



Universidade Federal do Pará
Instituto de Geociências
Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais

KELLY REGINA DA SILVA PANTOJA

**INDICADORES DE CARBONO DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS
COM POTENCIAL DE USO EM PROCESSO DE TRANSIÇÃO PRODUTIVA
AGROECOLÓGICA**

Belém-PA

2018

KELLY REGINA DA SILVA PANTOJA

**INDICADORES DE CARBONO DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS
COM POTENCIAL DE USO EM PROCESSO DE TRANSIÇÃO PRODUTIVA
AGROECOLÓGICA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais, do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará, em convênio com a Embrapa Amazônia Oriental-EMBRAPA e o Museu Paraense Emílio Goeldi-MPEG, para obtenção do título de Mestre em Ciências Ambientais.

Área de concentração: Clima e Dinâmica Socioambiental na Amazônia

Linha de pesquisa: Ecossistemas Amazônicos e Dinâmicas Socioambientais

Orientador: Steel Silva Vasconcelos

Belém-PA

2018

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

P198i Pantoja, Kelly Regina da Silva
Indicadores de carbono do solo em sistemas agroflorestais com potencial de uso em processo de transição produtiva agroecológica / Kelly Regina da Silva Pantoja. — 2018
84 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Ciências Ambientais (PPGCA), Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2018.
Orientação: Prof. Dr. Steel Silva Vasconcelos

1. Sistemas agrícolas - Pará - Nordeste. 2. Carbono. 3. Ecologia humana - Pará - Nordeste. 4. Ecologia agrícola - Pará - Nordeste. I. Título

CDD 631.4098115

KELLY REGINA DA SILVA PANTOJA

**INDICADORES DE CARBONO DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS
COM POTENCIAL DE USO EM PROCESSO DE TRANSIÇÃO PRODUTIVA
AGROECOLÓGICA**

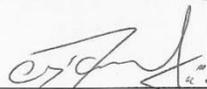
Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em parceria com o Museu Paraense Emílio Goeldi e a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária da Amazônia Oriental, como requisito para obtenção do título de Mestra em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

Data de aprovação: 18/04/2017

Banca Examinadora:



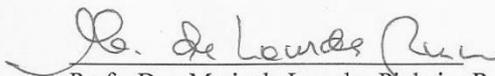
Prof. Dr. Steel Silva Vasconcelos - Orientador
Doutor em Recursos e Conservação Florestais
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária



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



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



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

Dedico aos meus pais Regina do Carmo Pantoja e Benedito de Castro Pantoja.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por mais uma etapa concluída e que, mesmo diante dos obstáculos, renovou minha fé.

Aos meus pais Regina e Benedito, por todo carinho, auxílio e por sempre me apoiarem na busca do conhecimento, sem medir esforços para que eu pudesse estudar (e realizar meus sonhos).

Ao meu querido irmão Thiago, por toda ajuda, paciência, amizade, dedicação, risadas e incentivos.

À minha avó Maria da Conceição, meu exemplo de força e mulher, obrigada por sempre me colocar em suas orações.

Ao Dr. Steel Vasconcelos, pela paciência e orientação.

Ao Dr. Alysson Baizi, pelos conselhos e por dividir comigo seus conhecimentos.

Aos funcionários do Laboratório de Análise de Sistemas Sustentáveis, em especial a Neusa Ferreira, Ivanildo Trindade, Cleo Souza, José Maria de Souza e Milton Nascimento.

À Fabiola Fernandes, pela amizade, conselhos, carinho, ensinamento e por alegrar meus dias com as histórias da Remi. Muito obrigada por tudo minha amiga!

À Saime Rodrigues, pelo apoio e contribuições para a realização deste trabalho.

À minha amiga Ana Paula Potter Danin, por toda ajuda na minha estatística (risos), pela amizade, irmandade, momentos de risadas e por aliviar (ou embarcar) meus momentos de bad.

À Leila de Jesus (minha gêmea), pelos momentos alegres, amizade, estando sempre disposta a me ajudar.

Ao meu grande amigo/irmão Luiz Neves, por todo apoio, conselhos, ensinamentos, orações, por me colocar no eixo e não me deixar desistir durante os momentos mais difíceis.

Aos amigos Duber, Amanda, Mayara, Thaís, Karina, Marina, Raqueline, Jhon, Jakeline, Vanessa, Diele, Mari, Nívia, Susane, Andreize e Hayllana pelo apoio, carinho e parceria.

Aos colegas Marilza, Claudiene, Sandro, Wanessa e Jean pelo auxílio.

A Embrapa Amazônia Oriental e ao projeto Transição Produtiva e Serviços Ambientais, pela estrutura e apoio na realização da pesquisa.

Aos produtores Sr. Manoel, Sr. Michinori Konogano e Sr. Manoel Carmo, pela permissão do desenvolvimento da pesquisa nas suas propriedades..

Por fim, a todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

“Mudas, em silêncio, florescem”.
(autor desconhecido)

RESUMO

Os sistemas de produção tradicional tem se mostrado insustentável, no âmbito socioeconômico e ambiental. A adoção de uma agricultura menos agressiva ao ambiente, apresenta-se como uma alternativa, para conservação do ecossistema. O processo de mudança de um manejo tradicional para um alternativo é chamado de transição produtiva. O trabalho teve como objetivo avaliar os indicadores de carbono do solo em sistemas de produção tradicional e alternativos, em áreas de transição produtiva agroecológica. O estudo foi desenvolvido em propriedades agrícolas familiares, localizados nos municípios de Igarapé-Açu e Tomé-Açu, nordeste paraense. Foram selecionados sistemas tradicional (corte-e-queima) e alternativo (corte-e-trituração e SAFs), além de florestas secundária e primária (usadas como área de referência). Foram analisados os estoques de serrapilheira, e estoques de carbono no solo, fração densimétrica da matéria orgânica do solo e serrapilheira. Além da avaliação do potencial do estoque de carbono como subsídio para estimar serviços ambientais. O sistema corte-e-trituração apresentou o maior estoque de serrapilheira e estoque de carbono na serrapilheira, enquanto que os SAFs não diferiram estatisticamente das áreas de referência. Quanto ao estoque de carbono no solo e na fração densimétrica da matéria orgânica do solo, não houve diferença significativa dos sistemas e áreas de referências. Os sistemas alternativos apresentaram grande capacidade em estocar carbono. A quantificação do estoque de carbono (solo e serrapilheira) e o estoque de serrapilheira demonstraram potencial como indicadores para subsidiar a prestação de serviços ambientais, assim como atestar a qualidade dos sistemas de agroecossistemas.

Palavras-chave: Serviços ambientais. Sistemas agropecuários. Estoque de carbono.

ABSTRACT

Traditional production systems have proved to be unsustainable in the socioeconomic and environmental spheres. A less aggressive agriculture is an alternative for the conservation of ecosystems. The process of changing from a traditional management for an alternative one is called a productive transition. The objective of this study was to evaluate soil carbon indicators in traditional and alternative production systems in areas of agroecological productive transition. The study was conducted in family farms located in Igarapé-Açu and Tomé-Açu, municipalities of the northeast of Pará. Traditional (slash-and-burn) and alternative (cut-and-grind and AFS) systems were selected, as well as secondary and primary forests (used as a reference area). The litter stocks, carbon stocks in the soil, densimetric fraction of soil organic matter and litter were analyzed. Also, an evaluation of the potential of the carbon stock as a subsidy to estimate environmental services was made. The cut-and-grind system presented the highest litter stock and carbon stock in the litter, while the AFS did not differ from reference areas. For the carbon stock in the soil and the densimetric fraction of soil organic matter no significant differences were found between the systems and the reference areas. Alternative systems had a large capacity to store carbon. The quantification of carbon stocks (soil and litter) and the stock of litter shows potential as an indicator to subsidize the provision of environmental services, as well as certify the quality of agroecosystems.

Key-words: Environmental services. Agricultural systems. Stock carbon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 Modelo esquemático do ciclo global do carbono. Os números representam a quantidade de carbono transportada por processos naturais, antrópicos e as estimativas da quantidade de carbono estocado (em Gt- Gigatonela). 27
- Figura 2 Ciclo do Carbono..... 28
- Figura 3 Serviços ambientais de acordo com sua categoria. 35
- Figura 4 Mapa do estado do Pará com destaque dos municípios de Igarapé-Açu, Tomé-Açu e comunidade de Santa Luzia, nordeste paraense.38
- Figura 5 Áreas onde foram conduzidas as pesquisas nos municípios de Igarapé-Açu (corte-e-queima, corte-e-trituração e floresta secundária – FS1), Tomé-Açu (SAF1, SAF2, SAF3, floresta secundária – FS2 e floresta primária – FP) e comunidade de Santa Luzia (SAF4, SAF5 e floresta secundária – FS3), nordeste paraense. 43
- Figura 6 Grade metálica utilizada para coleta do estoque de serrapilheira. ... 44
- Figura 7 Coleta de amostras para determinação do estoque de carbono do solo: (A) trincheira para coleta de amostras indeformadas, (B) retirada de amostras indeformadas com anel volumétrico para determinação da densidade do solo, e (C) coleta de amostras deformada com trado para determinação do teor de carbono do solo. 45
- Figura 8 Fração leve livre nas três profundidades (cm) do solo. 46
- Figura 9 Estoque de frações de serrapilheira em sistemas agrícolas (corte-e-trituração e corte-e-queima) e floresta secundária (FS1), no município de Igarapé-Açu, PA. Letras diferentes indicam diferença significativa entre sistemas, para uma dada fração da serapilheira, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média (n=3). 49
- Figura 10 Estoque de frações de serrapilheira em sistemas agroflorestais (SAFs) e florestas secundária (FS2) e primária (FP), no município de Tomé-Açu, PA; SAF3: 2 anos; SAF2: 8 anos; SAF1: 15 anos. Letras

diferentes indicam diferença significativa entre sistema, para uma dada fração da serrapilheira, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média ($n=3$)..... 51

Figura 11 Estoque de frações de serrapilheira em sistemas agroflorestais (SAFs) e floresta secundária (FS3), na comunidade de Santa Luzia; SAF5: 8 anos; SAF4: 13 anos. Letras diferentes indicam diferença significativa entre sistemas, para uma dada fração da serrapilheira, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média ($n=3$)..... 52

Figura 12 Variação vertical do teor de carbono das frações (A) leve livre (FLL) e (B) leve oclusa (FLO) em sistemas de produção agrícola (corte-e-queima e corte-e-trituração) e floresta secundária (FS1) no município de Igarapé-Açu, PA. Letras diferentes indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média. 55

Figura 13 Variação vertical do teor de carbono das frações (A) leve livre (FLL) e (B) leve oclusa (FLO) em sistemas agroflorestais (SAFs) e florestas secundária (FS2) e primária (FP) no município de Tomé-Açu, PA. SAF1: 15 anos; SAF2: 8 anos; SAF3: 2 anos. Letras diferentes indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média. 57

Figura 14 Variação vertical do teor de carbono das frações (A) leve livre (FLL) e (B) leve oclusa (FLO) em sistemas agroflorestais (SAFs) e floresta secundária (FS3) na comunidade de Santa Luzia, PA; SAF4: 13 anos; SAF5: 8 anos; Letras iguais não indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média. 59

Figura 15 Variação vertical da (A) densidade do solo e (B) teor de carbono total no solo em sistemas de produção agrícola (corte-e-queima e corte-e-trituração) e floresta secundária (FS1) no município de Igarapé-Açu, PA. Letras diferentes indicam diferença significativa entre sistemas

pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média. 61

Figura 16 Variação vertical da (A) densidade do solo e (B) teor de carbono total no solo em sistemas de agroflorestais (SAFs) e florestas secundária (FS2) e primária (FP) no município de Tomé-Açu, PA; SAF1: 15 anos; SAF2: 8 anos; SAF3: 2 anos. Letras diferentes indicam diferença significativa entre sistemas pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média..... 63

Figura 17 Variação vertical da (A) densidade do solo e (B) teor de carbono total no solo em sistemas agroflorestais (SAFs) e floresta secundária (FS3) na comunidade de Santa Luzia, PA; SAF4: 13 anos; SAF5: 8 anos. Letras diferentes indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média. 65

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 Descrição das espécies, espaçamento e idade dos sistemas estudados..... 42
- Tabela 2 Média do estoque de carbono da serrapilheira, \pm erro padrão ($n=3$), em sistemas agrícolas (corte-e-trituração e corte-e-queima) e floresta secundária (FS1), no município de Igarapé-Açu, PA. Letras diferentes, na coluna, indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$)..... 50
- Tabela 3 Média do estoque de carbono da serrapilheira, \pm erro padrão ($n=3$), em sistemas agroflorestais (SAFs) e florestas secundária (FS2 e FS3) e primária (FP), no município de Tomé-Açu e comunidade de Santa Luzia, PA. Letras diferentes indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$); SAF1:15 anos; SAF2: 8 anos; SAF3: 2 anos; SAF4: 13 anos; SAF5: 8 anos..... 53
- Tabela 4 Média do estoque de carbono nas frações leve livre (FLL) e leve oclusa (FLO), \pm erro padrão, nos sistemas agrícolas (corte-e-queima e corte-e-trituração) e floresta secundária (FS1) no município de Igarapé-Açu, PA. Letras diferentes, na coluna, indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). 56
- Tabela 5 Média do estoque de carbono nas frações leve livre (FLL) e leve oclusa (FLO), \pm erro padrão, nos sistemas agroflorestais (SAFs) e florestas secundária (FS2) e primária (FP), no município de Tomé-Açu, PA. Letras diferentes, na coluna, indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$); SAF1: 15 anos; SAF2: 8 anos; SAF3: 2 anos..... 58
- Tabela 6 Média do estoque de carbono nas frações leve livre (FLL) e leve oclusa (FLO), com erro padrão, nos sistemas agroflorestais (SAFs) e floresta secundária (FS3) na comunidade de Santa Luzia, PA. Letras iguais, na coluna, não indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). SAF4: 13 anos; SAF5: 8 anos. 60

- Tabela 7 Média do estoque de carbono no solo, \pm erro padrão, em diferentes profundidades, para os sistemas agrícolas (corte-e-queima e corte-e-trituração) e floresta secundária (FS1) no município de Igarapé-Açu, PA. Letras iguais, na coluna, não indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$)..... 62
- Tabela 8 Média do estoque de carbono no solo, \pm erro padrão, em diferentes profundidades, para os sistemas agroflorestais (SAFs) e florestas secundárias (FS2 e FS3) e primária (FP) no município de Tomé-Açu e na comunidade de Santa Luzia, PA. Letras iguais, na coluna, não indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$); SAF1:15 anos; SAF2: 8 anos; SAF3: 2 anos; SAF4: 13 anos; SAF5: 8 anos..... 66

SUMARIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	22
2.1	Objetivo geral	22
2.2	Objetivos específicos	22
3	HIPÓTESES	23
4	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	24
4.1	Sistemas de produção agropecuária tradicional e alternativo	24
4.2	Carbono no ecossistema	26
4.2.1	Compartimentos de carbono da serrapilheira e do solo.	28
4.2.2	Fatores controladores dos compartimentos de carbono terrestre	30
4.2.2.1	Atividades humanas	30
4.2.2.2	Clima e biota.....	31
4.2.2.3	Textura do solo.....	32
4.2.3	Impactos de sistemas de produção sobre os compartimentos de carbono do ecossistema	32
4.3	Prestação de serviços ambientais em sistemas de produção agropecuária	34
5	MATERIAL E MÉTODOS	38
5.1	Localização das áreas de estudo	38
5.1.1	Município de Igarapé-Açu.....	38
5.1.2	Município de Tomé-Açu.....	39
5.2	Caracterização das áreas de estudo	40
5.2.1	Município de Igarapé-Açu.....	40
5.2.2	Município de Tomé-Açu.....	40
5.2.2.1	Propriedade empresarial	41
5.2.2.2	Propriedade familiar.....	41
5.3	Amostragem de serrapilheira e solo	44
5.3.1	Coletas das amostras de solo	44
5.4	Análise laboratorial	45
5.4.1	Fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS).....	45
5.4.2	Teor de carbono na serrapilheira e no solo	46
5.4.3	Estoque de carbono no solo e na MOS.....	47

5.5	Análise estatística	48
6	RESULTADOS E DISCUSSÃO	49
6.1	Estoque de carbono na serrapilheira	49
6.1.1	Sistemas corte-e-queima e corte-e-trituração.....	49
6.1.2	Sistemas agroflorestais	51
6.2	Estoque de carbono na fração densimétrica da MOS	54
6.2.1	Sistemas corte-e-queima e corte-e-trituração.....	54
6.2.2	Sistemas agroflorestais	57
6.3	Estoque de carbono no solo	60
6.3.1	Sistema corte-e-queima e corte-e-trituração	60
6.3.2	Sistemas agroflorestais	62
6.4	Potencial da quantificação do estoque de carbono como subsídio para estimar serviços ambientais	67
7	CONCLUSÃO	70
	REFERÊNCIAS	71

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, até a década de 1950, o crescimento agrícola ocorria, basicamente, pela expansão da área cultivada. A partir da década de 1960, outros fatores também tiveram importância no aumento da produção agrícola, como a incorporação de novas tecnologias, gerando crescimento econômico. Por outro lado, este novo cenário de produção agrícola aumentou o risco de impacto negativo ao ambiente, principalmente resultante da prática inadequada do manejo do solo e das culturas, e do desmatamento, ocasionando efeitos como redução da biodiversidade, salinização, erosão do solo e contaminação dos recursos naturais (FOLEY et al., 2011; ROSSET et al., 2014).

A intensificação da produção agrícola, a partir dos anos 1960, excluiu a participação de agricultores familiares do processo de desenvolvimento da agricultura, incentivando a produção apenas das grandes propriedades rurais (PEREIRA; NASCIMENTO, 2014). No entanto, a partir de 1990, a síntese dos conflitos políticos e a consolidação do termo “agricultura familiar”, projetaram políticas públicas específicas para o referido segmento rural (PEREIRA; NASCIMENTO, 2014). Assim, durante o final do século XX, o Governo Federal criou o Programa Nacional de Fortalecimento da Agricultura Familiar (PRONAF), que estimulou a geração de renda e maior uso da mão de obra familiar, beneficiando agricultores e produtores rurais (MINATEL; BONGANHA, 2015).

A agricultura familiar é uma forma de produção, geralmente realizada por pequenos produtores rurais, caracterizada pela interação entre gestão e trabalho, desempenhando papel importante como produtora de alimentos, geradora de renda e propulsora de desenvolvimento local (BRITTO; KATO; HERRERA, 2012; MINATEL; BONGANHA, 2015). Na região amazônica, na maioria dos estabelecimentos da agricultura familiar ainda utiliza o sistema de manejo tradicional para produção de culturas anuais (BRITTO; KATO; HERRERA, 2012), que consiste no corte-e-queima da vegetação secundária para o preparo da área para cultivo. Este sistema tradicional é caracterizado por ciclos alternados de cultivo agrícola e abandono de área para (re)crescimento da vegetação secundária (período de pousio). A utilização deste sistema de forma inadequada, isto é, repetidamente com períodos curtos de pousio, geralmente inferiores a sete anos, produz impactos ambientais negativos, como perda

de nutrientes do sistema solo-vegetação, processos erosivos e degradação do solo (PEDROSO-JUNIOR; ADAMS; MURRIETA, 2008).

