L. f.). Ambas as espécies foram estabelecidas em faixas com espaçamento de 49 metros entre as mesmas, sendo o mogno-africano com três linhas e a teca com quatro linhas; com espaçamento de 5 m x 5 m para a primeira espécie e de 3 m x 3 m para a segunda. Na área entre as faixas, o solo foi cultivado com culturas anuais por cinco safras consecutivas. No primeiro ano, foi plantado milho (*Zea mays* cv. BRS 1030) na mesma época de plantio das mudas das espécies florestais. No segundo (2010), feijão-caupi (*Vigna unguiculata* cv. BRS Guariba) foi a cultura estabelecida já em sistema de semeadura direta - SSD. Nos três anos subsequentes (2011, 2012, 2013), o milho voltou a ser plantado, também em SSD. No último plantio do cereal foi feita a semeadura do capim-piatã (*Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã; syn. *Urochloa brizantha* cv. BRS Piatã). Desde então, a área vem sendo ocupada com a pastagem formada entre as faixas de mogno-africano e teca.

O método de pastejo utilizado é o de lotação contínua com taxa de lotação variável. Cada piquete é pastejado por dois animais-teste distribuídos nas unidades experimentais de forma que as médias de peso dos animais são praticamente a mesma para todos os piquetes, sendo adicionados animais reguladores com peso semelhante para manutenção das alturas do dossel pré-determinadas. Todos os animais recebem água e suplemento mineral completo à vontade, além de manejo sanitário.

Durante os meses de novembro de 2017 e abril e julho de 2018 foram realizadas campanhas intensivas que tiveram a duração de aproximadamente 24 horas, durante os períodos: menos chuvoso (17-18/11/2016; 16-17/11/2017 e 8-9/11/2018); chuvoso (12-13/04/2017 e 5-6/04/2018); e transição do chuvoso para menos chuvoso (06-07/07/2017 e 05-06/07/2018). Nas áreas com Mogno (base da planta, entre plantas, transição e pasto) e Teca (base da planta, entre plantas, transição e pasto). Durante este período foi possível observar que o EFCO₂ apresentou uma variação espacial e temporal, os valores próximos a base da planta e entre plantas (área sombreada) foram consistentemente maiores do que àqueles a pleno sol como nas áreas de pasto e teca.

As campanhas realizadas durante esses meses motivaram o experimento desse capítulo uma vez que na média geral, os maiores valores de EFCO₂ foram observados no iLPF com mogno. Porém durante as campanhas de novembro, foi observado que o EFCO₂ em pasto apresentou valores superiores a área de transição e até mesmo similares à base de planta. Além do que o EFCO₂ apresentou características distintas para os períodos diurnos e noturnos. Durante à noite, os valores de EFCO₂ apresentaram uma grande variação, particularmente no intervalo de 18:30 – 20:00 horas. Após esse intervalo, EFCO₂ ou manteve-se muito estável ou decresceu uniformemente, até atingir um mínimo próximo ao amanhecer. Em função da variação observada durante as campanhas de abril e julho. Sazonalmente, EFCO₂ foi maior nas campanhas de abril e julho. E no caso desse experimento os valores observados nessas campanhas foram cerca de 2-3 vezes maiores do que aqueles das campanhas de novembro. Por essa razão o presente estudo foi realizado. Buscando comparar as áreas de iLPF com uma área controle e observar variações espaciais na área.

2.2 Efluxo de efluxo de CO₂ e temperatura do solo

As medidas de efluxo de CO₂ do solo foram realizadas utilizando um analisador portátil de gás por infravermelho acoplado a uma câmara de respiração do solo (EGM-4 Environmental Gás Monitor for CO₂, PP Systems Amesbury, Massachusetts, USA). Em 32 anéis de PVC (cloreto de polivinil) com 10 cm de diâmetro e 8,5 cm de altura, inseridos cerca de 2 cm no solo em cada um dos ILPFs com mogno e teca. Em cada sistema foram coletados dados da base da árvore, entre árvores, na transição entre a pastagem e área com mogno e teca e na pastagem com 4 repetições. Assim como em 25 anéis de uma área controle (capoeira).

Para aferição da temperatura do solo (Ts) foi utilizado um termômetro acoplado ao EGM-4 e inserido à uma profundidade de 0,05 metros.

2.2.1 Cálculos de Respiração do solo

(1)

$$R_s = \frac{\Delta C}{\Delta T} \cdot \frac{P}{1000} \cdot \frac{273}{T+273} \cdot \frac{44,01}{22,01} \cdot \frac{V_d}{A}$$

Para o cálculo de efluxo de CO₂ do solo estão sendo utilizadas as variáveis da equação 1 baseada na fórmula utilizada por Metcalfe et al. (2007), onde o efluxo de CO₂ é calculado por meio da razão de ΔC (variação de CO₂) e ΔT (variação de tempo) multiplicada pela P (Pressão atmosférica) e T (Temperatura do solo °C). Valores de Vd (volume da câmara) e A (área que a câmara é inserida no solo) são medidos em campo.

2.3 Umidade gravimétrica

Para obtenção da umidade gravimétrica foram coletadas em cada um dos 32 pontos três amostras compostas, com trado tipo copo à uma profundidade de 0,05 m (tabela 1). A coleta foi realizada em torno do anel e acondicionada em frascos herméticos logo após a medição do efluxo de CO₂. Para obtenção dos valores de massa úmida foram realizadas pesagens em balança de precisão e em seguida para obtenção da massa seca todas as amostras foram colocadas em estufa durante 48 horas à uma temperatura de 105°C (EMBRAPA, 1997) para posteriormente serem realizados os cálculos da equação 2.

$$H_2O(\%) = \frac{(m_{úmida} - m_{seca})}{m_{seca}} \cdot 100 \quad (2)$$

2.4 Análise estatística

O delineamento é em blocos ao acaso com quatro repetições e quatro tratamentos em cada um dos dois iLPFs. Os dados foram submetidos à análise de variância e testados pelo teste F de Fisher. Quando houve efeito significativo das fontes de variação, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. A variabilidade espacial do EFCO₂ foi caracterizada para cada medição pelo cálculo do coeficiente de variação, nas áreas de amostragem dos 3 sistemas nas duas áreas amostradas. A comparação EFCO₂ do solo normalizado entre os outros fatores foi realizada pela análise de variância (ANOVA).

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

O experimento foi conduzido na estação chuvosa dado a experimentos anteriores referentes a variação diária de EFCO₂ realizados em três períodos (chuvoso, transição e menos chuvoso) terem apontado maiores variações e valores para o EFCO₂ em ambos sistemas de iLPF (mogno e teca). Em geral, plantas crescendo em ambientes sombreados aumentam a alocação de biomassa para a parte aérea em detrimento do sistema radicular (GIVNISH, 1988).