Os sistemas de produção tradicional, como o corte-e-queima, tem se mostrado insustentável, não apenas no âmbito socioeconômico, mas também pelos impactos ambientais ocasionados pela intensa degradação do solo (ALTIERI, 2012). A adoção de uma agricultura menos agressiva ao ambiente, capaz de proteger os recursos naturais, apresenta-se como uma alternativa para conservação do ecossistema (CAPORAL; COSTABEBER, 2004).

Visando minimizar os impactos sociais, econômicos e, principalmente, ambientais dos sistemas convencionais, surge a agroecologia, direcionando a agricultura sob uma perspectiva ecológica (LIMA; CARMO, 2006). A agroecologia pode ser definida como uma ciência que visa estabelecer bases teóricas para os diferentes movimentos agrícolas alternativos, identificando e propondo alternativas de manejo, buscando diminuir a utilização de insumos químicos e práticas agrícolas intensivas realizadas nos agroecossistemas (ROSSET et al., 2014). Um sistema agroecológico alternativo ao corte-e-queima da vegetação secundária consiste no corte-e-trituração.

O processo de mudança do manejo tradicional para o alternativo (sustentável) tem sido chamado de transição produtiva (LOPES; LOPES, 2011). A transição produtiva é definida como a ampliação da qualidade ambiental de sistemas produtivos no decorrer do tempo, devendo ser utilizada como base para direcionar o setor agropecuário rumo à sustentabilidade (MATTOS, 2006; BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011). Os projetos e políticas públicas voltados à transição produtiva do uso da terra apresentam uma abordagem promissora e útil para a gestão de recursos naturais, em que o pagamento de serviços ambientais torna-se um incentivo econômico à utilização de técnicas e tecnologias para qualificar ambientalmente o processo de transição. Indicadores de serviços ambientais podem servir de parâmetros para comprovar a melhoria na qualidade ambiental dos processos de transição produtiva (COSTANZA, 2008).

Uma opção em processos de transição produtiva são os sistemas produtivos integrados (SPIs), que se referem a sistemas de produção que incorporam atividades agrícola, pecuária ou florestal em áreas produtivas comuns, em cultivo consorciado, sucessão ou rotacionado (BALBINO; BARCELLOS; STONE, 2011; MATTOS; HERCOWITZ, 2011). Os SPIs combinam objetivos de produção agrícola e desenvolvimento sustentável, além de apresentarem maior potencial de fornecer

serviços ambientais, como o sequestro de carbono (SANDERSON et al., 2013; CARVALHO et al., 2014).

As concentrações de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera têm aumentado consideravelmente ao longo de século XXI, apesar de um número crescente de políticas públicas de mitigação das mudanças climáticas (IPCC, 2014). Entre alternativas que diminuem e/ou minimizam a concentração de CO₂ atmosférico está o sequestro do carbono pela biomassa vegetal, e seu estoque no solo (BAY, 2015).

O carbono removido da atmosfera é incorporado à biomassa das plantas (parte aérea e raízes) e solo (formas orgânicas e inorgânicas). A capacidade em sequestrar carbono está relacionada em parte ao incremento em biomassa, ou seja, quanto maior o incremento, mais carbono é removido da atmosfera e incorporado ao sistema solo-planta. No solo, o carbono encontra-se armazenado na matéria orgânica em frações com diferentes tempos de residência, sendo classificadas em frações lábeis e recalcitrantes. A fração lábil apresenta alta taxa de decomposição e curto período de permanência no solo, contribuindo no fornecimento de nutrientes às plantas pela mineralização (SILVA; MENDONÇA, 2007). A fração recalcitrante apresenta maior tempo de permanência no solo, atuando sobre as condições físicas e químicas do solo, além de ser importante no sequestro de carbono (SILVA; MENDONÇA, 2007).

A redução do teor de matéria orgânica do solo (MOS) pode ocasionar efeitos negativos sobre a produtividade das culturas (RAMESH et al., 2015). Certas frações da MOS são importantes na manutenção da qualidade do solo, sendo indicadores mais sensíveis aos impactos das práticas de manejo (CHAN; BOWMAN; OATES, 2001). Os sistemas de manejo, ao aportarem diferentes quantidades de carbono no solo, alteram a labilidade da MOS, ou seja, a proporção de MOS lábil em relação à não-lábil (CARMO et al., 2012).

A adoção de SPIs como, por exemplo, os sistemas agroflorestais (SAFs), que pela consorciação de várias espécies dentro de uma área elevam a biodiversidade do ecossistema, podem ser uma alternativa para a sustentabilidade e um aumento na renda do produtor rural. Os SAFs apresentam-se como sistemas alternativos de produção, estando consolidados em princípios econômicos de uso consciente dos recursos naturais, sob exploração ecológica sustentável, com capacidade de gerar benefícios sociais, porém, sem comprometer o potencial produtivo dos ecossistemas (VALE, 2004). Além disso, quando bem manejados, reduzem as emissões de gases

para a atmosfera, tendo um grande potencial de sequestro de carbono (BAE et al., 2013).

Na Amazônia, a utilização dos SAFs tem se mostrado uma boa opção para os agricultores familiares, pois representam uma nova perspectiva de uso da terra e desenvolvimento rural (CANUTO, 2017). A introdução do SAF tem ocorrido de maneira gradativa, pois romper com um manejo tradicional praticado por décadas torna-se um desafio ao processo de transição produtiva agroecológica (CANUTO, 2017). Entretanto, os impactos ambientais negativos, causados pela agricultura tradicional, têm aumentado de maneira intensa, provocando a degradação dos ecossistemas (ROCHA; PEREIRA; TEIXEIRA, 2014). Assim, ressalta-se a importância de expansão da transição produtiva agroecológica, na adoção de sistemas alternativos de produção de base agroecológica, como os SPIs, pois entre os vários benefícios destes sistemas está o alto potencial de acúmulo de carbono no solo (BALBINO et al., 2011), considerado como indicador-chave para determinar padrões de qualidade do solo (OLIVEIRA; REATTO; ROIG, 2015). No entanto, ainda existem lacunas de informações, instrumentos e metodologias que apoiem políticas públicas de incentivo a SPIs.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Avaliar indicadores de carbono do solo em sistemas de produção tradicional e alternativos, em áreas de transição produtiva agroecológica.

2.2. Objetivos específicos

- Determinar o estoque de carbono no solo, em frações densimétricas da matéria orgânica do solo e na serrapilheira, em sistema tradicional e alternativo de produção agropecuária familiar, e em florestas secundária e primária.
- Avaliar o potencial uso da quantificação do estoque de carbono como subsídio para estimar serviços ambientais.

3. HIPÓTESES

- A transição de um sistema de produção tradicional (corte-e-queima) para um sistema alternativo (corte-e-trituração) causa aumento no estoque de carbono da serrapilheira e solo.
- Sistemas agroflorestais têm capacidade de estocar carbono no solo em quantidades semelhantes às de floresta secundária e primária.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. Sistemas de produção agropecuária tradicional e alternativo

Sistemas de produção agropecuária tradicional são principalmente direcionados ao autoconsumo, apresentando como principais características o emprego de mão de obra familiar, redução ou nenhum uso de insumos e máquinas (SILVA et al., 2015). Outras particularidades desse tipo de produção são os baixos rendimentos e produtividade, e o uso da terra de maneira descontínua e intensa que, em longo prazo, geralmente ocasiona danos ambientais (ADL; IRON; KOLOKOLNIKOV, 2011).

No Nordeste paraense, como em outras regiões tropicais, o corte-e-queima da vegetação secundária é uma prática de preparo de área para plantio muito utilizada na agricultura tradicional. Esse tipo de prática utiliza a queimada da vegetação secundária para o cultivo agrícola (TRINDADE et al., 2011), que se constitui em uma prática de baixo custo e pouca complexidade e é considerada pelos produtores agrícolas como bastante eficaz no preparo da terra antes do plantio, pois elimina a vegetação invasora e a cinza oriunda da queima é rica em nutrientes (MATOS et al., 2012).

No sistema corte-e-queima, o período de cultivo agrícola seguido de um período de pousio (SIMINSKI; FANTINI, 2007), nessa fase, a vegetação secundária cresce novamente a partir de rebrotas de troncos, raízes e sementes, principalmente aquelas que resistem à queima (KATO et al., 1999). Em áreas com grande disponibilidade de florestas onde o produtor pode adotar longos períodos de pousio, para uma regeneração adequada da área abandonada, esse tipo de agricultura pode ser manejada de forma sustentável, sem comprometer drasticamente a fertilidade do solo (PEDROSO-JUNIOR; ADAMS; MURRIETA, 2008). No entanto, quando existe pouca disponibilidade de áreas florestadas, além de uma pressão populacional por alimentos, o produtor necessita retornar à área abandonada antes do período de pousio ter sido suficiente para regeneração da capacidade produtiva do solo. Assim, ocorre uma queda gradativa na produtividade dos cultivos (SILVA; LOVATO; VIEIRA, 2009), visto que as repetitivas queimadas ocasionam perdas na capacidade produtiva do solo (SOMMER et al., 2004).

Fatores como o aumento populacional e a inserção no mercado têm promovido uma intensificação da agricultura tradicional e, conseqüentemente, mudanças no uso e na cobertura do solo (PEDROSO-JUNIOR; ADAMS; MURRIETA, 2008). Essa intensificação agrícola gera a necessidade de práticas de manejo alternativas por parte

dos agricultores para garantir a sustentabilidade do sistema (STYGER et al., 2007). Visando à conservação dos recursos naturais, foram criados sistemas alternativos de produção baseados em princípios agroecológicos. Os sistemas alternativos de produção apresentam como característica principal a utilização de tecnologias que consideram princípios ecológicos, estimulando a preservação dos espaços naturais, reciclagem de nutrientes e conservação da biodiversidade (SANTOS et al., 2013), representando uma agricultura sustentável e que pode gerar benefícios econômicos para o agricultor (SOARES; CAVALCANTE; JUNIOR, 2008).

A partir de uma perspectiva de manejo ecológico dos ecossistemas e na procura de sistemas menos agressivos ao solo, na década de 1990 surgiu o Projeto SHIFT–Capoeira, Estudos do Impacto das Ações Humanas em Florestas e Terras Inundadas dos Trópicos (*Studies of Human Impacts on Forests and Floodplains of the Tropics*), atualmente denominado Projeto Tipitamba, na Embrapa Amazônia Oriental. O principal objetivo do projeto era desenvolver alternativas para substituir o uso da queima no preparo de área por práticas sem uso de queima, como o preparo de área por meio de trituração da vegetação secundária (SANTOS, 2006).

O sistema alternativo, proposto pelo Projeto Tipitamba, compreende o corte-e-trituração mecanizada da vegetação secundária. Essa prática favorece a recuperação gradual do solo por apresentar ofertas de nutrientes e carbono (SAMPAIO; KATO; NASCIMENTO-E-SILVA, 2008). Neste sistema, o solo fica coberto pelo material triturado, apresentando vantagens como regulação térmica do solo, melhor conservação da água, diminuição da erosão, além de favorecer o ambiente para o desenvolvimento de microrganismos envolvidos na ciclagem de nutrientes (SOMMER et al., 2004). Outro ponto positivo, observado no sistema de corte-e-trituração, são as raízes da vegetação secundária, que desempenham papel relevante na ciclagem de nutrientes lixiviados no perfil do solo (WICKEL, 2004).

Os sistemas agroflorestais (SAFs) também constituem uma alternativa de produção agropecuária em que se busca diminuir o efeito da intervenção humana nos sistemas naturais (PEZARICO et al., 2013). Estes sistemas são definidos como práticas de uso da terra em que árvores são plantadas simultaneamente com culturas agrícolas ou pastoris (TAPIA-CORAL et al., 2005), aumentando a diversidade do ecossistema e favorecendo as interações benéficas entre plantas de diferentes ciclos, portes e funções (FEIDEN, 2009). Além disso, melhoram as condições físicas e químicas dos solos, pois o cultivo simultâneo de espécies agrícolas e arbóreas

geralmente aumenta o aporte de matéria orgânica no solo e diminui a erosão (SILVA et al., 2012).

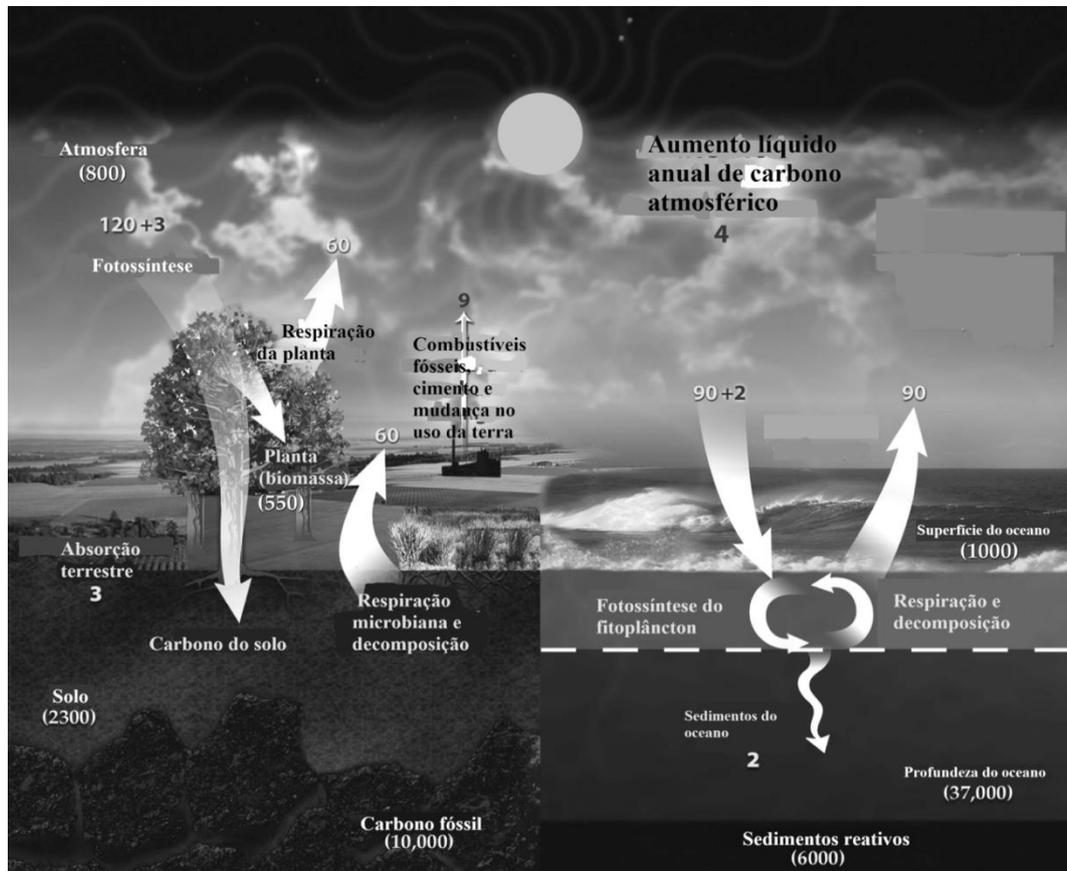
Considerados muito produtivos, os SAFs armazenam grandes quantidades de carbono na biomassa e na matéria orgânica do solo (NEGASH; STARR, 2015). De acordo com SOTO-PINTO et al. (2010) o potencial do SAF em acumular carbono é estimado em 12-228 Mg C ha⁻¹, com uma média de 95 Mg C ha⁻¹. Quanto a sua capacidade de sequestrar carbono, irá depende muito da estrutura e funcionamento do SAF adotado que, em grande parte, é determinado por fatores ambientais e socioeconômicos (ALBRECHT; KANDJI, 2003).

Os SAFs fornecem uma alternativa mais produtiva e sustentável aos sistemas convencionais, além de serviços ecossistêmicos como sequestro de carbono, melhora na qualidade do ar, da água e do solo, além da conservação da biodiversidade (JOSE, 2012). Os SAFs também têm sido muito utilizados para restauração de áreas degradadas; no entanto, a utilização destes sistemas não restaura por completo a estrutura do ecossistema, mas pode auxiliar a recuperar determinadas funções importantes para a sustentabilidade, como, por exemplo, a ciclagem de nutrientes, além de gerar uma renda ou produção de subsistência ao agricultor (SILVA et al., 2012).

4.2. Carbono no ecossistema

O carbono é o elemento presente na maioria do material que constitui o planeta Terra, tanto nas massas fluidas (atmosfera e oceano) como nas sólidas (rocha e solos), além de ser o elemento base do qual se formam todas as moléculas orgânicas (ADUAN; VILELA; REIS JÚNIOR, 2004). Os principais compartimentos de carbono são oceanos, atmosfera, ecossistemas terrestres (biota + solo) e formações geológicas contendo carbono fóssil e mineral (MACHADO, 2005; PEREIRA et al., 2013). Todos esses compartimentos estão interconectados (CARVALHO et al., 2010). A Figura 1 mostra a estimativa da quantidade de carbono estocada nos principais reservatórios e a estimativa do fluxo anual (em GtC – Gigatoneladas de carbono).

Figura 1. Modelo esquemático do ciclo global do carbono. Os números representam a quantidade de carbono transportada por processos naturais, antrópicos e as estimativas da quantidade de carbono estocado (em Gt- Gigatonela).



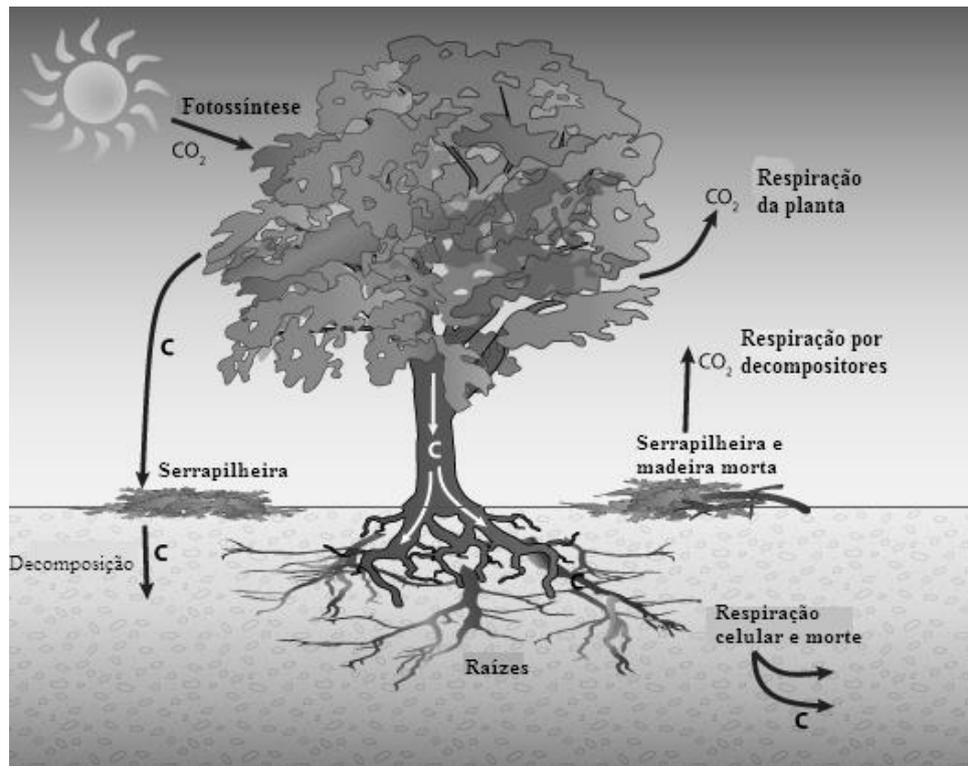
Fonte: Adaptado de (U.S. DOE, 2008).