Tabela 1 - Média (n=32) da temperatura do solo a 5 centímetros (Ts_{5cm}), umidade do solo (Us), Amplitude da temperatura entre 12 e 8 horas (ΔT (12-08)) nos sistemas de integração lavoura pecuária floresta com teca (iLPFT) e mogno (iLPFM) e pastagem (Pasto T e Pasto M) e área de controle (capoeira).

Sistema	Cap.		Base T.		Ent. T.		Trans. Teca		Pasto. T		Base .M		Entre.M..		Trans. Mog.		Pasto. M.	
	08h	12h	08h	12h	08h	12h	08h	12h	08h	12h	08h	12h	08h	12h	08h	12h	08h	12h
T _{ar} (°C)*	24,9	29,4	24,9	29,4	24,9	29,4	24,9	29,4	24,9	29,4	24,9	29,4	24,9	29,4	24,9	29,4	24,9	29,4
U _{ar} (%)*	93,0	68,0	93,0	68,0	93,0	68,0	93,0	68,0	93,0	68,0	93,0	68,0	93,0	68,0	93,0	68,0	93,0	68,0
Ts _{5cm} (°C)	26,2	26,8	25,9	29,0	26,0	29,1	27,5	29,4	27,7	29,6	27,4	28,7	27,7	29,5	27,4	29,3	27,7	29,8
	(0,4)	(0,7)	(0,3)	(0,5)	(0,3)	(0,4)	(0,2)	(0,3)	(0,9)	(0,1)	(0,3)	(0,3)	(0,4)	(0,3)	(0,4)	(0,3)	(0,1)	(0,5)
ΔT (12-08)	0,59		3,03		3,17		1,85		1,85		1,32		1,78		1,88		2,05	
Us (%)	10,9	10,4	8,1	8,0	7,8	7,4	7,6	7,2	14,5	13,9	14,8	14,4	13,9	12,8	12,7	12,3	15,1	13,3
	(0,6)	(0,8)	(0,3)	(0,8)	(0,5)	(0,7)	(0,3)	(0,6)	(1,0)	(0,5)	(0,8)	(0,8)	(1,1)	(1,0)	(0,5)	(0,7)	(1,3)	(0,9)

Os números em parênteses são (\pm erro padrão)

*Dados medidos do InMet

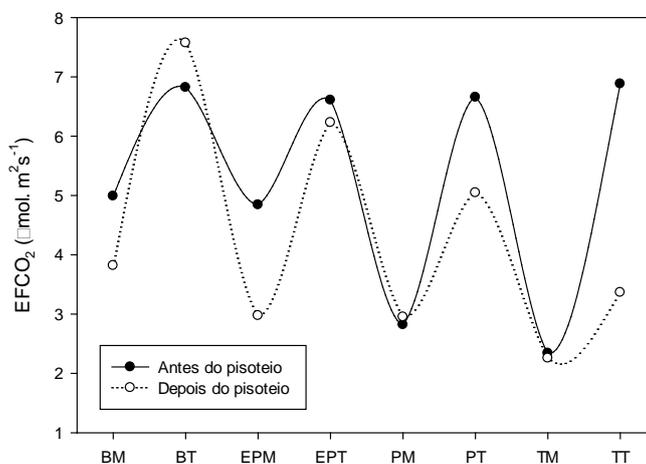
Em comparação aos sistemas sombreados e as áreas de pasto (PT e PM) a capoeira apresentou 0,3°C de temperatura do solo mais baixa as 08 e as 12 a base das árvores de teca ficaram 2,2°C mais quentes. Na base e entre mognos nos dois períodos foram encontrados maiores valores em relação a área de controle (capoeira). Às 12:00 a capoeira apresentou temperaturas do solo mais baixas em relação a todos os outros sistemas. A umidade do solo teve maior variação entre os dois períodos nas áreas de pasto (Tabela 1).

O efluxo médio de CO₂ foi menor na capoeira (3,4 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e maior nas bases das árvores de mogno (7,7 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e base das árvores de teca (6,9 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) as 12:00. A variação espacial no efluxo de CO₂ do solo (expresso por meio do coeficiente de variação – CV) na tabela 2 foi maior no ILPF- T entre tecas e o mesmo ocorreu no ILPF-M entre mognos, mas ambos foram menos que a capoeira que apresentou maior coeficiente de variação.

Carvalho et al. (2016) relata que em sistemas agroflorestais com café houve uma maior variação espacial do EFCO₂ em comparação ao monocultivo de café sugerindo que a presença de diferentes espécies de árvores que promovem diferentes condições ambientais devido às suas características biológicas específicas. Outra conclusão no mesmo trabalho diz respeito a variabilidade do EFCO₂ durante o dia que diminui com o aumento da cobertura do dossel além do EFCO₂ ter sido considerado mais estável nos sistemas agroflorestais com café mostrando menor variação diurna do meio da manhã ao meio dia em relação a área apenas com café.

Durante o mês de março após a coleta do EFCO₂ durante o período da manhã vacas foram colocadas no campo, na área do iLPF com teca, as mesmas tinham acesso ao plantio florestal embora houvesse uma cerca protegendo o anel de PVC na base das árvores de teca. No iLPF com mogno não houve pastejo na área onde havia anéis para as realizações das coletas de EFCO₂. Na figura 3 é possível observar que antes do pisoteio animal nos pontos entre as árvores (EPT), na transição do plantio florestal para o pasto (TT) e no pasto da teca (PT) os valores médios de EFCO₂ foram maiores em relação aos observados após o pisoteio animal. Fato não observado na base da teca devido a proteção da cerca do local, após o pisoteio o valor médio observado foi maior nesse ponto devido ao incremento de EFCO₂ com a temperatura do solo (T_s). No iLPF com mogno não houve pastagem animal os valores médios de EFCO₂ apresentados antes do pisoteio são relacionados ao mesmo horário da área de teca e os valores médios na área de pasto (PM) e transição do plantio florestal para o pasto (TM) foram semelhantes.

Figura 3 - Efeito do pisoteio e da diminuição da área foliar no efluxo de CO₂ (EFCO₂) durante a colocação animal no mês de março de 2019 em área de iLPF em Terra Alta – PA.



A dinâmica do efluxo de CO₂ (EFCO₂) diferiu entre os três sistemas estudados. Na Tabela 2 é possível perceber o aumento do EFCO₂ durante o meio dia em relação ao meio da manhã (oito horas) em todos os pontos estudados. Na área de controle (capoeira) não houve uma grande variação observada, sendo mais estável. Os maiores valores de EFCO₂ nos dois sistemas de iLPF (teca e mogno) foram encontrados na base das árvores para o sistema mogno e no pasto pisoteado para o sistema teca seguido da base das árvores.

A baixa variação no efluxo de CO solo entre a manhã e o meio dia na capoeira pode indicar se assemelham a florestas naturais, com árvores criando um microclima de solo que é adequado para o crescimento de microrganismos do solo (BACH et al., 2010). O aumento na temperatura do ar e do solo é pode ter influenciado no aumento do EFCO₂ onde há uma menor cobertura do dossel, onde o dióxido de carbono é devolvido rapidamente a atmosfera pela respiração de raízes que é impulsionada pela fotossíntese recente e aumenta com a temperatura do ar (HOGBERG et al., 2008).

Tabela 2 - Efluxo de CO₂ do solo ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), erro padrão (ep) e coeficiente de variação (CV) medido nos sistemas de integração lavoura pecuária floresta com teca (iLPFT) e mogno (iLPFM), pastagem (PT e PM) e área de controle (capoeira).

Sist.	Cap.		B.T		Ent. T.		T. Teca		P. T		B.M		Ent.M..		T. Mog.		P. M.	
Período (h)	08	12	08	12	08	12	08	12h	08	12	08	12	08	12	08	12	08	12
EFCO ₂	3,4	3,6	4,6	6,9	3,7	5,0	4,4	5,7	5,6	5,8	6,0	7,7	5,1	6,8	4,3	5,0	4,9	5,7
ep	(0,4)	(0,7)	(0,6)	(0,9)	(0,5)	(0,7)	(0,3)	(0,6)	(0,3)	(0,7)	(0,3)	(0,4)	(0,7)	(0,5)	(0,5)	(0,5)	(0,3)	(1,1)
Δ EFCO ₂	0,2		2,3		1,3		1,3		0,2		1,7		1,7		0,7		0,8	
CV (%)	31,1	44,0	28,1	26,5	29,6	26,3	17,5	28,1	27,2	12,9	10,5	10,5	27,7	35,1	25,8	18,9	11,6	39,6

Na figura 4 é observado que durante o mês de janeiro quando possível a realização da coleta de EFCO₂ as 12:00 os valores coletados foram maiores em relação aos das 08:00. No sistema teca a Base da teca apresentou uma amplitude térmica de 3,03°C, entre tecas 3,17°C, na área de transição do plantio florestal com o pasto e no pasto esse incremento alcançou a diferença de 1,85°C.

Na tabela 1 no sistema com mogno os valores de incremento entre as 12:00 e as 08:00 para base das árvores, entre mognos, transição magnos para o pasto e pasto foram de 1,32°C, 1,78°C, 1,88°C e 2,05°C, respectivamente. O sistema teca apresentou maiores oscilações na área florestada nos horários amostrados em relação a área do iLPF mogno que apresentou incrementos menores de 2°C. A área com sol do sistema iLPF mogno obteve resultados maiores dos da mesma área na área com teca. Na área controle foram encontradas as menores

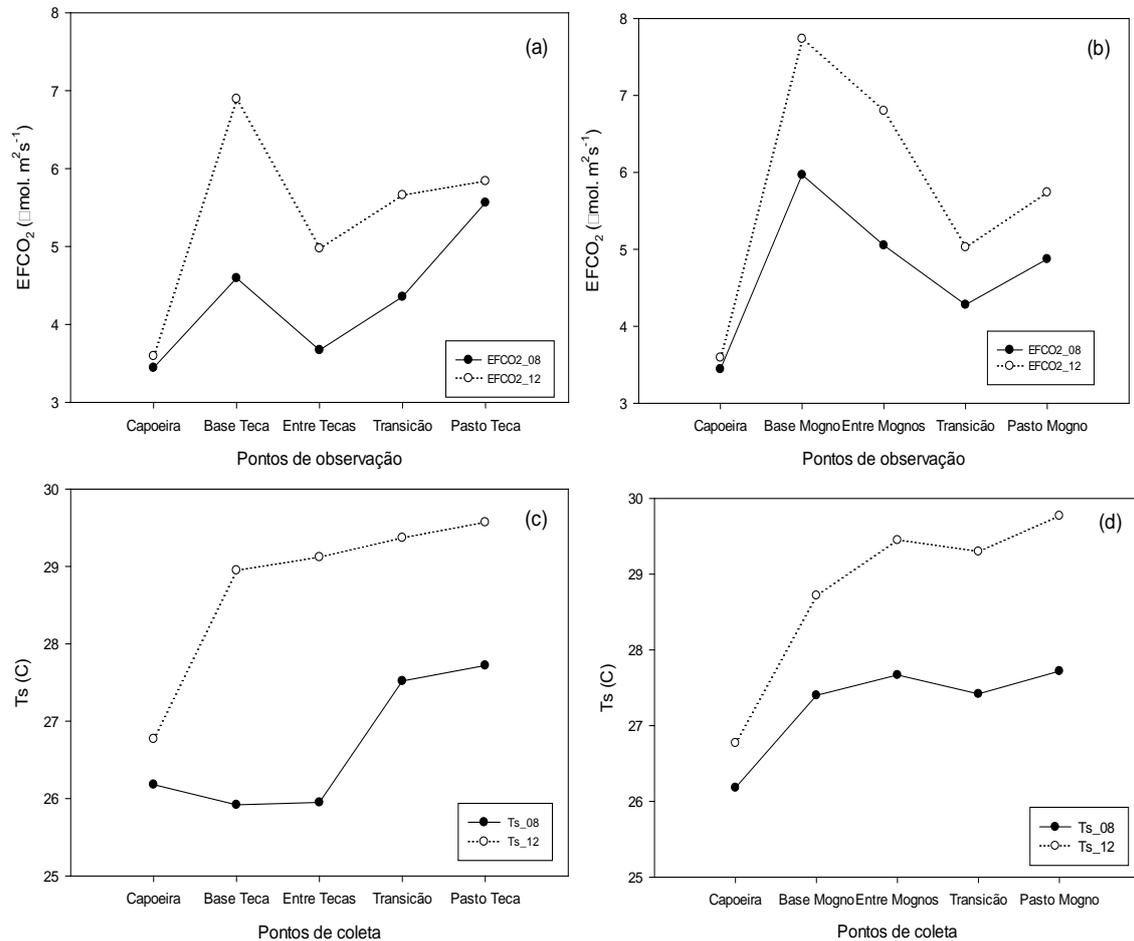
variações de temperatura ($^{\circ}0,59$ $^{\circ}\text{C}$)

O espaçamento na área do mogno proporciona maior circulação de ar em relação ao teca que além de possuir área mais adensada possui dossel mais fechado. No caso do sistema mogno a circulação de ar é maior. Katayama et al. (2009) em trabalho realizado em florestas encontrou nas características da árvore como a biomassa das raízes, na contribuição da matéria orgânica e na distância entre as árvores uma influência no padrão de variabilidade espacial na respiração do solo.