Estima-se que a quantidade de carbono dissolvido nos oceanos fica em torno de aproximadamente 37.000 – 38.000 GtC (ADAMS; CALDEIRA, 2008). No continente, o maior reservatório de carbono é encontrado nos solos, com 23.000 GtC. Na atmosfera são encontrados cerca de 800 GtC, enquanto que a biomassa armazena 550 GtC (ADAMS; CALDEIRA, 2008). No entanto, a quantidade de carbono, em qualquer reservatório, pode mudar ao longo do tempo, sendo diretamente influenciada por atividades humanas como a crescente queima de combustíveis fósseis e as mudanças no uso da terra, fatores que iram alterar as concentrações de CO₂ atmosférico, carbono fotossintetizado e sua taxa de decomposição (JANZEN, 2004).

Nos ecossistemas terrestres, o carbono pode ser estocado na biomassa viva, no material biogênico em decomposição e nos solos (ARAGÃO; SHIMABUKURO, 2004). A fonte de entrada do carbono, nos ecossistemas terrestres, é a fotossíntese (Figura 2). Uma vez assimilado, o carbono pode ser transferido diretamente para as raízes, e o

transporte para o solo pode ser por meio do sistema radicular ou deposição de serrapilheira (KUTSCH; BAHN; HEINEMEYER, 2009), que após a decomposição realizada pelos microorganismos do solo, pode se emitido de volta para atmosfera, conduzido para superfície do solo ou lixiviado (BARDGETT, 2005).

Figura 2. Ciclo do Carbono.



Fonte: Adaptado de Valerie Martin, Technical Education Research Center- TERC.

4.2.1. Compartimentos de carbono da serrapilheira e do solo.

A camada de material morto depositado na superfície do solo, proveniente da biomassa aérea, é denominada serrapilheira (MOTA; TOREZAN, 2013). Esse material permanece no solo até ser fragmentado e decomposto pelos processos bióticos e físico-químicos (BELLINGHAM et al., 2013). O estoque de serrapilheira sobre o solo dependerá da produção e da velocidade de decomposição da matéria orgânica, variando de acordo com a composição do substrato, atividade dos organismos decompositores e das condições ambientais (PIRES et al., 2006).

A serrapilheira apresenta uma importância como função reguladora do fluxo de carbono e nutrientes entre a vegetação e o solo (ADUAN; VILELA; KLINK, 2003), pois

quantidades significativas de nutrientes podem retornar ao solo por meio da queda de componentes senescentes oriundos da biomassa aérea e sua posterior decomposição (ANDRADE; TAVARES; COUTINHO, 2003). A serrapilheira apresenta diferentes frações (folha, ramos, troncos, sementes, frutos e miscelânea) com estruturas e composições químicas distintas e que, portanto, decompõem em diferentes velocidades (CIANCIARUSO et al., 2006).

Outras funções também são exercidas pela serrapilheira como, a proteção do solo de agentes erosivos (IKPE; OWOEYE; GICHURU, 2003), regulação térmica, retenção de água, além de influenciar nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e na produção vegetal (ANDRADE; TAVARES; COUTINHO, 2003; CALDEIRA et al., 2007). A serrapilheira é também importante na manutenção da fertilidade do solo, sendo uma fonte constante de matéria orgânica, reciclando nutrientes oriundos do solo contidos nos tecidos vegetais (GARCIA et al., 2005), além de ser um estoque importante de carbono (ADUAN; VILELA; KLINK, 2003).

O solo possui o maior potencial de armazenar carbono (SRIVASTAVA et al., 2012), com capacidade de armazenamento quatro vezes maior que a biomassa vegetal e três vezes maior que a atmosfera (FIDALGO, 2007; PEREIRA et al., 2013). O estoque de carbono no solo resulta do balanço dinâmico entre a adição de material vegetal morto e as perdas por erosão e decomposição da matéria orgânica presente no solo (MACHADO, 2005; ROSENDO; ROSA, 2012).

O solo é um importante componente no ciclo biogeoquímico do carbono (SILVA et al., 2008). A quantificação de armazenamento de carbono orgânico no solo e investigação de sua associação com fatores ambientais é imprescindível para análises do ciclo do carbono terrestre e atualização do balanço de carbono (MAO et al., 2015). O potencial de estocagem de carbono no solo sofre influência das condições climáticas locais, do relevo e do tipo de manejo adotado, que afetam as taxas de mudanças dos teores de carbono orgânico do solo (FALLOON et al., 2007; SMITH, 2008).

Um compartimento importante de reserva de carbono no solo é a matéria orgânica do solo (MOS). Compreende-se por MOS todo o carbono orgânico presente no solo na forma de resíduos frescos ou em diversos estágios de decomposição, compostos humificados e materiais carbonizados, estando associados ou não à fração mineral, além da parte viva que é composta por raízes e pela micro, meso e macrofauna (ROSCOE; MACHADO, 2002). As frações da MOS apresentam características químicas, físicas e morfológicas diferentes entre si (CARMO et al.,

2012); essas frações podem ser divididas em lábil, estável e inerte (STROSSER, 2010).

O fracionamento físico-densimétrico da MOS é uma ferramenta importante nos estudos que envolvem mudanças nos sistemas de uso e manejo do solo (CHISTENSEN, 2000; RANGEL; SILVA, 2007), e está baseado na diferença de densidade entre as frações orgânicas livres e os complexos organominerais (CONCEIÇÃO et al., 2008), cada qual respondendo, de forma distinta, às diferentes práticas de uso e manejo do solo. O fracionamento densimétrico permite o isolamento e a quantificação dos compartimentos mais lábeis da MOS: a fração leve livre (FLL) – composta por materiais orgânicos provenientes, principalmente, de restos de vegetais, mas contendo quantidades de resíduos microbianos e da macrofauna, e que apresenta rápida taxa de transformação; e a fração leve oclusa (FLO) – compreende um variado conjunto de compostos orgânicos, de tamanho reduzido e um avançado grau de decomposição em comparação a FLL (PINHEIRO et al., 2004; ROSCOE; MACHADO, 2002). As frações de MOS podem apresentar diferentes velocidades de decomposição (FREIXO; CANELLAS; MACHADO, 2002), a FLL possui uma rápida velocidade de decomposição, sendo também altamente sensível; devido a isto é diretamente afetada pelo manejo do solo, enquanto que a FLO apresenta maior tempo de residência no solo, pois está protegida fisicamente pela agregação (FREIXO et al., 2002).

4.2.2. Fatores controladores dos compartimentos de carbono terrestre

O armazenamento de carbono desempenha um papel importante no ciclo do carbono dos ecossistemas (TRENTIN, 2015). Além disso, a dinâmica de acúmulo do carbono permite planejar sistemas produtivos e ainda recuperar áreas degradadas (AMADO et al., 2001). Os compartimentos de carbono, no ecossistema terrestre, são vulneráveis a fatores bióticos e abióticos, como, por exemplo: preparo do solo e manejo de culturas, temperatura, precipitação e microrganismo decompositores (MARKS et al., 2008).

4.2.2.1. Atividades humanas

O preparo do solo e o manejo de culturas são fatores determinantes no estoque de carbono da biomassa aérea, serrapilheira e solo (URQUIAGA et al., 2005). Quando o preparo de área envolve queima ou desmatamento, ocorre uma redução da biomassa

vegetal e, conseqüentemente, do estoque de carbono deste compartimento (KORN et al., 2007; BOMBELLI et al., 2009), visto que o carbono da vegetação é proporcional à quantidade de biomassa. Além disso, a queima de resíduos sobre o solo também pode provocar uma redução dos estoques de carbono e nitrogênio em diferentes compartimentos físicos da MOS (KNICKER et al., 2006; ROSCOE et al., 2000).

Os estoques de carbono no solo são vulneráveis às atividades humanas e geralmente diminuem de forma significativa em resposta ao preparo do solo e manejo de culturas (TRENTIN, 2015). À medida que o solo vai sendo submetido ao uso agrícola, alterações ocorrem nas suas propriedades físicas, tais como: compactação, densidade e porosidade (CALONEGO et al., 2012). Geralmente, o não-revolvimento do solo ou mínima mobilização intensificam a estabilização do carbono, demonstrado pelas menores taxas de decomposição da matéria orgânica (BAYER et al., 2011). Por outro lado, o preparo do solo com arados e grades, eleva a oxidação do carbono pela incorporação dos resíduos, pela quebra dos agregados e aumento da aeração do solo (PEDRA et al., 2012).

4.2.2.2. Clima e biota

Variáveis climáticas, como, temperatura e precipitação afetam diretamente a serrapilheira e MOS (ESPIG et al., 2009). Elevadas temperaturas e umidade contribuem para a decomposição da serrapilheira (CALDEIRA et al., 2007). Em relação à nutrição da vegetação, a rápida mineralização é importante. No entanto, quando se refere à imobilização do carbono, do ponto de vista de mitigação do gás carbônico na atmosfera, a rápida mineralização é negativa (FREITAS et al., 2016).

Esses fatores climáticos (temperatura e umidade) também podem afetar o carbono presente no solo, pois influenciam diretamente o metabolismo dos microrganismos. O solo é um habitat naturalmente diversificado, de complexas comunidades biológicas, onde se encontram diferentes formas de microrganismos (PREVIATI et al., 2012). A biomassa microbiana é responsável direta e indiretamente por processos microbiológicos e bioquímicos, que exercem influência na produtividade e sustentabilidade dos ecossistemas terrestres (SILVA; SIQUEIRA; COSTA, 2004). A temperatura e a umidade do solo influenciam na decomposição da matéria orgânica, pois interferem nas taxas metabólicas dos microrganismos decompositores do solo (DIAS, 2010). A elevação da temperatura pode aumentar o metabolismo dos

organismos decompositores, levando a uma perda maior de carbono do solo (ARAGÃO; SHIMABUKURO, 2004). Além disso, baixas temperaturas podem diminuir a produtividade da vegetação, ocasionando declínios no reservatório de carbono no solo (KUNKEL et al., 2011). Em relação à umidade do solo, a atividade decompositora é influenciada tanto pelas condições de encharcamento quanto pela redução da umidade do solo (LAL, 2009; DIAS, 2010).

4.2.2.3. Textura do solo

Na textura do solo, ao considerar a diferença da superfície específica e o tipo de minerais do solo, observa-se as possibilidades de interação com a matéria orgânica (WATTEL-KOEKKOEK et al., 2004), pois os solos tem diferentes capacidades de retenção e proteção à decomposição da matéria orgânica, em função de suas superfícies específicas (LUCIANO et al., 2012). Solos com maior teor de silte e argila possuem uma superfície de contato maior, favorecendo a formação de complexos entre as partículas minerais e os compostos orgânicos (DIAS, 2010). Esses complexos protegem a matéria orgânica da atividade decompositora; portanto, os solos de textura mais argilosa normalmente apresentam maior teor de carbono (LUCIANO et al., 2012).

4.2.3. Impactos de sistemas de produção sobre os compartimentos de carbono do ecossistema

Quando uma área é submetida a um tipo de sistema de produção agropecuária, este pode gerar impactos positivos e negativos, sobre os compartimentos de carbono do ecossistema. A conversão de um ecossistema natural em áreas agrícolas pode provocar mudanças nos atributos físicos, químicos e biológicos do solo (LIMA et al., 2011). Dependendo do tipo de manejo do solo adotado, podem ocorrer mudanças nos estoques de carbono como, por exemplo, em sistemas convencionais o intenso revolvimento do solo reduz os estoques de carbono (COSTA; GOEDERT; DE SOUSA, 2006). No entanto, a transição para sistemas sustentáveis geralmente melhora a qualidade do solo, gerando um aumento nos estoques de carbono, pois o mínimo de revolvimento do solo e o elevado aporte de resíduos orgânicos aumentam a MOS (LIMA et al., 2011).

Um dos maiores efeitos negativos da agricultura de corte-e-queima é a perda de nutrientes acumulados na biomassa da vegetação, com destaque para o carbono,

cujas perdas para a atmosfera atingem cerca de 98% (SÁ et al., 2007). A ciclagem de nutrientes e a quantidade de carbono do sistema (biomassa acima do solo e serrapilheira) são comprometidas, após a queima precoce da vegetação derrubada, pois os nutrientes não são rapidamente absorvidos pela vegetação que recolonizará a área, sendo lixiviados e perdidos (PEDROSO-JUNIOR; ADAMS; MURRIETA, 2008).

A ação do fogo provoca mudanças nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo (MATOS et al., 2012). A queima degrada quase toda a MOS e, quando realizada constantemente, reduz gradualmente o estoque de carbono do solo, dificultando a sua recomposição (REDIN et al., 2011). Pode-se observar também uma tendência em favorecer a erosão, devido à remoção da camada de serrapilheira e destruição da matéria orgânica, deixando o solo exposto ao impacto das gotas de chuvas, à alteração dos agregados do solo, e redução da porosidade e infiltração (SÁ et al., 2007). Devido à combustão da serrapilheira, as quantidades de carbono e nutrientes que retornam ao solo, via material morto, são reduzidas (DICK et al., 2008).

O sistema sem queima, como o corte-e-trituração, vem apresentando grandes vantagens ao evitar a perda de nutrientes e carbono com a queima da biomassa aérea, contribuindo para um balanço positivo destes elementos (SOMMER et al., 2004) e proporcionando uma recuperação gradual do solo (SAMPAIO; KATO; NASCIMENTO-E-SILVA, 2008). Nesse sistema os resíduos vegetais são mantidos na superfície do solo, apresentando vantagens como diminuição dos riscos de erosão, regulação térmica, melhor conservação da água (SOUZA JÚNIOR et al., 2015). Toda biomassa aérea da vegetação secundária nesta prática é fonte de matéria orgânica para o sistema. Sendo assim, a manutenção da qualidade do solo outra das maiores vantagens do preparo sem queima, devido aos elevados teores de carbono orgânico no solo, principalmente nas camadas superficiais (KATO et al., 2006 apud SAMPAIO; KATO; NASCIMENTO-E-SILVA, 2007).

Assim como o sistema de corte-e-trituração, os SAFs são geralmente muito produtivos, tendo grandes quantidades de carbono sequestrado e armazenado na biomassa aérea, MOS e serrapilheira (NEGASH; STARR, 2015). Nos SAFs, a presença de componentes florestais arbóreos, geralmente com uma elevada diversidade de espécies, proporciona a deposição contínua de resíduos vegetais (OELBERMANN et al., 2006), resultando na manutenção ou aumento da matéria orgânica do solo (OELBERMANN; PAUL VORONEY; GORDON, 2004). O manejo adotado nesse sistema otimiza o processo de ciclagem de nutrientes e carbono, pois o

mínimo de revolvimento do solo contribui para um aumento no aporte de carbono (ROCHA et al., 2014)

Os SAFs são responsáveis por favorecer elevada produção de biomassa aérea e serrapilheira (PEZARICO et al., 2013), promovendo o acúmulo de carbono, que ocorre devido ao aumento na eficiência da ciclagem dos nutrientes, por meio do aporte de serrapilheira, e da redução de perdas por lixiviação e erosão (GAMA-RODRIGUES et al., 2008; PORTUGAL et al., 2008).

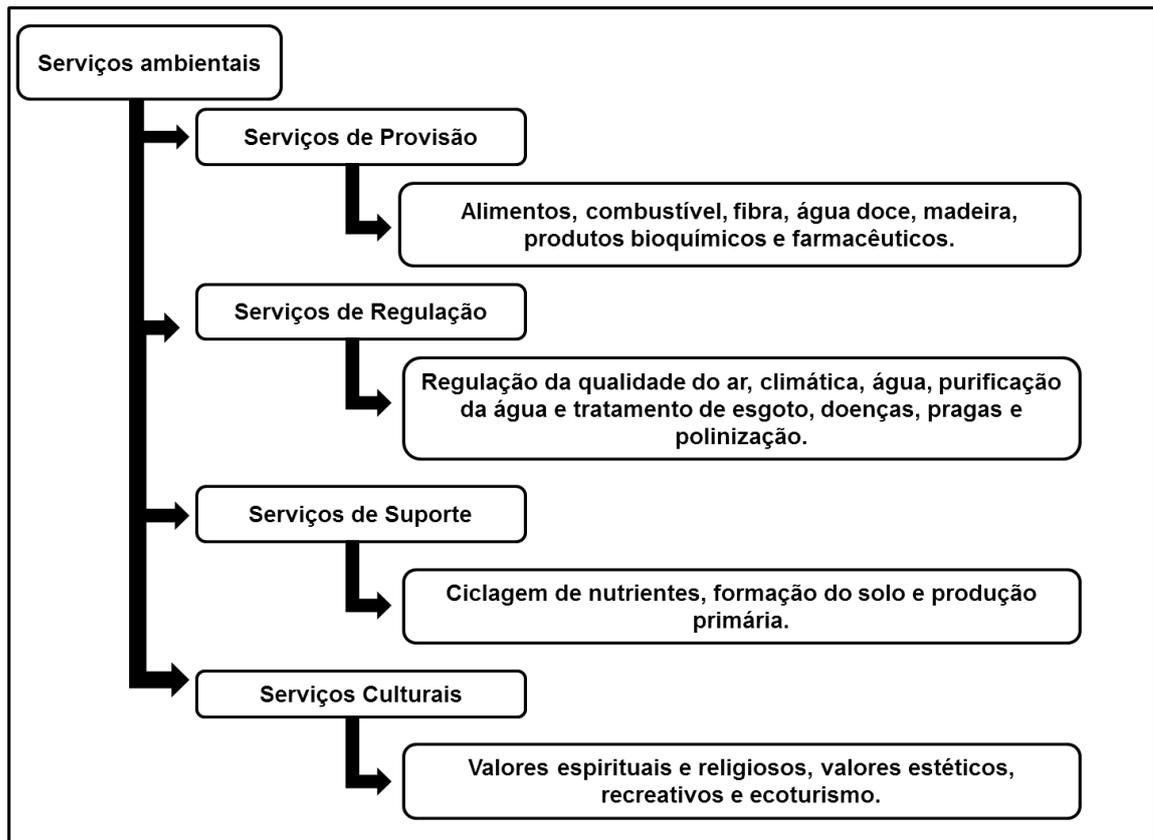
4.3. Prestação de serviços ambientais em sistemas de produção agropecuária

A contribuição dos ecossistemas para o bem-estar humano vem sendo descrita por meio dos serviços ecossistêmicos. O conceito de serviços ecossistêmicos começou a ser utilizado no ano de 1980 por pesquisadores, utilizado como argumento à favor da conservação e biodiversidade, chamando atenção da opinião pública sobre o valor monetário dos ecossistemas em escala global (ELOY; COUDEL; TONI, 2013). Após a Avaliação Ecosistêmica do Milênio (*Millenium Ecosystem Assessment – MEA*), o conceito sobre serviços ecossistêmicos ganhou importância, sendo reconhecida pela Convenção da Diversidade Biológica (CBD) e pelo setor empresarial (WRI, 2012).