Na figura 4 é possível perceber que a base mogno apresenta maiores valores de EFCO_2 nos dois períodos estudados em relação a base teca, tal fato pode ser atribuído pela diferença de superfície do solo, pois na área com mogno na base das plantas havia maior área coberta com pasto durante o período chuvoso e associação do pasto por meio das raízes somada as raízes do mogno pode ter contribuído para esses resultados.

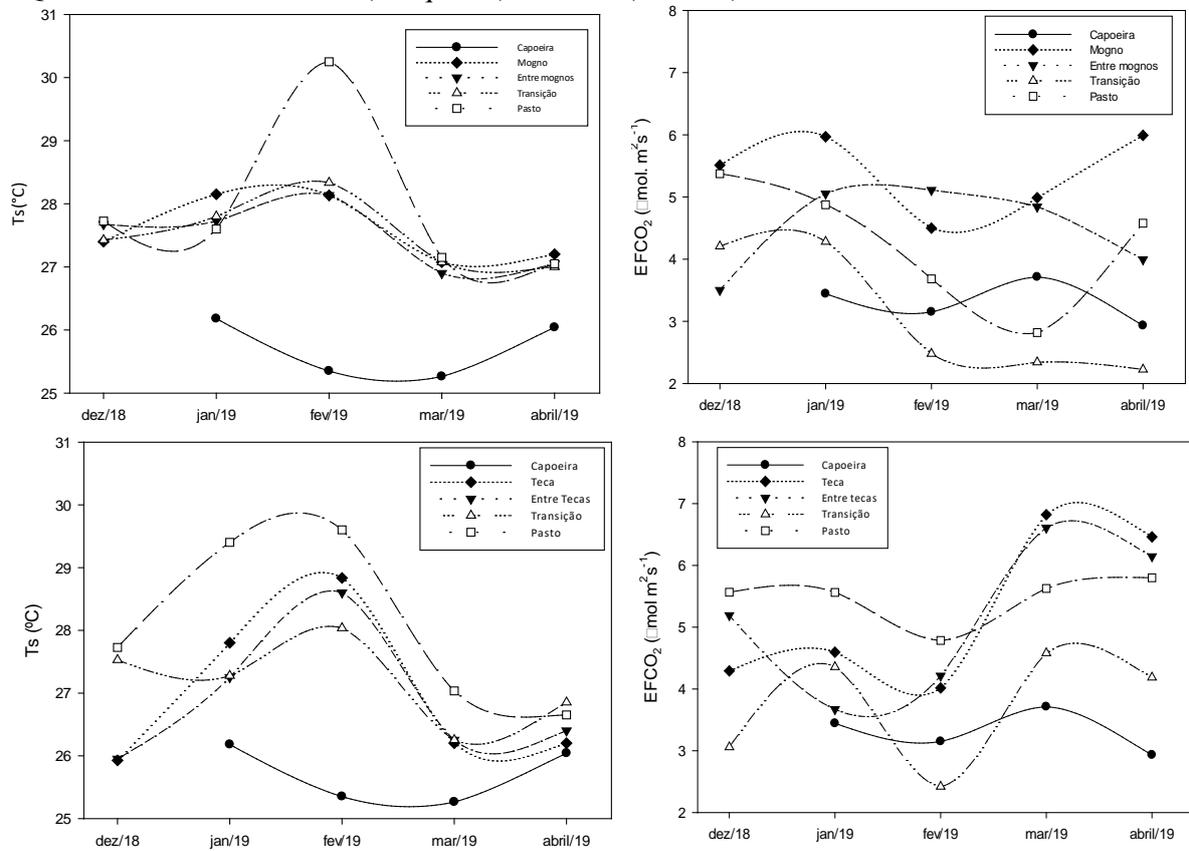
Durante o período das oito horas na área com teca (base teca e entre tecas) é percebida uma menor variação de temperatura em relação ao pasto e a área de transição. Tal resultado difere dos encontrados no sistema mogno onde na base das árvores e nos outros três pontos a temperatura não tem grandes amplitude durante as oito horas.

Figura 4 - Efluxo de CO₂ do solo ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) medido nos sistemas de integração lavoura pecuária floresta com teca (a) e mogno (b) e área de controle (capoeira), e Temperatura do solo (Ts) em teca (c) e mogno (d) nos períodos da manhã em dois horários (08:00 e 12:00).



Na figura 5 é possível observar as consequências da presença dos animais no pasto, durante os meses de coleta na área da teca (Figura 5 – C) o EFCO₂ no pasto apresentava maior EFCO₂ durante os meses de dezembro a fevereiro de 2019, ao serem colocadas as vacas no pasto esses valores sofreram um decréscimo evidente nos meses seguintes de março e abril do referido ano. Tal fato pode ser associado ao pisoteio animal que diminui o tamanho dos poros do solo causando a compactação assim como a diminuição da área foliar do pasto. Na área do mogno (Figura 5 – B) o mesmo ocorre durante o mês de pastejo dos animais. Mas, durante todas as amostragens com exceção do mês de fevereiro as árvores de mogno apresentaram maiores valores de EFCO₂.

Figura 5 - Média (n=32) do efluxo de CO₂ do solo ($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$), em sistemas de integração lavoura pecuária floresta com teca (iLPFT) e mogno (iLPFM), pastagem (PT e PM) e área de controle (capoeira). Quadros a superiores mostram a Ts (a esquerda) e EFCO₂ (a direita) em ILPF com Mogno. Quadros inferiores com a Ts (a esquerda) e EFCO₂ (a direita) em ILPF com Teca.



Foram realizadas correlações de Pearson para avaliar a influência das variáveis ambientais físicas com o EFCO₂ as análises para o período estudado (chuvoso) são apontados na Tabela 3 para o iLPF com teca e na Tabela 4 para o ILPF com mogno.

A umidade do solo correlacionada positivamente de forma fraca na base da teca e na área de transição e moderada entre tecas e negativamente no pasto pelas mesmas razões citadas para a precipitação. No caso da temperatura do solo não foi observada correlação positiva para a área em questão, apenas de forma moderada na área controle.

Tabela 3 - Correlação de Pearson entre o EFCO_2 ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) e variáveis ambientais umidade do solo (Us), temperatura do solo (Ts), precipitação (mm) e temperatura do ar (T_{ar}) em iLPF com mogno em quatro pontos (BT - Base Teca, EPT - Entre plantas, TT - Transição área florestal e pasto e PT - Pasto Teca) e área controle (capoeira).