O termo “serviços ecossistêmicos” é muitas vezes utilizado como sinônimo do termo “serviços ambientais”. Não existe um consenso sobre a definição desses termos na literatura. Alguns autores não fazem distinção, adotando o termo serviços ambientais como um termo geral, englobando as duas definições (SEEHUSEN; GUEDES, 2011; TITO; ORTIZ, 2013). Neste trabalho optou-se por usar a terminologia serviços ambientais, considerando que compreendem serviços proporcionados ao ser humano por ecossistemas naturais e ecossistemas manejados.

Serviços ambientais são definidos como os benefícios recebidos pela população em virtude da existência de ecossistemas, e são agrupados em quatro categorias: serviços de provisão, serviços de regulação, serviços de suporte e serviços culturais (MEA, 2005) (Figura 3).

Figura 3. Serviços ambientais de acordo com sua categoria.



Fonte: Adaptado de MEA (2005).

Os serviços de provisão são os produtos obtidos dos ecossistemas, como alimentos, madeira e fibra, combustível, água, produtos bioquímicos e farmacêuticos. Podem ser diretamente aproveitados e comercializados, sendo alvo da crescente demanda da sociedade (ANDRADE; ROMEIRO, 2009).

Os serviços de regulação são os benefícios obtidos através da regulação dos processos dos ecossistemas, como a regulação da qualidade do ar, climática, água, doenças, pragas e polinização.

Os serviços de suporte são aqueles necessários para a produção de todos os outros serviços ecossistêmicos, como a ciclagem de nutrientes, formação do solo e produção primária. Eles se diferem das outras categorias porque seus impactos sobre o homem são indiretos e/ou ocorrem em longo prazo (ANDRADE; ROMEIRO, 2009).

Os serviços culturais são os benefícios não-materiais obtidos dos ecossistemas, como os valores espirituais, religiosos, estéticos, recreativos e ecoturismo. São serviços diretamente ligados a valores e comportamentos humanos, bem como às instituições e padrões sociais, e por abranger diferentes grupos de indivíduos acaba tornando difícil sua avaliação (ANDRADE; ROMEIRO, 2009).

Os serviços ambientais são amplamente usados como uma forma de compreender como práticas agrícolas podem impactar os ecossistemas (GÓMEZ-BAGGETHUN et al., 2010), visto que, dependendo da prática adotada, pode afetar a integridade do ecossistema por meio de impactos como, erosão do solo, contaminação da água ou emissões de gases de efeito estufa (KRAGT; ROBERTSON, 2014).

Os sistemas de produção alternativos, que apresentam uma proposta de conservação dos recursos naturais, são grandes prestadores de serviços ambientais (GAMA-RODRIGUES et al., 2008); entre esses sistemas, incluem-se aqueles abordados neste estudo: SAFs e corte-e-trituração. Os SAFs, em comparação a outros sistemas como, por exemplo, pastagens e monoculturas, apresentam maior potencial de sequestro de carbono no solo devido as maiores taxas de adição e retenção da matéria orgânica (GAMA-RODRIGUES et al., 2010; SHARROW; ISMAIL, 2004), mostrando grande capacidade em serem prestadores de serviços ambientais. Os serviços ambientais gerados pelos SAFs estão geralmente relacionados à capacidade de sequestro de carbono da atmosfera (LUIZÃO et al., 2006); no entanto, a provisão de serviços ambientais dependerá da diversidade dos SAFs.

No sistema de corte-e-trituração, a vegetação triturada fica distribuída sobre o solo, servindo de fontes de nutrientes e carbono para as culturas (RANGEL-VASCONCELOS et al., 2009). Além disso, este tipo de prática resulta em oferta de serviços ambientais, como o sequestro de carbono, pelo aumento da quantidade de MOS (SAMPAIO; KATO; NASCIMENTO-E-SILVA, 2008), pois toda a biomassa triturada é fonte de matéria orgânica.

Para uma avaliação quanto à prestação de serviços ambientais, Woda (2009) ressalta a necessidade do uso de indicadores de fácil aplicação, entendimento e baixo custo econômico, além de que sejam bem definidos, para obtenção de resultados objetivos e comparáveis. Os indicadores são importantes para o monitoramento das alterações que ocorrem nos agroecossistemas, podendo ser classificados como indicadores físicos, químicos ou biológicos (TURETTA et al., 2016).

Na avaliação dos impactos causados pelo tipo de manejo agrícola na provisão de serviços ambientais, destacam-se como potenciais indicadores o estoque de carbono no solo e o estoque de serrapilheira. No estoque de serrapilheira, o carbono é derivado principalmente da biomassa, componente que contém entre 50% a 80% do carbono (TURETTA et al., 2016). Variações dos estoques de carbono no solo estão associadas às práticas de manejo, que possuem implicação na manutenção da

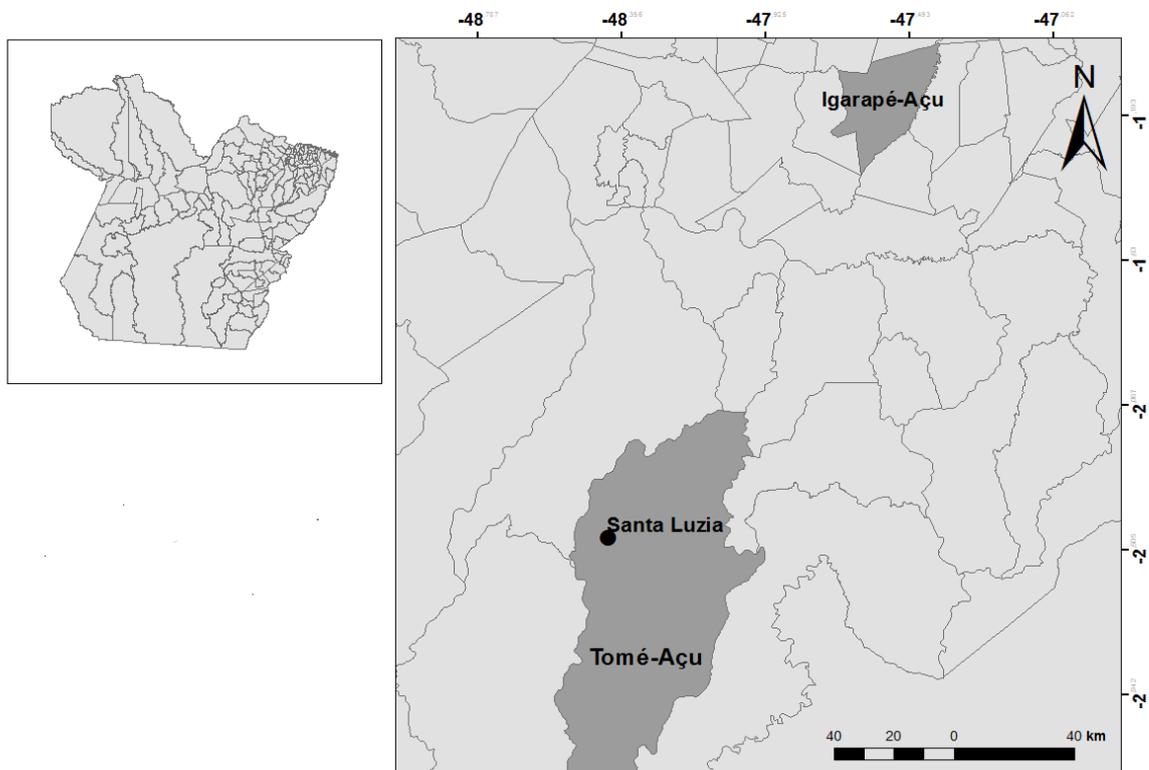
qualidade do solo e estabilidade do clima, portanto, estando diretamente relacionados ao fornecimento de serviços ambientais (PARRON et al., 2015).

5. MATERIAL E MÉTODOS

5.1. Localização das áreas de estudo

O estudo foi desenvolvido em áreas de agricultura familiar, localizadas nos municípios de Igarapé-Açu, e em duas propriedades em Tomé-Açu, nordeste paraense (Figura 4).

Figura 4. Mapa do estado do Pará com destaque dos municípios de Igarapé-Açu, Tomé-Açu e comunidade de Santa Luzia, nordeste paraense.



Fonte: Da autora.

5.1.1. Município de Igarapé-Açu

O município de Igarapé-Açu está localizado na Microrregião Bragantina, no Nordeste paraense, nas coordenadas geográficas $01^{\circ}07'33''$ S e $47^{\circ}37'27''$ W, estando situado a 110 km a leste de Belém, fazendo fronteira com cinco municípios paraenses: Marapanim, Maracanã, Nova Timboteua, Santa Maria do Pará e São Francisco do Pará (VIEIRA et al., 2007). Abrange uma área de 786 km^2 , com uma população de 35.887 habitantes, sendo 14.680 habitantes da zona rural (IBGE, 2010).

Em relação às condições edafoclimáticas, apresenta clima do tipo Am, com precipitação média anual de 2.500 mm. Durante o ano, as chuvas não se distribuem homogeneamente, apresentando as maiores médias em fevereiro, março e abril, e as menores em setembro, outubro e novembro (PACHECO; BASTOS, 2007). A temperatura média anual é 27°C, com mínima de 26°C e máxima de 38°C; e a umidade relativa varia de 80% a 90%. A vegetação do município é representada por floresta secundária e áreas de agricultura, tendo em seu histórico a utilização frequente da prática de corte-e-queima. O solo predominante é do tipo Latossolo Amarelo, de textura média e baixa fertilidade (ARAGÃO et al., 2012).

5.1.2. Município de Tomé-Açu

O município de Tomé-Açu está localizado na mesorregião do Nordeste paraense, nas coordenadas geográficas 02°25'00" S e 48°09'00" W. Está situado a 280 km de Belém por via rodoviária (PA-140) e 270 km com percurso pelos rios Acará e Guamá (VARELA; SANTANA, 2009). Apresenta uma área territorial de 5.145,338 km² com uma população de 56.518 habitantes distribuídos entre zona rural e urbana. Na zona rural há 24.955 habitantes, sendo 5.839 agricultores familiares (IBGE, 2010).

O clima da região corresponde ao tipo Am, classificação de Köppen, com temperatura média máxima de 34,4°C e mínima de 21,1°C, e precipitação anual em torno de 2.500 mm, apresentando distribuição irregular durante os meses do ano. A estação chuvosa compreende os meses de novembro a junho, e a menos chuvosa ocorre nos meses de julho a outubro. Os solos são representados por Latossolos amarelo distrófico, de topografia ondulada (PACHECO; BASTOS, 2006). Apresenta vegetação secundária na forma de capoeiras, resultante de atividades agrícolas, extrativistas, madeireiras e implantação de diferentes culturas agrícolas, como a pimenta-do-reino.

A comunidade de Santa Luzia está localizada no ramal Bragantino, município de Tomé-Açu, próximo da Vila Forquilha, a 27 km do distrito de Quatro Bocas e 37 km da sede do município. A agricultura (cultivo de pimenta-do-reino) é a atividade principal das famílias que compõem a comunidade, observando um avanço na introdução de SAFs que ocorre, principalmente, pela disseminação de experiências individuais (BARBOSA et al., 2012). A expansão dos SAFs na comunidade motivou um grupo de agricultores a fundar, em 2005, a Associação de Produtores e Produtoras de

Agricultura Familiar no município de Tomé-Açu (APPRAFAMTA) para comercializar e obter recursos da produção de polpas de frutas.

5.2. Caracterização das áreas de estudo

5.2.1. Município de Igarapé-Açu

O estudo foi realizado em uma propriedade rural, com área total de aproximadamente 17 ha, em sistemas de cultivo tradicional (corte-e-queima), sistema alternativo (corte-e-trituração) e floresta secundária (FS1) com cerca de 30 anos (Figura 5). Os dados referentes a cada sistema (corte-e-queima, corte-e-trituração e SAFs) e áreas de referências como composição de espécies, espaçamento e idade, estão apresentados na Tabela 1.

A forma de cultivo realizada na propriedade era baseada na prática de corte-e-queima. No entanto, no ano de 2005, esta prática de preparo de área começou a ser substituída, através do Projeto Raízes da Terra, que, em parceria com o projeto Tipitamba da Embrapa, implantaram unidades demonstrativas, nas quais foi realizado o preparo de área sem uso de queima.

Para o estudo tomou-se como referência uma unidade demonstrativa de 1 ha, sendo dividida em três áreas com tamanhos iguais (0,33 ha) para realização do cultivo. A área foi preparada através da técnica de corte-e-trituração da capoeira, sendo realizado o corte-e-trituração mecanizado em março 2015. Nessa forma de preparo, a vegetação é triturada a uma altura de 5-10 cm do solo, para não ocorrer o revolvimento profundo do solo e, conseqüentemente, não comprometer a regeneração da capoeira, que acontece principalmente pelos troncos e raízes que permanecem na área, garantindo a rebrota da vegetação natural (KATO et al., 2010).

A área do sistema de corte-e-queima estava em pousio havia quatro anos, quando foi derrubada em novembro de 2014 e queimada em dezembro do mesmo ano; após a queima, o plantio foi realizado.

5.2.2. Município de Tomé-Açu

O estudo foi desenvolvido em duas propriedades, uma empresarial e outra familiar, nas quais foram avaliados sistemas agroflorestais (SAFs), floresta secundária e floresta primária.

5.2.2.1. Propriedade empresarial

Na propriedade, foram avaliados SAFs implantados em 2000, 2007 e 2015 (denominados de SAF1, SAF2, SAF3, respectivamente), floresta secundária (FS2) e primária (FP). O preparo de área, em todos os SAFs implantados, consistiu de aração, gradagem e calagem, seguidos de cultivo de arroz (*Oryza sativa*), em espaçamento 0,4 m x 0,2 m, para a formação de palhada, e o cultivo de pimenta-do-reino (*Piper nigrum*), em espaçamento 2 m x 2 m. A partir do terceiro ano foram introduzidos cacau (*Theobroma cacao*), açaí (*Euterpe oleracea*), e uma espécie florestal - mogno (*Swietenia macrophylla*) ou taperebá (*Spondias lutea*). O manejo consistiu de cultivo da pimenta até o sétimo ano após o preparo de área, quando as culturas do cacau e açaí começaram a produzir frutos.

5.2.2.2. Propriedade familiar

Na propriedade, localizada em uma área na comunidade de Santa Luzia, foram avaliados SAFs implantados em 2002 e 2007, denominados de SAF4 e SAF5, respectivamente, e floresta secundária (FS3) (Figura 5).

A propriedade possui uma área total de 40 ha. A floresta secundária selecionada para o estudo tinha cerca de 20 anos e estava em uma área previamente cultivada com pimenta-do-reino, arroz, milho (*Zea mays* L.) e mandioca (*Manihot esculenta* Crantz), que foi abandonada depois da colheita, e deixada em pousio para o estabelecimento da capoeira existente.

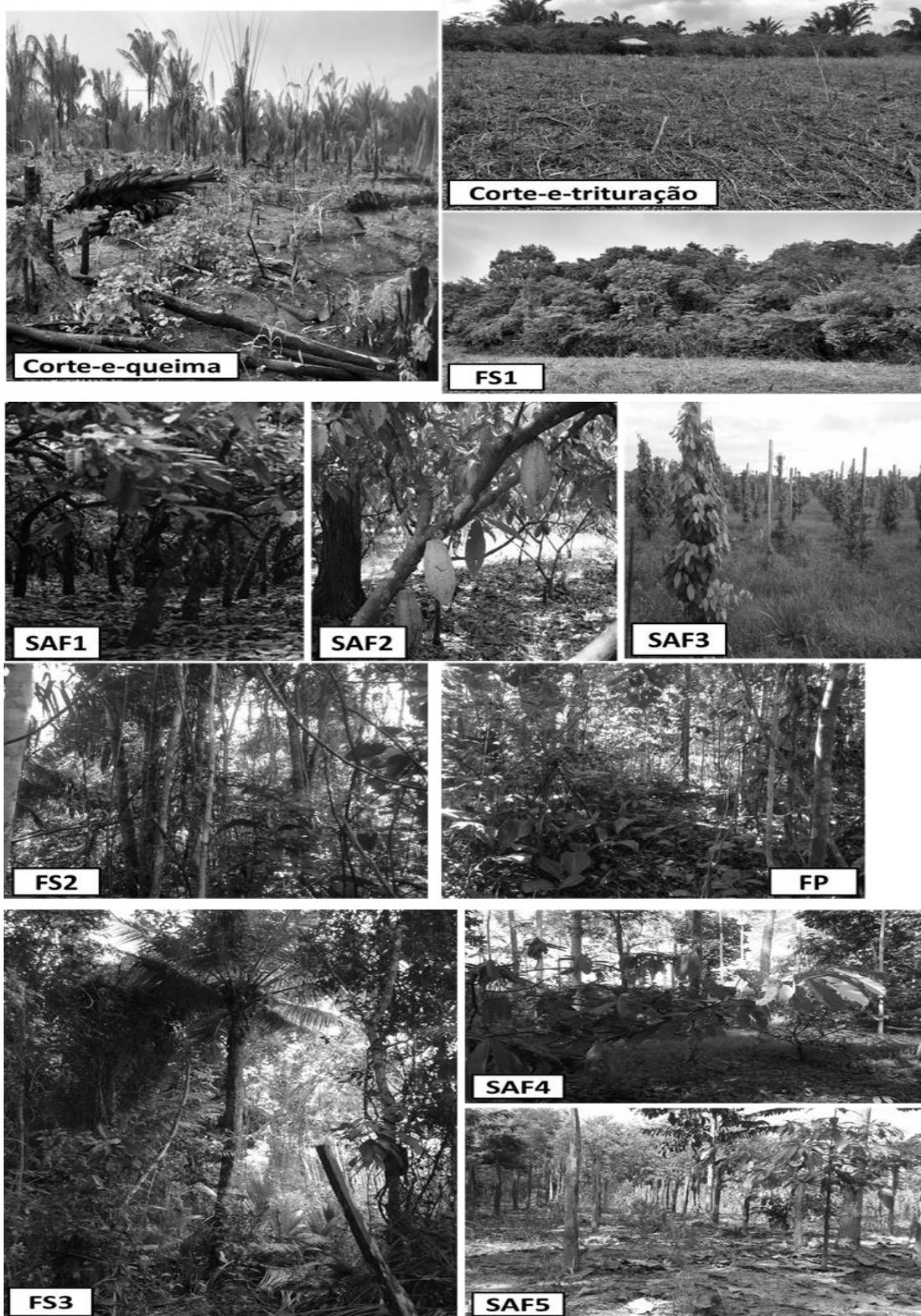
A forma de produção dos SAFs é orgânica, com farinha de osso, torta de mamona e a própria biomassa formada pela queda de folhagens. O SAF4 foi implantado no ano de 2002 (área de 0,6 ha), em área anteriormente usada para roça (arroz, milho e mandioca). A área foi abandonada (tempo não informado pelo agricultor) e em 2002, a vegetação de pousio foi derrubada com trator e arada.

O SAF5 foi implantado no ano de 2007 (área de 0,5 ha); anteriormente a área era usada para roça (arroz, mandioca e milho), depois foi deixada em pousio (tempo não informado pelo agricultor). Foi realizada a derruba-e-queima da vegetação de pousio e, em 2007, foram introduzidas as espécies.

Tabela 1. Descrição das espécies, espaçamento e idade dos sistemas estudados.

Sistemas	Composição de espécies	Espaçamento (m)	Idade (ano)
Corte-e-queima	mandioca (<i>Manihot esculenta</i> Crantz)	1 x 1	-
	milho (<i>Zea mayz</i> L.)	1 x 0,5	
Corte-e-trituração	mandioca (<i>Manihot esculenta</i> Crantz)	1 x 1	-
	caupi (<i>Vigna unguiculata</i> (L.) Walp.),	1 x 0,5	
	milho (<i>Zea mayz</i> L.)	1 x 0,5	
SAF1	cacau (<i>Theobroma cacao</i>),	4 x 4	15
	açaí (<i>Euterpe oleracea</i>),	5 x 5	
	banana (<i>Musa sapientum</i>),	5 x 5	
	mogno (<i>Swietenia macrophylla</i>)	20 x 20	
	taperebá (<i>Spondias lutea</i>)	25 x 25	
SAF2	cacau (<i>Theobroma cacao</i>)	4 x 4	8
	castanha do Pará (<i>Bertholletia excelsa</i>),	Aleatório	
	açaí (<i>Euterpe oleracea</i>)	5 x 5	
SAF3	andiroba (<i>Carapa guianensis</i>).	Aleatório	2
	cacau (<i>Theobroma cacao</i>),	4 x 4	
	açaí (<i>Euterpe oleracea</i>),	5 x 5	
	banana (<i>Musa sapientum</i>),	5 x 5	
	mogno (<i>Swietenia macrophylla</i>)	20 x 20	
SAF4	paricá (<i>Shizolobium amazonicum</i>).	6 x 4	13
	pimenta-do-reino (<i>Piper nigrum</i>)	2 x 2	
	açaí (<i>Euterpe oleracea</i>)	Aleatório	
	andiroba (<i>Carapa guianensis</i>)	Aleatório	
	copaíba (<i>Copaifera</i> spp. L)	Aleatório	
	piquiá (<i>Caryocar villosum</i> (Anubl.) Pers.)	Aleatório	
	uxí (<i>Endopleura uchi</i>)	Aleatório	
	sapucaia (<i>Lecythis pisonis</i>)	Aleatório	
	cupuaçu (<i>Theobroma grandiflorum</i>)	6 x 4	
paricá (<i>Schizolobium amazonicum</i>)	3 x 4		
SAF5	pimenta-do-reino (<i>Piper nigrum</i>)	2 x 2	8
	castanheira (<i>Bertholletia excelsa</i> Bonpl)	Aleatório	
	cupuaçu (<i>Theobroma grandiflorum</i>)	6 x 4	
	açaí (<i>Euterpe oleracea</i>)	6 x 4	
	maracujá (<i>Passiflora edulis</i>)	Aleatório	
FS1	Floresta secundária	-	30
FS2	Floresta secundária	-	>20
FS3	Floresta secundária	-	20
FP	Floresta primária	-	-

Figura 5. Áreas onde foram conduzidas as pesquisas nos municípios de Igarapé-Açu (corte-e-queima, corte-e-trituração e floresta secundária – FS1), Tomé-Açu (SAF1, SAF2, SAF3, floresta secundária – FS2 e floresta primária – FP) e comunidade de Santa Luzia (SAF4, SAF5 e floresta secundária – FS3), nordeste paraense.



Fonte: Da autora.

5.3. Amostragem de serrapilheira e solo

Dentro de cada sistema foram delimitadas aleatoriamente quatro parcelas (20 m x 20 m), para realização das coletas. O estoque de serrapilheira foi avaliado usando-se uma grade cortante com área interna de 0,50 x 0,50 m (Figura 6), lançada aleatoriamente em cada parcela do sistema. Foi coletado o material contido dentro da grade e armazenado em saco de papel para análise em laboratório. No total foram coletadas, em cada sistema, 12 amostras.

Figura 6. Grade metálica utilizada para coleta do estoque de serrapilheira.



Fonte: Da autora.

5.3.1. Coletas das amostras de solo

Em cada uma das áreas de estudo foram escavadas quatro trincheiras (Figura 7A), medindo 0,5 x 1,2 x 1,2 m (largura x comprimento x profundidade). Para coleta das amostras indeformadas, usadas para determinação da densidade do solo, retiraram-se amostras nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm, em três faces internas da trincheira, utilizando-se um trado extrator e anéis de aço com volume interno conhecido (Figura 7B). No total foram coletadas 96 amostras por área.

As amostras deformadas de solo, utilizadas para determinação do teor de carbono total e das frações densimétricas da MOS, foram coletadas próximas de cada trincheira, nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-60, 60-80 e 80-100 cm,

utilizando-se um trado (Figura 7C). No total foram coletadas, por área, 32 amostras de solo. As amostras foram enviadas ao Laboratório de Ecofisiologia Vegetal da Embrapa Amazônia Oriental.

Figura 7. Coleta de amostras para determinação do estoque de carbono do solo: (A) trincheira para coleta de amostras indeformadas, (B) retirada de amostras indeformadas com anel volumétrico para determinação da densidade do solo, e (C) coleta de amostras deformada com trado para determinação do teor de carbono do solo.



Fonte: Da autora.

5.4. Análise laboratorial

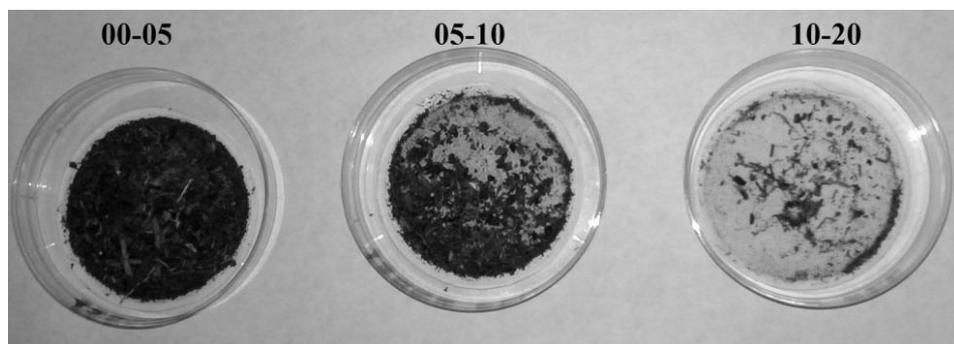
5.4.1. Fracionamento físico da matéria orgânica do solo (MOS)

Para o fracionamento da MOS, foi utilizado o método densimétrico segundo Sohi et al. (2001). Foram utilizadas amostras de solo nas profundidades 0-5, 5-10 e 10-20 cm. Para obtenção da fração leve livre (FLL), foram pesados, em triplicata, 15 g de terra fina seca ao ar (TFSA) em tubos de centrífuga de 100 mL, sendo adicionados 30 mL de iodeto de sódio (NaI) com densidade de $1,8 \text{ g cm}^{-3}$. Os tubos foram agitados manualmente por 30 segundos de forma que as frações orgânicas menos densas

ficassem na superfície da solução. A seguir, as amostras foram centrifugadas a 1.300 g, por 15 min. As três replicatas de cada fração foram reunidas em uma única amostra, e a fração orgânica sobrenadante existente na solução (fração leve livre) foi succionada juntamente com a solução de NaI, sendo imediatamente separada por filtração a vácuo (Sistema Asséptico Sterifil, 47 mm – Millipore) com filtros de fibra de vidro (47 mm de diâmetro), previamente pesados. As frações coletadas foram lavadas três vezes com água destilada, para eliminação do excesso de NaI contido na fração e no filtro (Figura 8). Posteriormente, a fração orgânica foi seca em estufa a 40 °C por 72 h, pesada e macerada em almofariz.

Para obtenção da fração leve oclusa (FLO), a solução remanescente após a filtragem a vácuo, com 30 mL de solução de NaI foi agitado, em tubo de centrifuga (100 mL), por 16 h a 1.300 g. Após a agitação, as amostras foram centrifugadas por 15 min a 1.300 g, em seguida foram filtradas a vácuo, secas, pesadas e maceradas, do mesmo modo que foi realizado para a fração leve livre. Foram pesados aproximadamente 0,100 g de cada amostra de FLL e FLO para análise do teor de carbono.

Figura 8. Fração leve livre nas três profundidades (cm) do solo.



Fonte: Da autora.

5.4.2. Teor de carbono na serrapilheira e no solo

Em laboratório, a serrapilheira foi classificada nas frações folha (pecíolos e outras estruturas foliares), material lenhoso fino ≤ 1 cm (galhos finos), material lenhoso grosso > 1 cm (galhos grossos) e material reprodutivo (frutos e sementes). Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 65°C por 48 h e pesadas em balança digital com

precisão de 0,01 g. A massa seca de cada fração foi expressa em g m². Após moagem, pesou-se aproximadamente 0,100 g para análise do teor de carbono.

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997), secando-se a amostra em estufa a 105 °C por 48 h.

Para determinação de carbono total, as amostras foram secas ao ar, destorroadas e passadas em peneiras de 2 mm (10 mesh) para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA). Posteriormente foram macerados em almofariz cerca de 10 g de solo e tamisados em peneiras de 0,149 mm (100 mesh). Em seguida, foi pesado 0,200 g para análise do teor de carbono (EMBRAPA, 2011).

A determinação do teor de carbono nas frações da serrapilheira, no solo e nas frações densimétricas da MOS foi realizada por combustão a seco, com analisador elementar da marca LECO modelo CNS 2000.

5.4.3. Estoque de carbono no solo e na MOS

A densidade do solo foi calculada utilizando-se a seguinte equação (EMBRAPA, 2011):

$$D = \frac{AS}{V}$$

Onde,

D – densidade do solo (g cm³).

AS – peso da amostra (g).

V – volume do anel (cm³).

A partir dos dados de teor de carbono e densidade do solo, o estoque de carbono total do solo e das frações densimétricas da MOS foi calculado segundo Veldkamp (1994), em que:

$$\text{EstC} = \frac{(C \times D_s \times e)}{10}$$

Onde,

EstC = estoque de carbono total em determinada profundidade (Mg ha⁻¹).

C = teor de carbono total (g kg⁻¹).

D_s = densidade do solo na profundidade amostrada (g cm⁻³).

e = espessura da camada considerada (cm)

5.5. Análise estatística

Foi empregada análise de variância de um fator para testar o efeito dos sistemas sobre (a) densidade do solo, (b) teor e estoque de carbono total e das frações de MOS e (c) estoque de serrapilheira. As médias foram comparadas com teste Tukey ($p \leq 0,05$). Os dados foram transformados, quando necessário, com \log_{10} para atender o pressuposto de normalidade. A análise estatística foi realizada no programa SigmaPlot 11.0.

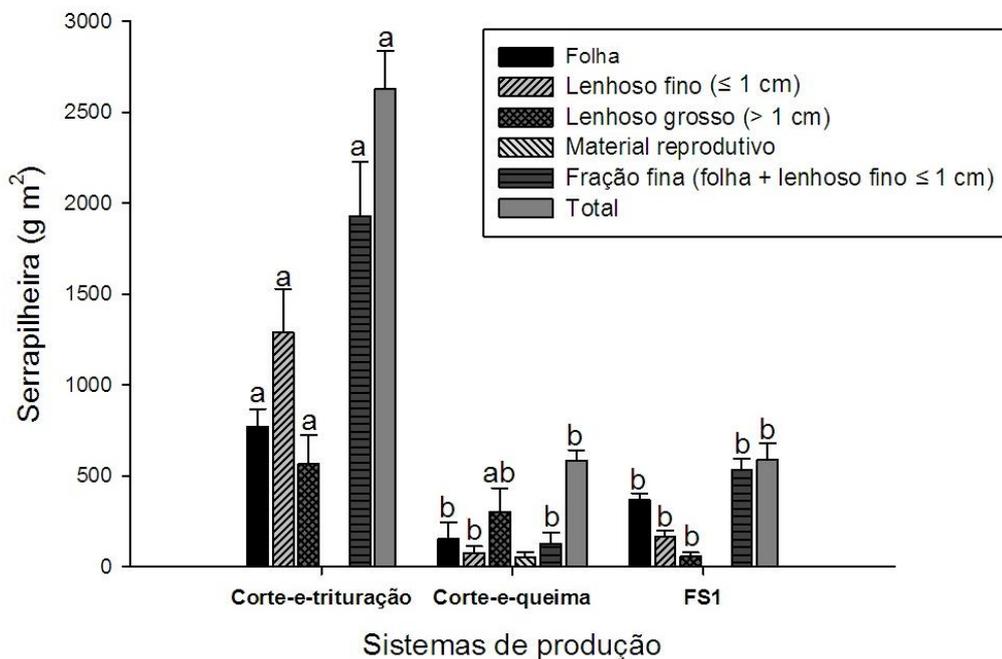
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1. Estoque de carbono na serrapilheira

6.1.1. Sistemas corte-e-queima e corte-e-trituração

As frações de serrapilheira diferiram significativamente entre os sistemas corte-e-trituração, corte-e-queima e floresta secundária (FS1) (Figura 9). O estoque total de serrapilheira (folha, lenhoso fino ≤ 1 cm e grosso > 1 cm e material reprodutivo) foi aproximadamente cinco vezes maior no sistema corte-e-trituração que no sistema corte-e-queima e na FS1 (Figura 9), sendo que as frações folha e lenhoso fino (≤ 1 cm) foram as que mais contribuíram para o estoque total, em que a fração folha e lenhoso fino representaram 8% e 12%, respectivamente, do total.

Figura 9. Estoque de frações de serrapilheira em sistemas agrícolas (corte-e-trituração e corte-e-queima) e floresta secundária (FS1), no município de Igarapé-Açu, PA. Letras diferentes indicam diferença significativa entre sistemas, para uma dada fração da serrapilheira, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média ($n=3$).



Fonte: Da autora.

Diversos fatores bióticos e abióticos como: temperatura do ar, precipitação, estágio sucessional, taxa de deposição e decomposição, umidade do solo, fenologia vegetal, vento e disponibilidade hídrica (CASTRO; RUIVO; SILVA, 2011; GARCIA et

al., 2005), podem influenciar na quantidade e qualidade do estoque de serrapilheira no sistema. O intervalo de tempo entre o preparo da área e a coleta das amostras, nos sistemas cultivados, também é um fator que influencia no estoque de serrapilheira. Neste estudo, o intervalo entre a trituração da vegetação e a coleta foi de uma semana, fato que provavelmente influenciou no maior estoque observado no sistema corte-e-trituração, pois no sistema havia grande quantidade do material triturado sobre o solo. Em relação ao sistema corte-e-queima, o baixo estoque de serrapilheira era esperado, devido ao uso recente do fogo (aproximadamente dois meses antes da coleta das amostras), em que parte da serrapilheira sofre combustão, conseqüentemente, diminuindo sua quantidade (REDIN et al., 2011).

O estoque de carbono da serrapilheira, entre os sistemas, foi diretamente proporcional ao estoque de serrapilheira sobre o solo. Em geral, o estoque de carbono da serrapilheira foi maior no sistema corte-e-trituração do que no sistema corte-e-queima e em FS1 (Tabela 2). O estoque total de carbono nos sistemas de corte-e-trituração, corte-e-queima e na área de referência (FS1) foi de $10,2 \pm 0,97 \text{ Mg C ha}^{-1}$, $2,35 \pm 0,52 \text{ Mg C ha}^{-1}$ e $3,23 \pm 0,48 \text{ Mg C ha}^{-1}$, respectivamente.

O maior estoque de carbono na serrapilheira no sistema de corte-e-trituração deve-se a grande quantidade de material triturado sobre o solo. Silva et al. (2010) observaram em sistemas com trituração um estoque de serrapilheira 18 vezes maior que a massa de resíduos deixada após a queima.

Tabela 2. Média do estoque de carbono da serrapilheira, \pm erro padrão (n=3), em sistemas agrícolas (corte-e-trituração e corte-e-queima) e floresta secundária (FS1), no município de Igarapé-Açu, PA. Letras diferentes, na coluna, indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sistemas de produção/Área de referência	Estoque de carbono na serrapilheira (Mg C ha^{-1})			
	Folha	Lenhoso fino ($\leq 1 \text{ cm}$)	Lenhoso grosso ($> 1 \text{ cm}$)	Total
Corte-e-trituração	$4,18 \pm 1,10 \text{ a}$	$4,54 \pm 1,13 \text{ a}$	$1,48 \pm 0,57 \text{ a}$	$10,2 \pm 0,97 \text{ a}$
Corte-e-queima	$0,80 \pm 0,5 \text{ b}$	$0,37 \pm 0,17 \text{ b}$	$1,18 \pm 0,82 \text{ a}$	$2,35 \pm 0,52 \text{ b}$
FS1	$1,97 \pm 0,36 \text{ ab}$	$0,94 \pm 0,39 \text{ b}$	$0,32 \pm 0,2 \text{ a}$	$3,23 \pm 0,48 \text{ b}$

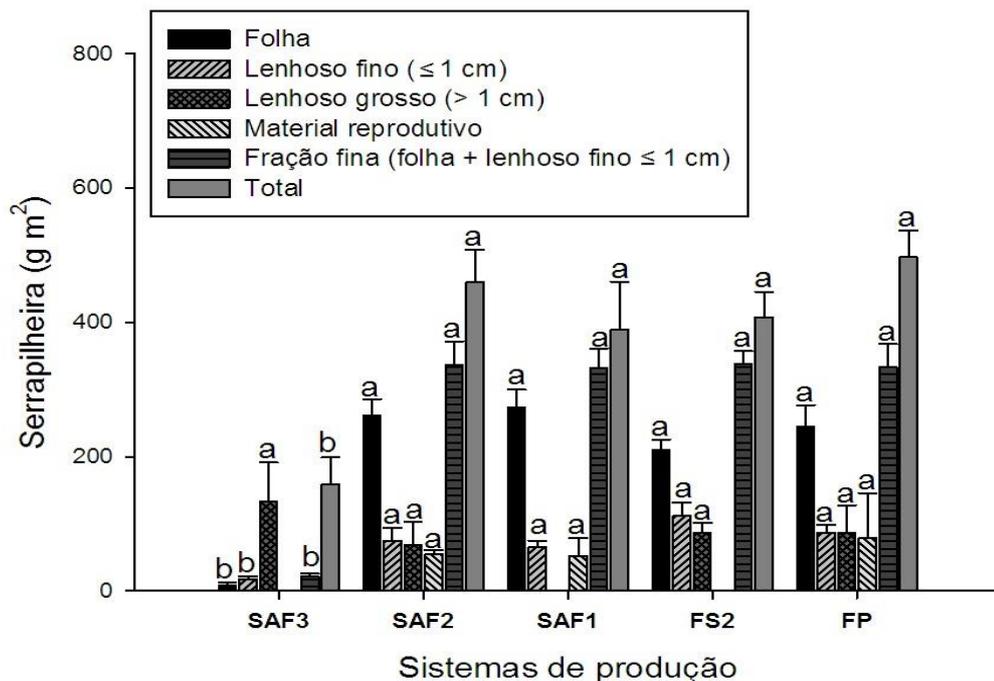
Fonte: Da autora.