Tratamento		Ts (%)	Us (°C)
BT	EFCO_2	-0,558* (p=0,0981)	0,389* (p=0,169)
	Ts (°C)	1	-0,238* (p=0,412)
	Us (%)		1
	Precipitação (mm)		
	T_{ar} (°C)		
EPT	EFCO_2	-0,153* (p=0,602)	0,508* (p=0,0635)
	Ts (°C)	1	-0,118* (p=0,689)
	Us (%)		1
	Precipitação (mm)		
	T_{ar} (°C)		
TT	EFCO_2	-0,0572* (p=0,0409)	0,321* (p=0,263)
	Ts (°C)	1	-0,192* (p=0,530)
	Us (%)		1
	Precipitação (mm)		
	T_{ar} (°C)		
PT	EFCO_2	0,0144* (p=0,971)	-0,311* (p=0,415)
	Ts (°C)	1	-0,396* (p=0,291)
	Us (%)		1
	Precipitação (mm)		
	T_{ar} (°C)		
Capoeira	EFCO_2	0,654* (p=0,006)	-0,563* (p=0,0232)
	Us (%)	1	-0,925* (p=0,0000)
	Ts (°C)		1
	Precipitação (mm)		
	T_{ar} (°C)		

*Coeficiente de correlação linear de Pearson; #p<0,050

Em áreas florestada o impacto das gotas pode ter sofrido interferência do dossel e talvez por essa razão ter apresentado menores relações. Davidson e Janssens (2006) relatam que o equilíbrio hidrológico impulsionado pelo clima entre a drenagem, a precipitação e a evapotranspiração determina a espessura do filme de água no solo, por meio do qual ocorre a difusão de substratos orgânicos solúveis e carbono e enzimas extracelulares. Contudo o excesso de água pode inferir nos resultados encontrados durante estudos realizados durante o período chuvoso, ou com ocorrência de chuvas.

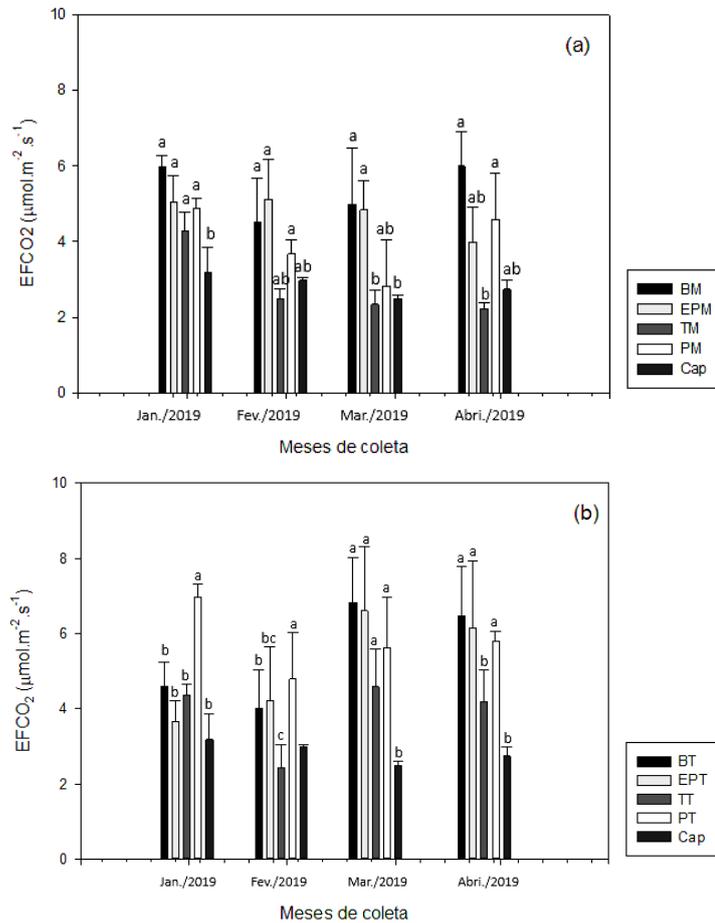
Nas análises não foram encontradas correlações positivas do $EFCO_2$ com a umidade do solo em nenhum dos pontos estudados na área do mogno. Melling, Hatano e Goh (2005) explica que a umidade do solo é o principal responsável pela atividade microbiana do solo interferindo na difusão do gás porque a água substitui o ar no espaço poroso do solo. Como pode ter ocorrido no presente experimento. Por sua vez foi encontrada uma relação fraca da T_s com área entre as árvores. Peng et al. (2009) em revisão de literatura aponta que um aumento na temperatura do solo causa um aumento no $EFCO_2$ devido a alterações na respiração da raiz e nas taxas de decomposição da matéria orgânica. Nesse ponto entre plantas e no outro de transição há o somatório de raízes do pasto e da espécie florestal e embora o período chuvoso não forneça altas temperaturas pela maior presença de nuvens podem haver condições outras que corroborem com essa relação.

Tabela 4 - Correlação de Pearson entre o EFCO_2 ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) e variáveis ambientais umidade do solo (Us), temperatura do solo (Ts), precipitação (mm) e temperatura do ar (T_{ar}) em iLPF com mogno em quatro pontos (BM - Base Mogno, EPM – Entre plantas, TM – Transição área florestal e pasto e PM – Pasto Mogno) e área controle (capoeira).

Tratamento		Ts(°C)	Us (%)
BM	EFCO ₂	-0,200* (p=0,494)	-0,234* (p=0,420)
	Us (%)	1	-0,412* (p=0,143)
	Ts (°C)		1
	Precipitação (mm)		
	T _{ar} (°C)		
EPM	EFCO ₂	0,234* (p=0,441)	-0,243* (p=0,402)
	Us (%)	1	-0,111* (p=0,718)
	Ts (°C)		1
	Precipitação (mm)		
	T _{ar} (°C)		
TM	EFCO ₂	0,0741* (p=0,810)	-0,766* (p=0,001)
	Us (%)	1	-0,493* (p=0,0871)
	Ts (°C)		1
	Precipitação (mm)		
	T _{ar} (°C)		
PM	EFCO ₂	-0,100* (p=0,783)	-0,580* (p=0,0482)
	Us (%)	1	0,149* (p=0,681)
	Ts (°C)		1
	Precipitação (mm)		
	T _{ar} (°C)		
Capoeira	EFCO ₂	0,654* (p=0,006)	-0,563* (p=0,0232)
	Us (%)	1	-0,925* (p=0,0000)
	Ts (°C)		1
	Precipitação (mm)		
	T _{ar} (°C)		

*Coeficiente de correlação linear de Pearson; #p<0,050

Figura 6 - Análise de variância ($p \leq 0,05$) em iLPF mogno (a) e teca (b). As barras correspondem a \pm o erro padrão. Médias ($n=4$) seguidas de mesma letra minúsculas comparam os sistemas em cada coleta, mesma letra não difere entre si pelo teste Tukey 5%. Durante um período de coleta (08:00) no ano de 2019.



É importante salientar que durante o mês dezembro não foram realizadas coletas na parcela controle em razão dos anéis terem sido colocados a menos de mês par amenizar erros na coleta, em razão do solo ter sido perturbado. Na figura 6 é possível observar que durante as coletas realizadas em janeiro, fevereiro e março de 2019 no sistema iLPF teca o pasto foi diferente de todos os outros pontos observados. E durante os meses de março e abril a base da teca passa a ser diferente dos demais tratamentos, mas igual ao pasto.

A base do mogno foi significativamente diferente de todos os tratamentos e igual ao pasto durante os meses de 2019 estudados.

4. CONCLUSÕES

Sistemas iLPF podem ter comportamento diferente dependendo da espécie utilizada. No iLPF mogno houve maior correlação do EFCO₂ com a Ts entre mognos. Em área de iLPF com teca houve maior correlação do EFCO₂ com a precipitação e conseqüentemente com o U_s. Na área controle a Ts foi a variável ambiental mais correlacionada com EFCO₂.

As menores variações de temperatura do solo foram encontradas na capoeira seguida do iLPF mogno na área sombreada (Base mogno e entre plantas mogno). As maiores variações de Ts no período estudado (chuvoso) ocorre na área de iLPF com teca.

As árvores influenciam na dinâmica de CO₂ quando não estão distribuídas em área florestal. Nesse Sistema foi observado que os maiores valores de perda de CO₂ ocorreram na área sombreada em ambos os sistemas com exceção da pastagem de iLPF teca até o momento antes do pastoreio animal ocasionando pela compactação do solo e perda da área foliar.

AGRADECIMENTOS

À Embrapa Amazônia Oriental, campo experimental de Terra Alta – PA pelo apoio humano e das acomodações durante o período de realização das campanhas. E a Embrapa Amazônia Oriental pelo apoio logístico no deslocamento para realização das observações.

E à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela concessão da bolsa de estudos durante o doutoramento. E a Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação por meio do recurso financeiro do Programa de Apoio Pedagógico (PROAP), para realização das viagens de coleta de dados.

REFERÊNCIAS

ALBRECHT, A.; KANDJI, S.T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agric. Ecosyst. Environ.*, v. 99, p. 15-27, 2003.

ALVARENGA, R. C.; PORFÍRIO-DA-SILVA, V.; GOLTIJO NETO, M. M.; VIANA, M. C. M.; VILELA, L. Sistema Integração Lavoura-Pecuária-Floresta: condicionamento do solo e intensificação da produção de lavouras. Informe agropecuário, Belo Horizonte, v. 31, n. 257, p. 1-9, 2010.

BACH, L.H.; GRYTNES, J.A.; HALVORSEN, R.; OHLSON, M. Tree influence on soil microbial community structure. *Soil Biol. Biochem.*, v.42, n.11, p. 1934-1943, 2010.

BALBINO, L. C.; CORDEIRO, L. A. M.; MARTÍNEZ, G. B. Contribuições dos sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta (ilpf) para uma agricultura de baixa emissão de carbono. *Revista brasileira de geografia física*, Pernambuco, v. 05, p. 1014 -1026, nov. 2011.

CARVALHO, J. L.N.; RAUCCI, G. S.; FRAZAO, L. A.; CERRI, C.E.P.; BERNOUX, M.; CERRI, C. C. Crop-pasture rotation: a strategy to reduce soil greenhouse gas emissions in the Brazilian Cerrado. *Agriculture, Ecosystems & Environment*. v.183, p.167–175, 2014.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J.C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de seqüestro de carbono em diferentes biomas do Brasil: uma revisão de literatura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v. 34, p.277-289, 2010.

COSTA, N. de L. Formação, manejo e recuperação de pastagens em Rondônia. Porto Velho: Embrapa Rondônia, 2004. 215p.

EHRENBERGEROVÁ, L.; CIENCIALA, E.; KUČERA, A.; GUY, L.; HABROVÁ, H. Carbon stock in agroforestry coffee plantations with different shade trees in Villa Rica, Peru. *Agroforest. Syst.*, v. 90, n. 3, p. 433-445, 2016. DOI 10.1007/s10457-015-9865-z.

EMBRAPA. Integração Lavoura-Pecuária-Floresta (iLPF), 2014.

EMBRAPA . Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. ver. atual. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

FEARNSIDE, P.M. Greenhouse gases from deforestation in Brazilian Amazonia: net committed emissions. *Climate Change*, Netherlands, v.33, n.5, p.321-369, 1997.

GAMA, J.R.N.F.; RODRIGUES, T. E.; CARDOSO JUNIOR, E.Q. *Levantamento dos solos e uso atual do campo experimental de Terra Alta, Pará*. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2000. 34p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 45).

GIVNISH, T.J. Adaptation to sun and shade: a wholeplant perspective. *Australian Journal of Plant Physiology*, Stuttgart, v.15, p.63-92, 1988.

HOGBERG, P. *et al.* High temporal resolution tracing of photosynthate carbon from the tree canopy to forest soil microorganisms. *New Phytol.*, v.177, n. 1, p. 220-228, 2008.

HYNES, R.J.; WILLIAMS, P.H. Nutrient cycling and soil fertility in grazed pasture ecosystem. *Advances in Agronomy*, New York, v.49, p.119-199, 1993.

Van't HOFF, J.H. *A físico-química de Jacobus van't Hoff*. Disponível em: <https://blog.enem.com.br/fisico-quimica-de-jacobus-vant-hoff/>. Acesso em: 21/06/2019

KATAYAMA, A. *et al.* Effect of forest structure on the spatial variation in soil respiration in a Bornean tropical rainforest. *Agric. For. Meteorol.*, v.149, n. 10, p. 1666-1673, Oct. 2009.

MELLING, L.; HATANO, R.; GOH, K.J. Soil CO flux from three ecosystems in tropical peatland of Sarawak, Malaysia. *Tellus B*, v. 57, n. 1, p. 1-11, 2005.

PENG, S.; PIAO, S.; WANG, T.; SUN, J.; SHEN, Z. Temperature sensitivity of soil respiration in different ecosystems in China. *Soil Biol. Biochem.*, v. 41, n. 5, p.1008–1014, 2009.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRÍCIO, A.C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, D.L. Teor e dinâmica do carbono no solo em sistemas de integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v. 46, p.1349– 1356, 2011.