6.1.2. Sistemas agroflorestais

Nos sistemas agroflorestais e áreas de referência (florestas secundária e primária) no município de Tomé-Açu, a fração folha e a fração fina (folha + lenhoso fino ≤ 1 cm) do SAF3 foram menor e diferiram significativamente dos SAF2, SAF1, FS2 e FP (Figura 10). Entre todas as frações, exceto no SAF3, a fração folha foi a mais representativa do estoque, como observado em outros estudos (ARATO; MARTINS; FERRARI, 2003; FROUFE; RACHWAL; SEOANE, 2011; LIMA et al., 2010). O SAF3 apresentou o menor estoque total de serrapilheira, enquanto que os SAF2 e SAF1 apresentaram estoque igual ao de FS2 e FP (Figura 10), demonstrando que os SAFs apresentam capacidade em estocar serrapilheira semelhante ao das áreas de referência.

O baixo estoque de serrapilheira observado no SAF3 deve-se provavelmente ao fato de ter sido implantado recentemente (SAF implantado no ano de 2015) em relação ao período de coleta, apresentando baixo aporte de resíduos vegetais.

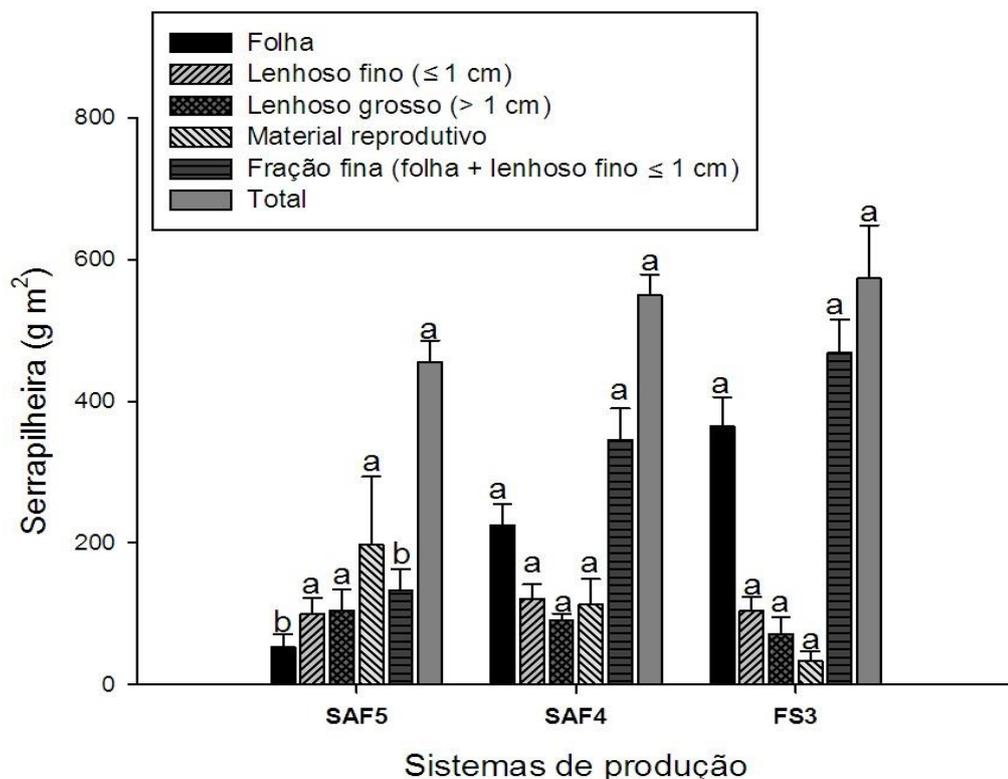
Figura 10. Estoque de frações de serrapilheira em sistemas agroflorestais (SAFs) e florestas secundária (FS2) e primária (FP), no município de Tomé-Açu, PA; SAF3: 2 anos; SAF2: 8 anos; SAF1: 15 anos. Letras diferentes indicam diferença significativa entre sistema, para uma dada fração da serrapilheira, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média ($n=3$).



Fonte: Da autora.

Na comunidade de Santa Luzia, apenas a fração folha variou significativamente entre os sistemas e área de referência, sendo menor no SAF5 do que nos outros sistemas (Figura 11). Os resultados sugerem um maior estoque total de serrapilheira na FS3; no entanto, não houve diferença significativa em relação ao SAF5 e SAF4 (Figura 11).

Figura 11. Estoque de frações de serrapilheira em sistemas agroflorestais (SAFs) e floresta secundária (FS3), na comunidade de Santa Luzia; SAF5: 8 anos; SAF4: 13 anos. Letras diferentes indicam diferença significativa entre sistemas, para uma dada fração da serrapilheira, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média ($n=3$).



Fonte: Da autora.

Os SAFs, das duas propriedades em Tomé-Açu, apresentaram comportamento igual ao das áreas de referências (FS2, FS3 e FP), resultado que pode ser decorrente da diversidade vegetal do sistema, além da qualidade dos resíduos que integram a serrapilheira, contribuindo para um maior tempo de residência sobre o solo (FREITAS et al., 2016; SANCHES et al., 2009). Silveira et al. (2007) consideram que a presença do componente arbóreo e a alta biodiversidade de espécies arbóreas em SAFs são fatores importantes para a manutenção de níveis adequados de aporte de serrapilheira e nutrientes no solo. Os resultados obtidos neste trabalho corroboram os de Lima et al.

(2010) e Martius et al. (2004), que também observaram que os SAFs estocaram serrapilheira em quantidades iguais a de áreas de referências (florestas secundária e primária).

O estoque de carbono, nas áreas de coletas com SAFs (Tomé-Açu e Santa Luzia), foi maior nas áreas de referência, variando de $2,24 \pm 0,15 \text{ Mg C ha}^{-1}$ a $2,41 \pm 0,37 \text{ Mg C ha}^{-1}$ (Tabela 3). No entanto, não houve diferença significativa do estoque de carbono em relação aos SAFs. Segundo Gama-Rodrigues, Gama-Rodrigues e Barros (2008) e Rocha et al. (2014), a estrutura de SAFs se assemelha às estruturas da vegetação nativa, pois são práticas de manejo que causam o mínimo de interferência ao ambiente, além de otimizarem o processo de ciclagem de nutrientes e carbono. Portanto, possivelmente o manejo realizado nos SAFs está conservando as características estruturais (especificamente a serrapilheira) do ecossistema natural local.

Tabela 3. Média do estoque de carbono da serrapilheira, \pm erro padrão ($n=3$), em sistemas agroflorestais (SAFs) e florestas secundária (FS2 e FS3) e primária (FP), no município de Tomé-Açu e comunidade de Santa Luzia, PA. Letras diferentes indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$); SAF1:15 anos; SAF2: 8 anos; SAF3: 2 anos; SAF4: 13 anos; SAF5: 8 anos.

Sistemas de produção/Áreas de referências	Estoque de carbono na serrapilheira (Mg C ha^{-1})				
	Folha	Lenhoso fino ($\leq 1 \text{ cm}$)	Lenhoso grosso ($> 1 \text{ cm}$)	Material reprodutivo	Total
SAF1	$1,10 \pm 0,21 \text{ a}$	$0,37 \pm 0,07 \text{ ab}$	-	$0,14 \pm 0,2$	$1,61 \pm 0,29 \text{ a}$
SAF2	$0,98 \pm 0,26 \text{ ab}$	$0,24 \pm 0,08 \text{ ab}$	$0,31 \pm 0,16 \text{ a}$	-	$1,53 \pm 0,24 \text{ a}$
SAF3	$0,10 \pm 0,03 \text{ b}$	$0,10 \pm 0,02 \text{ b}$	$0,90 \pm 0,32 \text{ a}$	-	$1,10 \pm 0,27 \text{ a}$
SAF4	$1,13 \pm 0,4 \text{ a}$	$0,52 \pm 0,16 \text{ a}$	$0,47 \pm 0,05 \text{ a}$	-	$2,13 \pm 0,21 \text{ a}$
SAF5	$0,43 \pm 0,24 \text{ a}$	$0,25 \pm 0,09 \text{ a}$	$0,65 \pm 0,23 \text{ a}$	$0,89 \pm 0,65$	$2,22 \pm 0,2 \text{ a}$
FS2	$0,98 \pm 0,16 \text{ a}$	$0,80 \pm 0,06 \text{ a}$	$0,46 \pm 0,12 \text{ a}$	-	$2,24 \pm 0,15 \text{ a}$
FS3	$1,50 \pm 0,29 \text{ a}$	$0,64 \pm 0,19 \text{ a}$	$0,27 \pm 0,11 \text{ a}$	-	$2,41 \pm 0,37 \text{ a}$
FP	$1,21 \pm 0,20 \text{ a}$	$0,49 \pm 0,17 \text{ ab}$	$0,59 \pm 0,07 \text{ a}$	-	$2,28 \pm 0,23 \text{ a}$

Fonte: Da autora.

O conteúdo de carbono na serrapilheira é influenciado por diversos fatores, tais como, (a) tipo de solo e vegetação, (b) densidade de indivíduos arbóreos, (c)

capacidade da espécie absorver, utilizar e translocar os nutrientes (antes da senescência foliar), (d) proporção de folhas em relação às demais frações, e (e) idade das árvores (MARAFIGA et al., 2012). Nos SAFs, a diversidade de espécies arbóreas, a elevada deposição de serrapilheira e o mínimo revolvimento do solo (ROCHA et al., 2014) possivelmente foram fatores que contribuíram para o estoque de carbono da serrapilheira, nestes sistemas, serem semelhante ao das áreas de referência.

Os resultados obtidos neste estudo diferem dos encontrados por Tapia-Coral et al. (2005) que determinaram o estoque de carbono e nutrientes na serrapilheira em diferentes sistemas agroflorestais e floresta secundária na Amazônia Central, e observaram maior estoque de carbono na floresta secundária ($6,41 \text{ Mg C ha}^{-1}$), do que nos SAFs ($3,68 \text{ Mg C ha}^{-1}$). Freitas et al. (2016) analisaram o estoque de carbono na serrapilheira em diferentes sistemas de manejo (SAF, roça, pastagem e floresta secundária) no município de Esperantina-PI, e observaram o maior estoque na floresta secundária, em relação aos outros sistemas.

6.2. Estoque de carbono na fração densimétrica da MOS

6.2.1. Sistemas corte-e-queima e corte-e-trituração

O teor de carbono nas frações leve livre (FLL) e leve oclusa (FLO), nos sistemas de produção e área de referência, tendeu a diminuir com o aumento da profundidade no perfil de solo (Figuras 12), de acordo com outros estudos (CARVALHO, 2011; FREIXO et al., 2002; ROSCOE et al., 2001). A variação vertical dos teores de carbono na FLL e FLO era esperada, visto que a camada superficial do solo é o local onde a deposição de materiais orgânicos ocorre com maior intensidade.

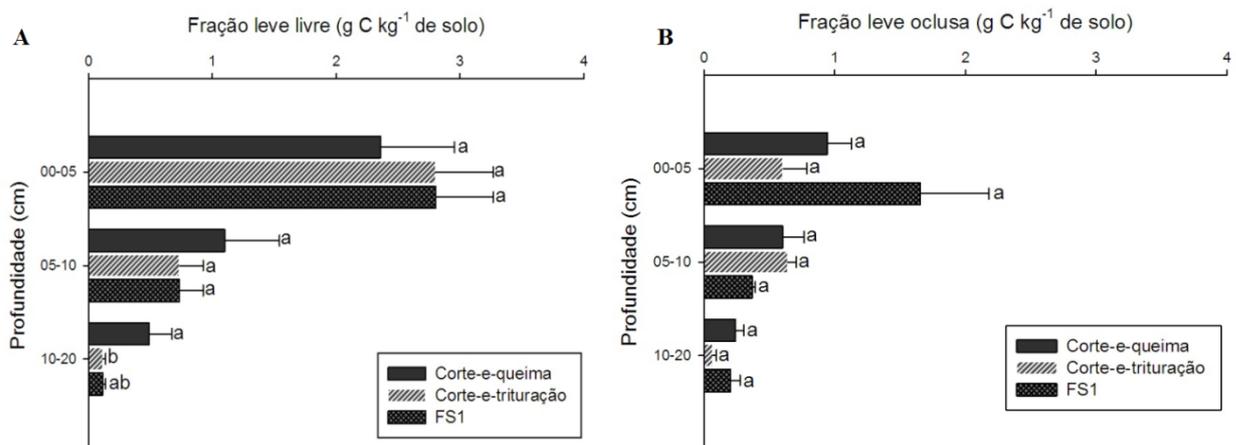
A quantidade de carbono da FLL por massa de solo de forma geral não variou entre os sistemas; apenas na camada 10-20 cm houve diferença significativa, com valores mais altos na queima do que na trituração (Figura 12A). A semelhança entre os sistemas e FS1 apresenta um ponto importante, pois esta fração constitui compartimento com rápida ciclagem e que favorece a qualidade do solo (LIMA et al., 2008). A MOS é considerada um dos principais indicadores da sustentabilidade dos agroecossistemas (KUNDE et al., 2016). Dentre as frações da MOS, a FLL é a mais sensível ao manejo adotado, destacando-se como importante indicador da qualidade do solo, apresentando relação direta com a quantidade e qualidade de resíduos depositados no solo (SIX et al., 2002; SOUZA JÚNIOR et al., 2015).

No entanto, a ausência de efeito significativo do preparo de área sobre a FLL possivelmente resulta do tempo insuficiente, entre preparo e coleta de solo, para a atuação dos processos que contribuem para a formação dessa fração da matéria orgânica do solo. O resultado deste estudo então possivelmente reflete o acúmulo de FLL durante o pousio das áreas e não exatamente um efeito imediato do preparo de área.

Nas camadas de 5-10 e 10-20 cm, observou-se uma tendência da maior quantidade de carbono por massa de solo no sistema corte-e-queima, provavelmente resultante do recente uso do fogo na área (aproximadamente dois meses antes da coleta). De acordo com Redin et al. (2011), a médio prazo, a queima aumenta a mineralização da matéria orgânica, disponibilizando nutrientes e carbono ao solo. Rodrigues (2013) ressalta que a maior quantidade de carbono nesta fração possivelmente está relacionada à mobilidade e ao acúmulo de materiais carbonizados na subsuperfície, influenciando na dinâmica desta fração.

Na FLO, não houve diferença significativa entre sistemas e profundidades. No entanto, na camada 0-5 cm, houve uma tendência de maior quantidade de carbono por massa de solo na área de referência (FS1) (Figura 12B), possivelmente porque em FS1 deve haver um maior retorno de biomassa de resíduos vegetais no solo em relação aos outros sistemas (RODRIGUES, 2013).

Figura 12. Variação vertical do teor de carbono das frações (A) leve livre (FLL) e (B) leve oclusa (FLO) em sistemas de produção agrícola (corte-e-queima e corte-e-trituração) e floresta secundária (FS1) no município de Igarapé-Açu, PA. Letras diferentes indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média.



Fonte: Da autora.

O estoque de carbono na FLL diferiu significativamente apenas na profundidade 10-20 cm entre corte-e-trituração e corte-e-queima (Tabela 4). Os sistemas de corte-e-queima ($3,09 \pm 0,70 \text{ Mg C ha}^{-1}$) e corte-e-trituração ($2,38 \pm 0,40 \text{ Mg C ha}^{-1}$) não diferiram estatisticamente em relação a área de referência ($1,99 \pm 0,25 \text{ Mg C ha}^{-1}$), mas houve uma tendência de maior estoque no sistema com queima. Este resultado pode estar relacionado, como observado anteriormente, com o período de coleta ocorrido logo depois da queima da vegetação e segundo Rheinheimer et al. (2003), o material resultante da queima, aumenta a disponibilidade de carbono e nutrientes por catalisar o processo de mineralização. Entretanto, em médio prazo, esses efeitos tendem a desaparecer, pois os nutrientes são lixiviados pela ação de chuvas, resultando em baixas concentrações (KNICKER, 2007).

Tabela 4. Média do estoque de carbono nas frações leve livre (FLL) e leve oclusa (FLO), \pm erro padrão, nos sistemas agrícolas (corte-e-queima e corte-e-trituração) e floresta secundária (FS1) no município de Igarapé-Açu, PA. Letras diferentes, na coluna, indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Sistemas de produção/Área de referência	FLL	FLO
	Mg C ha ⁻¹	
	(0-5 cm)	
Corte-e-trituração	1,72 \pm 0,30 a	0,36 \pm 0,11 a
Corte-e-queima	1,58 \pm 0,39 a	0,63 \pm 0,11 a
FS1	1,34 \pm 0,20 a	0,99 \pm 0,32 a
	(5-10 cm)	
Corte-e-trituração	0,48 \pm 0,12 a	0,42 \pm 0,04 a
Corte-e-queima	0,75 \pm 0,08 a	0,41 \pm 0,10 a
FS1	0,41 \pm 0,04 a	0,24 \pm 0,02 a
	(10-20 cm)	
Corte-e-trituração	0,17 \pm 0,03 b	0,09 \pm 0,16 a
Corte-e-queima	0,75 \pm 0,08 a	0,37 \pm 0,10 a
FS1	0,23 \pm 0,04 ab	0,29 \pm 0,09 a
	(Total 0-20 cm)	
Corte-e-trituração	2,38 \pm 0,40 a	0,88 \pm 0,16 a
Corte-e-queima	3,09 \pm 0,70 a	1,42 \pm 0,16 a
FS1	1,99 \pm 0,25 a	1,52 \pm 0,25 a

Fonte: Da autora.

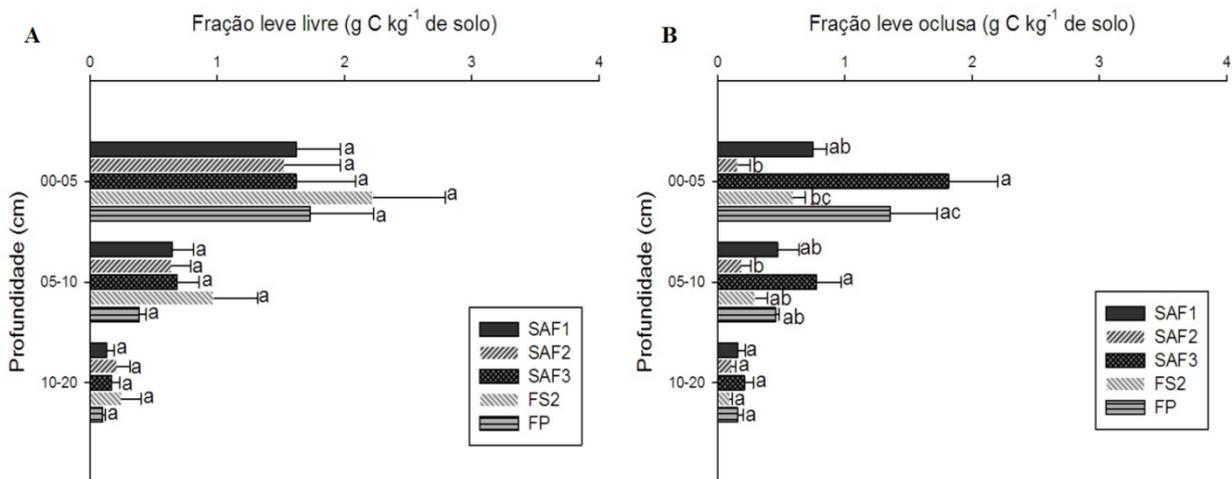
O estoque de carbono na FLO não diferiu estatisticamente entre os sistemas (Tabela 4). No entanto, a FS1 tendeu a apresentar um maior estoque. Rodrigues et al. (2013) também observaram maior estoque de carbono na FLO na floresta secundária, em relação aos sistemas corte-e-queima e corte-e-trituração, no município de Igarapé-Açu. A tendência de maior estoque de carbono nesta fração, na FS1, demonstra uma

estabilização do carbono, pois a FLO apresenta um grau de decomposição e estabilização maior que a FLL (ROSCOE; MACHADO, 2002).