SENAPATI, N.; JANSSON, P. E.; SMITH, P.; CHABBI, A. Modelling heat, water and carbon fluxes in mown grassland under multi-objective and multi-criteria constraints. *Environmental Modelling & Software*, Oxford, v. 80, n. 6, p. 201-224, 2016.

SMITH, P.; MARTINO, D.; CAI, Z.; GWARY, D.; JANZEN, H.H.; KUMAR, P.; MCCARL, B.; OGLE, S.; O'MARA, F.; RICE, C.; SCHOLLES, R.J.; SIROTENKO, O.; HOWDEN, M.; MCALLISTER, T.; PAN, G.; ROMANENKOV, V.; SCHNEIDER, U.; TOWPRAYOON, S.; WATTENBACH, M.; SMITH, J.U. Greenhouse gas mitigation in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, Londres, v. 363, n. 2, p.789-813, 2008.

CAPÍTULO 4 CONCLUSÃO GERAL

4.1 Resultados chave: impactos e implicações

No capítulo 2 referente ao trabalho realizado em monocultivo de palma de óleo com híbridos interespecíficos. Foi observada uma variação espacial e temporal na área amostrada. Em relação a variação espacial, o ponto referente a deposição de folhas obteve maiores valores de EFCO₂, em relação aos dois outros pontos coletados (base da planta e carreador) em todos os meses de coleta. Em relação ao tempo, os períodos chuvosos apresentaram as maiores médias de EFCO₂ em relação ao período menos chuvoso.

Os fatores ambientais influenciaram no EFCO₂. A temperatura do solo (Ts) apresentou correlação moderada com os pontos empilhamento e carreador e fraca na base da palma de óleo. Durante o período menos chuvoso foram observadas as maiores interações com a temperatura do solo. No período menos chuvoso essa interação foi menor. Em relação a precipitação foi observada uma correlação fraca com base da palma, e muito fraca com o empilhamento e o carreador. No primeiro caso dada a arquitetura da palma. Já em relação ao empilhamento a barreira das folhas se tornam barreira para as gotas de chuva e no caso do carreador o solo compactado foi impeditivo para infiltração da água.

A umidade do solo (Us) foi correlacionada negativamente com o EFCO₂ do empilhamento e carreador pelas mesmas razões comentadas para a precipitação.

No capítulo 3, onde foi apresentado um sistema integrado de lavoura pecuária e floresta (iLPF) como alternativa para recuperação de pastagens degradadas. Foi possível observar que sistemas iLPF podem ter comportamento diferente dependendo da espécie utilizada. No iLPF mogno houve maior correlação do EFCO₂ com a Ts entre mognos. Em área de iLPF com teca houve maior correlação do EFCO₂ com a precipitação e consequentemente com o Us. Na área controle a Ts foi a variável ambiental mais correlacionada com EFCO₂. As menos variações de temperatura do solo foram encontradas na capoeira seguida do iLPF mogno na área sombreada (Base mogno e entre plantas mogno). As maiores variações de Ts no período estudado (chuvoso) ocorre na área de iLPF com teca.

As árvores influenciam na dinâmica de CO₂ quando não estão distribuídas em área florestal. Nesse Sistema foi observado que os maiores valores de perda de CO₂ ocorreu na área sombreada em ambos os sistemas com exceção da pastagem de iLPF teca até o momento antes do pastoreio animal.

do ponto de vista econômico, esses sistemas têm maior rentabilidade para o produtor, tendo

em vista que numa mesma área sua produtividade multiplicaria pela diversidade de produtos obtidos. Além disso, com maior diversidade de espécies vegetais e a demanda de trabalho no campo, durante o ano todo, proporcionando melhoria da qualidade de vida. Entretanto, todas essas qualidades promovidas pelos sistemas iLPF podem diferenciar de um sistema para outro, tendo assim a necessidade de serem quantificadas para poderem ser utilizadas como modelos mais precisos de êxito no setor.

4.2 Prioridades para pesquisas futuras

Para continuidades da pesquisa é recomendado que variáveis ambientais biológicas sejam levadas em conta. Uma vez que as variáveis estudadas (Ts e Us) responderam apenas 33% (trinta e três por cento) do incremento do EFCO₂ durante o período menos chuvoso em monocultivo de palma de óleo. Estudos voltados para o balanço de carbono nesse tipo de sistema poderão contribuir para melhor compreensão do potencial dessa cultura. De acordo com Thornley et al. (2001) as restrições à decomposição da matéria orgânica do solo são causadas por processos biológicos e químicos que devem ser afetadas pela temperatura. Com isso a temperatura influenciaria em tais processos.

Nesses casos, é sugerido que novas pesquisas sejam realizadas com o objetivo de avaliar outros tipos de sistema agrícolas, pois isso poderá contribuir para o entendimento das alterações causadas pela mudança do uso da terra a longo prazo e para o desenvolvimento de estratégias sustentáveis de manejo do solo para adaptação as mudanças climáticas.

Nos sistemas iLPF há um campo vasto a ser explorado, em especial na Amazônia, onde os trabalhos são escassos. Para continuidade da pesquisa são recomendadas, análises em mais dois outros períodos para resultados relacionados a variabilidade espacial. No presente estudo foram realizadas análises durante o período chuvoso devido a experimento anterior, voltado a variação diária do CO₂, ter apontado maiores variações de EFCO₂ (efluxo de CO₂).

Para explicar o comportamento do EFCO₂ mais variáveis em especial biológicas e físico-químicas do solo podem complementar o entendimento da dinâmica desse gás no solo.

4.3 Considerações finais

Davidson e Janssens (2006) em um artigo de revisão explicam que tanto o clima quanto o manejo afetam a formação de agregados (através do crescimento de hifas fúngicas e atividade da fauna do solo), que protege fisicamente a matéria orgânica do solo (MOS). A decomposição de agregados também pode ser enzimática (SOLLINS;

HOMANN; CALWELL, 1996), pois a "cola" biogênica que mantém os agregados juntos é decomposta. Além disso, no entanto, processos puramente físicos, como a aragem e o impacto das gotas de chuva, também destroem os agregados (SOLLINS; HOMANN; CALWELL, 1996). Esses processos não são diretamente dependentes da temperatura, mas são frequentemente influenciados pelo clima.

A temperatura afeta os processos químicos de adsorção e dessorção de MOS em superfícies minerais, mas pouco se sabe sobre as energias de ativação desses processos (DAVIDSON; JANSSENS, 2006).

O equilíbrio hidrológico impulsionado pelo clima entre a drenagem, a precipitação e a evapotranspiração determina a espessura do filme de água no solo, por meio do qual ocorre a difusão de substratos orgânicos solúveis e carbono e enzimas extracelulares. Da mesma forma, a hidrofobicidade da serapilheira associada a ecossistemas suscetíveis a secas e propensos a incêndios também é afetada pelo clima (DAVIDSON; JANSSENS, 2006).

REFERÊNCIAS

- ARAÚJO, M.S.M. de. *Relatório de análise de desenvolvimento limpo – MDL*. [Rio de Janeiro]: ANEEL; PPE/COPPE/UFRJ, 2000. Disponível em: <http://www.ivig.coppe.ufrj.br/doc/r1parte2d.pdf>. Acesso em: 21 de junho de 2019.
- CARBON SEQUESTRATION IN AGRICULTURAL SOILS - CSAS. Agriculture and rural development. *Report no. 67395-GLB*, The World Bank, 2012. p. 43-50.
- CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA - CEPEA. *Perspectiva para o Agronegócio em 2015*. Piracicaba, Janeiro 2015.
- CORLEY, R. H. V.; TINKER, P. B. *The oil pal*. 5. ed. Chichester: John & Sons Ltd., 2016. 68p.
- DAVIDSON, E. A.; JANSSENS, I. A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change. *Nature*, v. 440, p.165-173, 2006.
- DAVIDSON, E.A.; SAVAGE, K.; VERCHOT, L.V.; NAVARRO, R. Mimimizing 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. van; BERENDSE, F. Plant species richness regulates soil respiration through changes in productivity. *Oecologia*, v. 163, n. 3, p. 805–813, 2010.
- DIAS-FILHO, M. B. *A fotossíntese e o aquecimento global*. Belém, 2006. 24 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 234).
- GRAHAM, E. A.; LAM, Y.; YUEN, E. M. Forest understory soil temperatures and heat flux calculated using a Fourier model and scaled using a digital camera. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.150, p.640-649, 2010.
- HANSEN, J.; KHARECHA, P.; SATO, M.; MASSON-DELMOTTE, V.; ACKERMAN, F.; BEERLING, D.J.; HEARTY, P. J.; HOEGH-GULDBERG, O.; HSU, S. L.; PARMESAN, C.; ROCKSTROM, J.; ROHLING, E.J.; SACHS, J.; SMITH. P.; STEFFEN, K; VAN SUSTEREN, L; VON SCHUCKMANN, K.; ZACHOS, J.C. *In: AÑEL, J.A. (ed). Assessing dangerous climate change: required reduction of carbon emissions to protect young people, future generations and nature*. PLoS ONE 8 (12): e 81648, 2013.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. *IPCC 2014: 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 [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Summary for policymakers. In: SOLOMON, S.; QIN, D.; MANNING, M.; CHEN, Z.; MARQUIS, M.; AVERYT, K. B.; TIGNOR, M.; MILER, H. L. (ed.). *Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of working group I to the fourth assessment report on the intergovernmental panel on climate change*. Cambridge: United Kingdom; New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2007. p. 1-18.

JIANG, Y.; ZHANG, J.; XU, X.; DONG, Z. A GPP assimilation model for the southeastern Tibetan Plateau based on CO₂ eddy covariance flux tower and remote sensing data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, Enschede, v. 23, n. 8, p. 213–225, 2013.

KHAN, S.A.; KUMAR, K.; HUSSAIN, M.Z.; KALRA, N. Climate change, climate variability and Indian agriculture: impacts vulnerability and adaptation strategies. In: SINGH, S. N. (ed.). *Climate change and crops, enviromental science and engineering*. Berlin: Springer-Verlage; Heidelberg: Springer, 2009. p. 19-38.

LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, v. 304, p. 1623, 2004.

LIU, X.; WAN, S.; SU, B.; HUI, D.; LUO, Y. Response of soil CO₂ effl ux to water manipulation in a tallgrass prairie ecosystem. *Plant and Soil*, v. 240, p. 213–223, 2002.

LUO, Y.; ZHOU, X. Importance and roles of soil respiration. In: LUO, Y. ; ZHOU, X. (ed). *Soil respiration and the environment*. San Diego, CA.: Academic Press; Elsevier, 2006. p. 17–28.

MACHADO, P. L. O. de A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. *Quim. Nova*, v. 28, n. 2, p. 329-334, 2005. Conferência proferida na 27^a Reunião Anual da SBQ, Salvador de 2004.

ORGANIZAÇÃO PARA A ALIMENTAÇÃO E AGRICULTURA- FAO. 2050: A third more mouths to feed. 2011. Disponível em: <http://www.fao.org/news/story/en/item/35571/icode>. Acesso em: 10 de junho de 2019.

PAINKRA, G.P.; BHAGAT, P.K.; JHARIYA, M.K.; YADAV, D.K. Beekeeping for poverty alleviation and livelihood security in Chhattisgarh, India. In: SARJU, N.; KUMAR, R. S. (ed). *Innovative technology for sustainable agriculture development*. New Delhi, India: Biotech Books, 2016. p.429-453.

PADGHAM, J. *Agricultural development under a changing climate: opportunities and challenges for adaptation: agriculture and rural development and environment departments*. Joint Departmental Discussion Paper- Issue 1, p.1-198, 2009. (Working Paper).

RAJ, A.; JHARIYA, M. K.; BARGALI, S. S. Climate smart agriculture and carbon sequestration. *Climate Change and Agroforestry*, p. 1-19, 2017.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. *Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações*. 2. ed. Barueri, SP: Manole, 2012.

RYAN, M. G.; LAW, B. E. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, v. 73, n. 1, p. 3-27, 2005.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B. A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. *Geoderma*, v. 74, p. 65–105, 1996.

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*, Oxford, v. 10, n.5, p.610-617.

THORNLEY, J. H. M.; CANNELL, M. G. R. Soil carbon storage response to temperature: an hypothesis. *Ann. Bot. Lond.* v. 87, p. 591–598, 2001.

WATSON, R. T.; NOBLE, I. R.; BOLIN, B.; RAVINDRANATH, N. H.; VERARDO, D. J.; DOKKEN, D. J. *Land use, land-use change, and forestry: a special report of the IPCC*. Cambridge: IPCC: Cambridge University Press, 2000. 377 p.

WIGLEY, T. M. L.; SCHIMMEL, D. S. *The carbon cycle*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. 292 p. (Global Change Institute, v. 6).

XU, L.; BALDOCCHI, D. D.; TANG, J. How soil moisture, rain pulses, and growth alter the response of ecosystem respiration to temperature. *Global Biogeochemical Cycles* v. 18, GB4002, 2004. doi: 10.1029/2004GB002281.

APENDICE A - CROQUI DA ÁREA DE ESTUDO EM TERRA ALTA, PA, BRASIL.