6.2.2. Sistemas agroflorestais

A quantidade de carbono da FLL por massa de solo não variou significativamente entre SAFs e áreas de referência (Figura 13A). Houve diferença significativa da quantidade de carbono da FLO por massa de solo apenas nas profundidades 0-5 e 5-10 cm (Figura 13B). Na camada 0-5 cm, os SAF2 e SAF3 diferiram em relação as FS2 e FP. Na camada 5-10 cm houve diferença entre o SAF2 e SAF3, não diferindo da FS2 e FP.

Figura 13. Variação vertical do teor de carbono das frações (A) leve livre (FLL) e (B) leve oclusa (FLO) em sistemas agroflorestais (SAFs) e florestas secundária (FS2) e primária (FP) no município de Tomé-Açu, PA. SAF1: 15 anos; SAF2: 8 anos; SAF3: 2 anos. Letras diferentes indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média.



Fonte: Da autora.

Resultado semelhante, em relação às FLL e FLO, foi observado por Rita et al. (2011), que analisaram o teor de carbono nas frações leves da MOS em SAFs e floresta natural na Bahia, e obtiveram valores similares entre os SAFs e área de referência. Este resultado provavelmente está relacionado à presença de componentes florestais nos SAFs somados a uma grande diversidade de espécies vegetais, que possibilita a deposição contínua de resíduos vegetais, o que facilita a manutenção da matéria orgânica do solo (IWATA et al., 2012; LINHARES et al., 2016).

O estoque de carbono na FLL não diferiu significativamente entre os sistemas e áreas de referências (Tabela 5). Quanto ao estoque de carbono na FLO, houve diferença significativa entre os sistemas, exceto na profundidade 10-20 cm (Tabela 5). O SAF3 apresentou maior estoque ($2,15 \pm 0,51 \text{ Mg C ha}^{-1}$) e diferiu estatisticamente do SAF2 e FS2.

Tabela 5. Média do estoque de carbono nas frações leve livre (FLL) e leve oclusa (FLO), \pm erro padrão, nos sistemas agroflorestais (SAFs) e florestas secundária (FS2) e primária (FP), no município de Tomé-Açu, PA. Letras diferentes, na coluna, indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$); SAF1: 15 anos; SAF2: 8 anos; SAF3: 2 anos.

Sistemas de produção/Áreas de referências	Mg C ha ⁻¹	
	FLL	FLO
	(0-5 cm)	
SAF1	1,06 \pm 0,22 a	0,50 \pm 0,08 b
SAF2	1,02 \pm 0,30 a	0,10 \pm 0,06 b
SAF3	1,11 \pm 0,33 a	1,23 \pm 0,16 a
FS2	1,29 \pm 0,34 a	0,35 \pm 0,06 b
FP	0,97 \pm 0,29 a	0,76 \pm 0,21 ab
	(5-10 cm)	
SAF1	0,47 \pm 0,12 a	0,34 \pm 0,13 ab
SAF2	0,46 \pm 0,10 a	0,13 \pm 0,05 b
SAF3	0,51 \pm 0,13 a	0,59 \pm 0,15 a
FS2	0,60 \pm 0,20 a	0,18 \pm 0,05 ab
FP	0,24 \pm 0,03 a	0,29 \pm 0,02 ab
	(10-20 cm)	
SAF1	0,19 \pm 0,08 a	0,24 \pm 0,08 a
SAF2	0,33 \pm 0,16 a	0,17 \pm 0,04 a
SAF3	0,26 \pm 0,10 a	0,32 \pm 0,11 a
FS2	0,35 \pm 0,21 a	0,13 \pm 0,02 a
FP	0,14 \pm 0,02 a	0,23 \pm 0,06 a
	(Total 0-20 cm)	
SAF1	1,74 \pm 0,25 a	1,10 \pm 0,27 ab
SAF2	1,83 \pm 0,45 a	0,42 \pm 0,12 b
SAF3	1,89 \pm 0,48 a	2,15 \pm 0,51 a
FS2	2,25 \pm 0,34 a	0,46 \pm 0,10 b
FP	1,36 \pm 0,33 a	1,29 \pm 0,27 ab

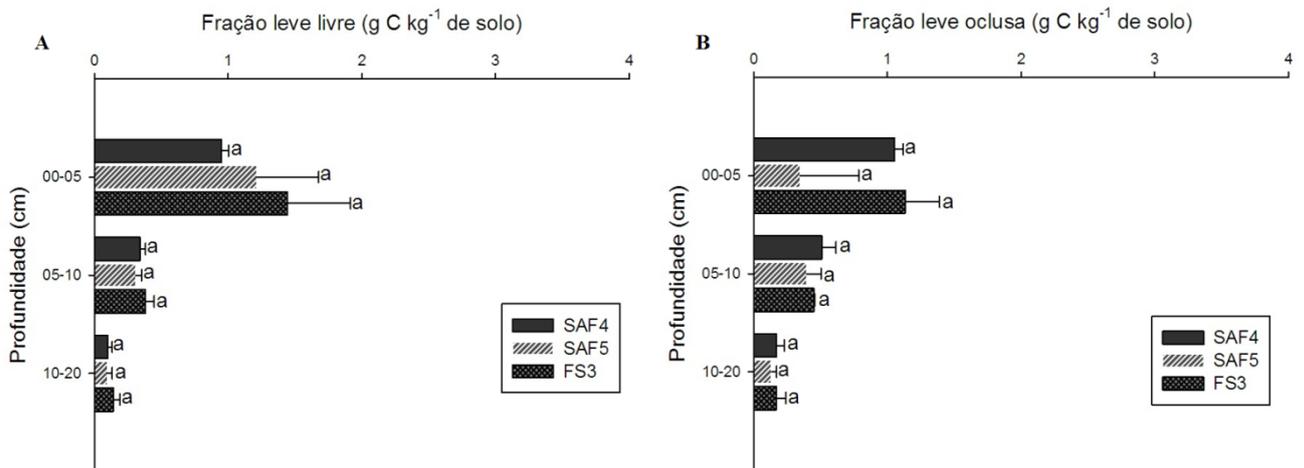
Fonte: Da autora.

Os SAFs mostraram-se eficazes em estocar carbono nas frações da MOS, chegando a valores iguais ao das áreas de referência, resultado que deve-se, possivelmente, a consorciação das culturas agrícolas com espécies arbóreas, que recuperam ou mantém aspectos estruturais dos ecossistemas florestais (SILVA, 2006).

Além disso, devido à inclusão de componentes arbóreos, ocorre um incremento de matéria orgânica no solo, gerando benefícios às características físicas, químicas e biológicas do solo (LINHARES et al., 2016).

Nos SAFs e área de referência de Santa Luzia, os teores de carbono das frações FLL e FLO não diferiram significativamente entre os sistemas (Figura 14), de acordo com os resultados de Leite; Iwata; Araújo (2014) e Prado et al. (2016) o tempo de cultivo e heterogeneidade das culturas em SAFs favorecem o acúmulo de matéria orgânica no solo, atingindo valores próximos aos das áreas de referência.

Figura 14. Variação vertical do teor de carbono das frações (A) leve livre (FLL) e (B) leve oclusa (FLO) em sistemas agroflorestais (SAFs) e floresta secundária (FS3) na comunidade de Santa Luzia, PA; SAF4: 13 anos; SAF5: 8 anos; Letras iguais não indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média.



Fonte: Da autora.

Não houve diferença significativa entre os sistemas nos estoques de carbono das FLL e FLO (Tabela 6). Marques et al. (2015) determinaram o estoque de carbono nas frações leves da MOS em diversos ecossistemas amazônicos, obtendo também valores de estoque de carbono nas FLL e FLO em SAFs semelhantes ao das áreas de referência (floresta secundária e primária). Estes resultados sugerem que SAFs são formas adequadas de conservação do carbono no ecossistema terrestre, pois a rápida incorporação de resíduos vegetais e diversidade de espécies vegetais, que compõem o SAF, podem influenciar na manutenção do carbono no solo (MARQUES et al., 2015).

Tabela 6. Média do estoque de carbono nas frações leve livre (FLL) e leve oclusa (FLO), com erro padrão, nos sistemas agroflorestais (SAFs) e floresta secundária (FS3) na comunidade de Santa Luzia, PA. Letras iguais, na coluna, não indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). SAF4: 13 anos; SAF5: 8 anos.

Sistemas de produção/Área de referência	FLL	FLO
	Mg C ha ⁻¹	
	(0-5 cm)	
SAF4	0,70 ± 0,03 a	0,77 ± 0,05 a
SAF	0,93 ± 0,35 a	0,26 ± 0,33 a
FS3	0,85 ± 0,28 a	0,66 ± 0,16 a
	(5-10 cm)	
SAF4	0,26 ± 0,02 a	0,38 ± 0,07 a
SAF5	0,23 ± 0,03 a	0,30 ± 0,08 a
FS3	0,24 ± 0,02 a	0,29 ± 0,01 a
	(10-20 cm)	
SAF4	0,15 ± 0,05 a	0,26 ± 0,08 a
SAF5	0,15 ± 0,05 a	0,20 ± 0,05 a
FS3	0,19 ± 0,07 a	0,24 ± 0,10 a
	(Total 0-20 cm)	
SAF4	1,19 ± 0,02 a	1,43 ± 0,08 a
SAF5	1,32 ± 0,30 a	0,77 ± 0,38 a
FS3	1,29 ± 0,27 a	1,19 ± 0,28 a

Fonte: Da autora.

6.3. Estoque de carbono no solo

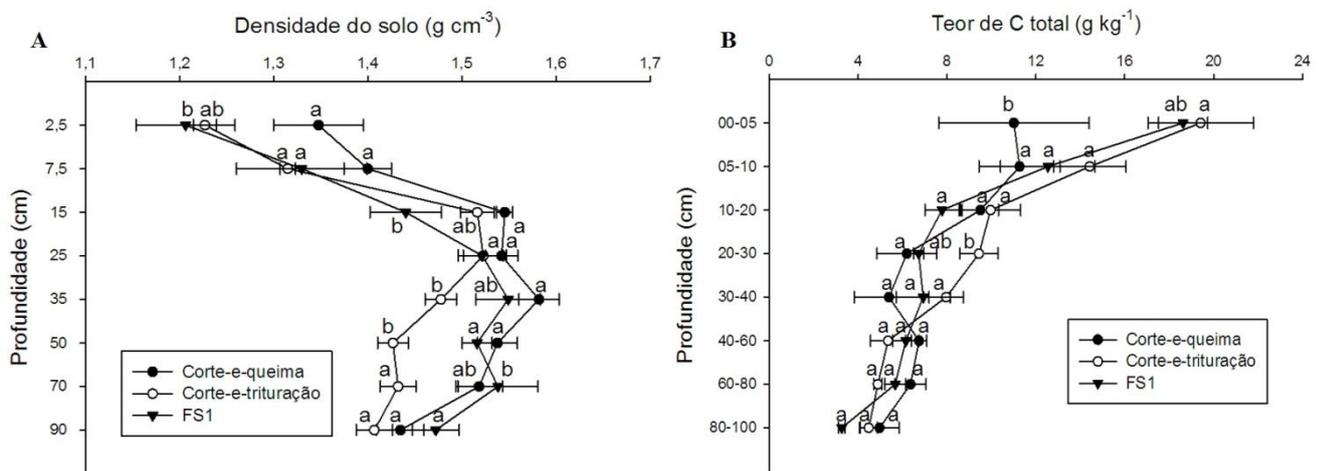
6.3.1. Sistema corte-e-queima e corte-e-trituração

Em Igarapé-Açu, a densidade do solo variou significativamente entre os sistemas em algumas profundidades. De modo geral, o sistema de corte-e-queima apresentou maior densidade, exceto nas profundidades de 70 e 90 cm (Figura 15A). No geral, o aumento da densidade foi observado nas profundidades a partir de 7,5 a 35 cm ao longo do perfil do solo, com variação média de $1,45 \pm 0,01$ a $1,51 \pm 0,01$ g cm⁻³.

A maior densidade do solo no sistema de corte-e-queima (tradicional), em relação ao sistema de corte-e-trituração (alternativo) e FS1 deve-se, possivelmente, ao impacto da queima nas propriedades físicas do solo, que podem sofrer alterações como diminuição do volume de macroporos, do tamanho de agregados e da taxa de infiltração de água (REDIN et al., 2011). Marcolan; Locatelli; Fernandes (2009) e Trindade, Valente; Mourão Júnior (2012) também observaram maior densidade do solo em sistemas de corte-e-queima do que no sistema com trituração e floresta secundária.

O teor de carbono total do solo variou significativamente entre sistemas em algumas profundidades (Figura 16B). De modo geral, o teor de carbono do solo foi menor no sistema de corte-e-queima com média geral de $7,67 \pm 1,35 \text{ g kg}^{-1}$, exceto nas profundidades de 40-60 a 80-100 cm (Figura 15B). O maior teor de carbono foi observado no sistema de corte-e-trituração (média geral de $9,48 \pm 1,04 \text{ g kg}^{-1}$), apresentando valor superior ao da FS1 (média geral de $8,45 \pm 0,83 \text{ g kg}^{-1}$). O teor de carbono, em todos os sistemas, foi maior nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, pois quanto maior a profundidade no perfil do solo, maior a densidade e consequentemente menor o teor de carbono no solo, resultante do baixo teor de matéria orgânica, baixa quantidade de raízes e compactação causada pelas camadas superiores (LEMOS, 2011; SOUSA NETO et al., 2008). O mesmo foi observado por Sampaio et al (2008), no nordeste Paraense, onde também mediu maior teor de carbono no solo em sistemas de corte-e-trituração, nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, do que no sistema de corte-e-queima e floresta de secundária (22 anos).

Figura 15. Variação vertical da (A) densidade do solo e (B) teor de carbono total no solo em sistemas de produção agrícola (corte-e-queima e corte-e-trituração) e floresta secundária (FS1) no município de Igarapé-Açu, PA. Letras diferentes indicam diferença significativa entre sistemas pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média.



Fonte: Da autora.

O estoque de carbono no solo não variou significativamente entre os sistemas, ficando clara a diferença apenas entre as profundidades de todos os sistemas. No entanto, houve tendência de maior valor de estoque de carbono total (Tabela 7) no sistema corte-e-trituração ($104,47 \pm 5,85 \text{ Mg C ha}^{-1}$) e menor valor na FS1 ($97,33 \pm$

3,01 Mg C ha⁻¹). O estoque de carbono total no sistema de corte-e-queima foi 102,34 ± 6,59 Mg C ha⁻¹.

No sistema de corte-e-trituração o material triturado é deixado como cobertura sobre o solo, contribuindo para uma melhor qualidade do solo, devido aos elevados teores de carbono orgânico no solo (KATO et al., 2006). No Nordeste Paraense, o estoque de carbono no solo foi significativamente maior em área sob trituração (1,79 ± 0,17 Mg C ha⁻¹), do que em área sob queima (0,20 ± 0,02 Mg C ha⁻¹) (Rangel-Vasconcelos et al., 2009). Independentemente da profundidade de amostragem, os sistemas de corte-e-trituração e corte-e-queima foram eficazes em armazenar carbono no solo.

Tabela 7. Média do estoque de carbono no solo, ± erro padrão, em diferentes profundidades, para os sistemas agrícolas (corte-e-queima e corte-e-trituração) e floresta secundária (FS1) no município de Igarapé-Açu, PA. Letras iguais, na coluna, não indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Profundidade (cm)	Estoque de carbono no solo (Mg C ha ⁻¹)		
	Corte-e-trituração	Corte-e-queima	FS1
00-05	11,91 ± 1,44 a	7,47 ± 2,39 a	11,32 ± 1,14 a
05-10	9,48 ± 1,08 a	7,91 ± 1,31 a	8,37 ± 1,54 a
10-20	15,11 ± 2,07 a	14,68 ± 1,28 a	11,24 ± 1,27 a
20-30	14,38 ± 1,38 a	9,59 ± 2,15 a	10,21 ± 0,26 a
30-40	11,76 ± 1,15 a	8,45 ± 2,37 a	10,61 ± 1,59 a
40-60	15,29 ± 2,39 a	20,68 ± 0,86 a	18,65 ± 1,83 a
60-80	13,99 ± 0,65 a	19,22 ± 1,92 b	17,36 ± 1,29 ab
80-100	12,55 ± 0,97 a	14,33 ± 2,73 a	9,57 ± 0,36 a
Total (0-100)	104,47 ± 5,85 a	102,34 ± 6,59 a	97,33 ± 3,01 a

Fonte: Da autora.

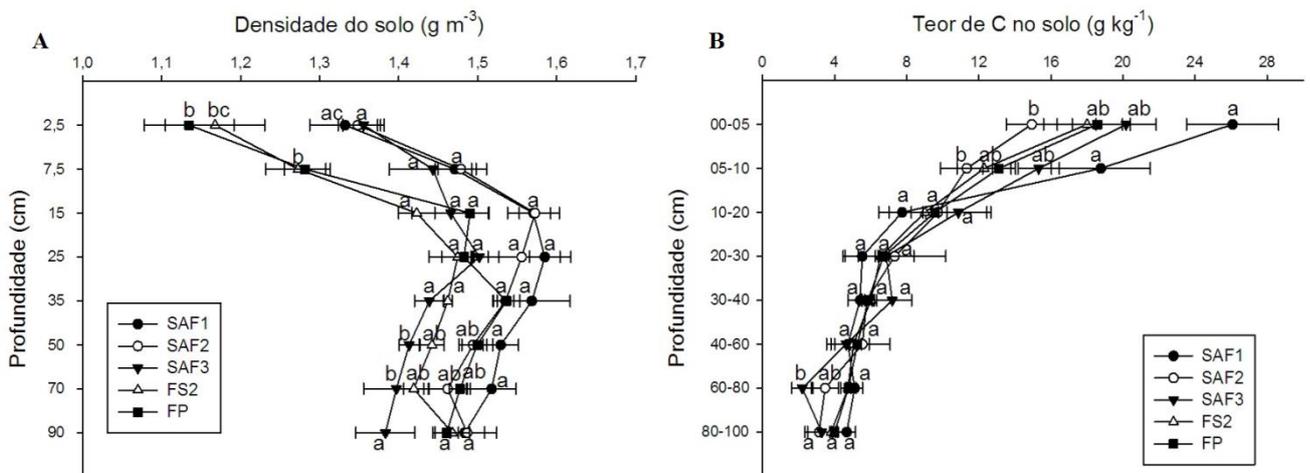
6.3.2 Sistemas agroflorestais

A densidade do solo apresentou diferença significativa entre os sistemas e áreas de referências em algumas profundidades (Figura 16A). De modo geral, os maiores valores de densidade do solo ocorreram nos SAFs, com médias gerais de SAF1: 1,51 ± 0,03 g cm⁻³, SAF2: 1,48 ± 0,02 g cm⁻³ e SAF3: 1,44 ± 0,02 g cm⁻³. As áreas de

referência, FS2 e FP, apresentaram médias gerais de $1,39 \pm 0,04 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,41 \pm 0,05 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente. A partir da profundidade de 7,5 a 35 cm, ocorreu um aumento da densidade do solo, sendo que até a profundidade de 25 cm as maiores densidades ocorreram nos SAFs (Figura 17A).

Quanto ao teor de carbono total no solo, houve diferença significativa na profundidade 0-5 cm entre os SAF1 e SAF2, mas não diferindo das áreas de referência. No entanto, na camada 60-80 cm, o SAF3 diferiu significativamente de todas as áreas (Figura 16B). Houve uma tendência de maior teor de carbono no SAF1, com média geral de $8,98 \pm 0,63 \text{ g kg}^{-1}$, e menor teor no SAF2, com $7,94 \pm 1,05 \text{ g kg}^{-1}$. SAF3, FS2 e FP apresentaram médias gerais de $8,82 \pm 0,31 \text{ g kg}^{-1}$, $8,19 \pm 0,57 \text{ g kg}^{-1}$ e $8,66 \pm 0,75 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente.

Figura 16. Variação vertical da (A) densidade do solo e (B) teor de carbono total no solo em sistemas de agroflorestais (SAFs) e florestas secundária (FS2) e primária (FP) no município de Tomé-Açu, PA; SAF1: 15 anos; SAF2: 8 anos; SAF3: 2 anos. Letras diferentes indicam diferença significativa entre sistemas pelo teste Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média.



Fonte: Da autora.

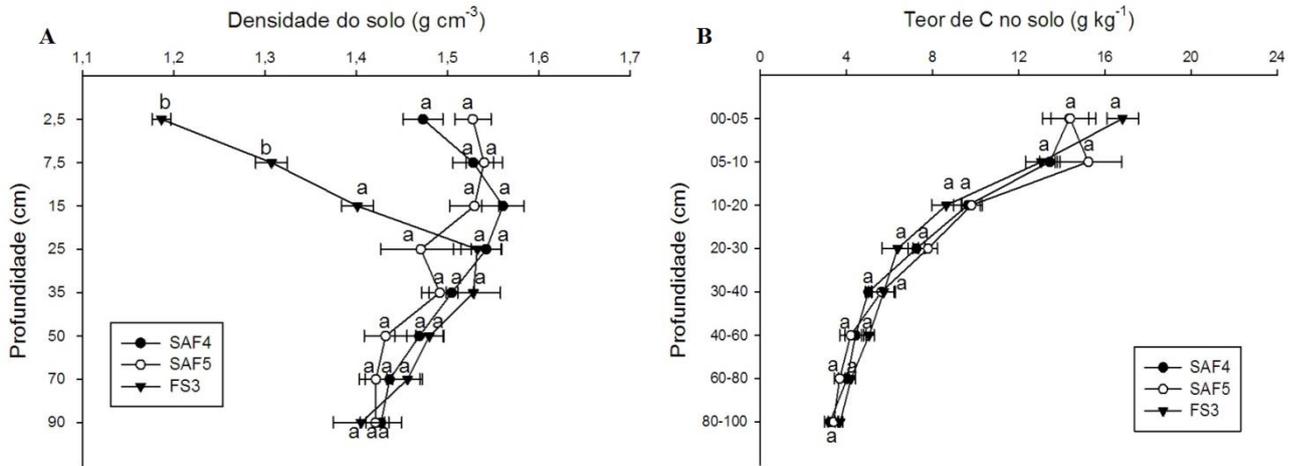
Em Santa Luzia, foi observada uma diferença significativa na densidade do solo, dos sistemas com a área de referência, unicamente nas profundidades de 2,5 e 7,5 cm (Figura 17A). Até a profundidade de 15 cm, SAF4 ($1,49 \pm 0,03 \text{ g cm}^{-3}$) e SAF5 ($1,48 \pm 0,07 \text{ g cm}^{-3}$) apresentaram os maiores valores de densidades em relação a FS3 ($1,41 \pm 0,05 \text{ g cm}^{-3}$).

A densidade do solo nos SAFs, nas duas propriedades em Tomé-Açu, foi maior que a das áreas de referências sugerindo, possivelmente, uma compactação do solo nestes sistemas. Os sistemas de preparo do solo podem provocar alterações em alguns atributos do solo, dentre eles na densidade do solo (TORMENA et al., 2002), que está diretamente relacionada ao nível de compactação do solo (PRADO; ROQUE; SOUZA, 2002). Um aumento excessivo da densidade do solo ocasiona uma redução na porosidade total, permeabilidade e infiltração da água, quebra de agregados e aumento da resistência mecânica à penetração, comprometendo a qualidade física do solo (JAKELAITIS et al., 2008; PEZARICO et al., 2013). Resultado similar encontrado por Pezarico et al. (2013) nas áreas avaliadas (SAFs, plantio convencional e mata) onde observaram a maior densidade do solo nos SAFs.

Em relação ao teor de carbono total do solo, não houve diferença significativa entre os sistemas e área de referência ao longo do perfil do solo (Figura 17B). Nas duas áreas de coleta, também foram observados os maiores teores de carbono total nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, tendência esperada em função da deposição e posterior decomposição da matéria orgânica; de acordo com Machado (2005) cerca de 98% do carbono orgânico total do solo encontra-se na matéria orgânica morta, composta principalmente pelos resíduos vegetais adicionados ao solo.

Os SAFs, nas duas propriedades, apresentaram teor de carbono orgânico total semelhante ao das áreas de referências, possivelmente devido ao aporte de resíduos orgânicos, visto que o acúmulo de carbono orgânico no solo sob SAFs dependerá de sua composição (espécies arbóreas e arbustivas usadas no plantio), fatores ambientais, tipo de manejo e o tempo de formação do SAF (LINHARES et al., 2016). Cogo et al. (2012) também observaram teor e estoque de carbono do solo similar entre SAF e área de referência (mata nativa), ressaltando que os SAFs, quando combinados com o não-revolvimento do solo, colaboram para a estabilização dos agregados e elevação dos teores de matéria orgânica.

Figura 17. Variação vertical da (A) densidade do solo e (B) teor de carbono total no solo em sistemas agroflorestais (SAFs) e floresta secundária (FS3) na comunidade de Santa Luzia, PA; SAF4: 13 anos; SAF5: 8 anos. Letras diferentes indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). Barras representam erro padrão da média.



Fonte: Da autora.

Nas duas áreas de coleta em Tomé-Açu, o estoque de carbono no solo (0-100 cm) não apresentou diferença significativa entre os sistemas e as áreas de referências (Tabela 8). Ainda assim, houve uma tendência de maior estoque de carbono no SAF1 ($104,75 \pm 8,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$) e menor no SAF4 ($83,19 \pm 4,94 \text{ Mg C ha}^{-1}$). Os SAF3 ($91,80 \pm 4,06 \text{ Mg C ha}^{-1}$) e SAF2 ($88,80 \pm 8,9 \text{ Mg C ha}^{-1}$) apresentaram valores de estoque de carbono maiores que a FS2 ($88,60 \pm 1,5 \text{ Mg C ha}^{-1}$), SAF5 ($87,86 \pm 0,77 \text{ Mg C ha}^{-1}$) e FS3 ($86,46 \pm 2,47 \text{ Mg C ha}^{-1}$), mas inferiores a FP ($93,89 \pm 2,3 \text{ Mg C ha}^{-1}$) (Tabela 8). Estes resultados sugerem que os SAFs apresentam ótima capacidade de estocar carbono no solo em níveis similares aos das áreas de referências (FS2, FS3 e FP). Os SAFs, quando bem manejados, permitem um aumento do estoque de carbono do solo, que é decorrente de vários fatores (pouco revolvimento do solo, conservação das características da vegetação natural) que contribuem para a preservação da MOS (ROCHA et al., 2014)

Tabela 8. Média do estoque de carbono no solo, \pm erro padrão, em diferentes profundidades, para os sistemas agroflorestais (SAFs) e florestas secundárias (FS2 e FS3) e primária (FP) no município de Tomé-Açu e na comunidade de Santa Luzia, PA. Letras iguais, na coluna, não indicam diferença significativa entre os sistemas, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$); SAF1:15 anos; SAF2: 8 anos; SAF3: 2 anos; SAF4: 13 anos; SAF5: 8 anos.

Profundidade (cm)	Estoque de carbono no solo (Mg C ha)			
	SAF1	SAF2	SAF3	SAF4
00-05	17,38 \pm 1,9 a	8,47 \pm 0,9 b	11,46 \pm 1,1 b	8,34 \pm 0,80 a
05-10	13,89 \pm 2,2 a	7,82 \pm 1,0 b	10,65 \pm 0,82 ab	9,51 \pm 0,60 a
10-20	12,22 \pm 2,2 a	17,62 \pm 7,6 a	15,51 \pm 2,7 a	12,77 \pm 0,91 a
20-30	8,79 \pm 1,5 a	10,16 \pm 4,3 a	9,09 \pm 1,4 a	10,31 \pm 0,62 a
30-40	8,48 \pm 1,1 a	8,74 \pm 0,64 a	10,46 \pm 0,98 a	7,64 \pm 0,07 a
40-60	14,62 \pm 3,7 a	16,52 \pm 4,5 a	15,19 \pm 2,9 a	13,29 \pm 0,92 a
60-80	15,56 \pm 1,3 a	10,19 \pm 1,8 ab	8,61 \pm 1,4 b	11,90 \pm 1,06 a
80-100	13,80 \pm 1,3 a	9,30 \pm 2,3 a	10,83 \pm 1,8 a	9,43 \pm 0,95 a
Total (0-100)	104,75 \pm 8,6 a	88,81 \pm 8,9 a	91,80 \pm 4,06 a	83,19 \pm 4,94 a
	SAF5	FS2	FS3	FP
00-05	8,36 \pm 0,59 a	10,38 \pm 1,4 b	9,75 \pm 0,38 a	11,10 \pm 1,3 b
05-10	10,78 \pm 1,02 a	7,78 \pm 0,91 b	8,45 \pm 0,68 a	8,42 \pm 0,65 ab
10-20	12,98 \pm 0,77 a	12,77 \pm 0,91 a	11,98 \pm 1,31 a	14,25 \pm 0,90 a
20-30	11,10 \pm 0,62 a	9,65 \pm 0,3 a	9,82 \pm 1,25 a	9,51 \pm 1,07 a
30-40	8,81 \pm 0,71 a	8,80 \pm 0,52 a	8,79 \pm 0,93 a	8,99 \pm 0,44 a
40-60	13,73 \pm 0,80 a	14,56 \pm 0,6 a	14,94 \pm 0,64 a	15,81 \pm 0,80 a
60-80	12,00 \pm 0,14 a	13,47 \pm 1,1 ab	12,29 \pm 0,55 a	14,08 \pm 0,43 ab
80-100	10,10 \pm 0,76 a	11,20 \pm 0,32 a	10,44 \pm 0,52 a	11,72 \pm 0,57 a
Total (0-100)	87,86 \pm 0,77 a	88,60 \pm 1,5 a	86,46 \pm 2,47 a	93,89 \pm 2,3 a

Fonte: Da autora.

Os resultados obtidos neste trabalho corroboraram o de outros estudos. Por exemplo, Monroe et al. (2016) não obtiveram diferença estatística no estoque de carbono do solo entre SAFs com cacau, pastagem e floresta secundária no sul da Bahia, embora tenham observado tendência de maior estoque nos SAFs. Em Esperantina-PI, Freitas et al. (2016) também não obtiveram diferença estatística no estoque de carbono em SAF (79,22 Mg C ha⁻¹), floresta primária (65,80 Mg C ha⁻¹), pastagem (70,96 Mg C ha⁻¹) e roça (66,40 Mg C ha⁻¹).

6.4. Potencial da quantificação do estoque de carbono como subsídio para estimar serviços ambientais

A expansão e a intensificação da agricultura vêm resultando em perda da biodiversidade e redução da variedade de serviços ambientais (BARRAL et al., 2015; TSCHARNTKE et al., 2012). A conversão de terras para uso agrícola pode melhorar alguns serviços ambientais de provisão (alimentos e fibras), ao mesmo tempo reduzindo a disponibilidade de terra para fornecimento de outros serviços de regulação, suporte e culturais (BULLOCK et al., 2011). Assim, destaca-se a importância de buscar alternativas de manejo que combinem a produção agrícola com a conservação e/ou aumento da biodiversidade e dos serviços ambientais (BARRAL et al., 2015).

Um fator fundamental para verificar o potencial dos sistemas agrícolas no fornecimento de serviços ambientais é a definição de indicadores que sirvam para avaliar os impactos (negativos e positivos) do manejo do solo na prestação desses serviços (TURETTA et al., 2016). Esses indicadores devem ser de fácil percepção, baratos e apresentar grande acurácia (PARRON et al., 2015). Alguns indicadores que podem ser utilizados para avaliação são: estoque de serrapilheira, estoque de carbono no solo, biomassa aérea ou serrapilheira, densidade e porosidade do solo (TURETTA et al., 2016). Numerosos serviços ambientais são fornecidos pelo solo; além disso, as funções dos solos estão inter-relacionadas com os outros compartimentos do ecossistema. Então os impactos que ocorrem sobre o solo terão efeitos indiretos em outros compartimentos e nos serviços ambientais (PRADO et al., 2016b). Segundo Parron et al. (2015), o estoque de carbono no solo constitui um importante indicador de

serviços ambientais, pois permite comparações em função do clima, tipo de solo, bioma, uso e manejo da terra.

As práticas de manejo adotadas podem afetar, direta ou indiretamente, as funções ecossistêmicas e serviços ambientais. Mudanças nas práticas de manejo, como cultivo mínimo, agricultura orgânica e redução da pressão de pastejo, geralmente conservam os estoques de carbono, e conseqüentemente, os serviços ambientais oferecidos pelo sistema (PARRON et al., 2015; VERBRUGGEN et al., 2012). Ao longo dos anos, muitos sistemas de produção agrícola, direcionados à conservação do solo, foram desenvolvidos, e um exemplo, são os SAFs. Os SAFs são sistemas que apresentam relevante estratégia de uso da terra, com geração de vários produtos, além de demonstrarem sustentabilidade ambiental e provisão de serviços ambientais (BOLFE et al., 2009).

Neste trabalho os sistemas alternativos de produção (corte-e-trituração e SAFs) apresentaram maiores ou similares valores de estoques de carbono no solo e serrapilheira, em relação ao sistema tradicional e áreas de referências, demonstrando que essas práticas agrícolas melhoram a qualidade do sistema, além de proporcionarem benefícios para outras funções ecossistêmicas e serviços ambientais. Turetta et al. (2016) avaliaram as funções do solo em agroecossistemas e seus impactos sobre os serviços ambientais, e observaram que os critérios usados na implantação e gestão de agroecossistemas com maior potencial para aumentar o fornecimento de serviços ambientais foram “sem uso de fogo” e “consórcios agrícolas”, práticas de manejo adotadas nos sistemas alternativos deste estudo. Turetta et al. (2016) também observaram que os tipos de serviços ambientais mais afetados pela implantação e gestão dos agroecossistemas foram os serviços de provisão e suporte, concluindo que o tipo de manejo agrícola mostra alto potencial de fornecer variados serviços. Ainda neste estudo, também foram avaliados os parâmetros do solo que mais se adequavam para serem usados como indicadores no monitoramento dos impactos dos agroecossistemas na prestação de serviços ambientais, sendo o estoque de carbono no solo e serrapilheira os melhores parâmetros encontrados.

Como observado neste estudo, os estoques de carbono no solo e serrapilheira podem ser excelentes indicadores para avaliar a qualidade da prática de manejo utilizada. Estes resultados podem servir de auxílio para o desenvolvimento de políticas públicas, quanto à utilização de sistemas alternativos de produção. Contudo,

recomenda-se para estudos futuros a padronização dos métodos de coleta e análise química do solo, sendo essencial para facilitar as comparações entre sistemas, pois uma das dificuldades encontradas, ao buscar na literatura, foi a comparação de dados de diferentes sistemas.

7. CONCLUSÃO

Nesta pesquisa os sistemas de corte-e-queima e corte-e-trituração apresentaram maior tendência em estocar carbono na serrapilheira, na fração densimétrica da matéria orgânica do solo e no solo, em relação às áreas de referências (florestas secundária e primária). No entanto, vale ressaltar que o período entre preparo da área e coleta das amostras foi curto, possivelmente não refletindo o provável decréscimo da qualidade do solo ao longo do tempo no sistema com queima. Assim, há necessidade de uma avaliação do experimento em um tempo mais longo para verificar possíveis mudanças nos estoques de carbono.

Os SAFs demonstraram alto potencial de estoque de carbono dos compartimentos avaliados, apresentando valores similares aos das áreas de referências. Estes resultados sugerem que a adoção destes sistemas pode ser uma alternativa para a conservação de características de ecossistemas naturais, além da capacidade para prestação de serviços ambientais.

A quantificação do estoque de carbono (solo e serrapilheira) e o estoque de serrapilheira, nos SAFs, demonstraram grande potencial como indicadores para subsidiar estudos de prestação de serviços ambientais, assim como atestar a qualidade dos sistemas de agroecossistemas.

REFERÊNCIAS

- ADAMS, E. E.; CALDEIRA, K. Ocean storage of CO₂. **Elements**, v. 4, n. 5, p. 319–324, 2008.
- ADL, S.; IRON, D.; KOLOKOLNIKOV, T. A threshold area ratio of organic to conventional agriculture causes recurrent pathogen outbreaks in organic agriculture. **Science of the Total Environment**, v. 409, n. 11, p. 2192–2197, 2011.
- ADUAN, R. E.; VILELA, M. D. F.; KLINK, C. A. Ciclagem de carbono em ecossistemas terrestres - O caso do cerrado brasileiro. **Documentos/ Embrapa Cerrados**, v. 1, n. 105, p. 30, 2003.
- ADUAN, R. E.; VILELA, M. D. F.; REIS JÚNIOR, F. B. D. R. Os Grandes ciclos biogeoquímicos do planeta. **Documentos/Embrapa Cerrados**, v. 1, n. 119, p. 25, 2004.
- ALBRECHT, A.; KANDJI, S. T. Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 99, n. 1–3, p. 15–27, 2003.
- ALTIERI, M. Agroecologia: bases científicas para uma agricultura sustentável. 3. ed. rev. ampl. São Paulo: Expressão Popular; Rio de Janeiro: AS-PTA, p. 400, 2012.
- AMADO, T. J. C. et al. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 25, n. 1, p. 189–197, 2001.
- ANDRADE, D. C.; ROMEIRO, A. R. Serviços ecossistêmicos e sua importância para o sistema econômico e o bem-estar humano. **Ie/Unicamp**, n. 155, p. 45, 2009.
- ANDRADE, A. G. de; TAVARES, S. R. de L.; COUTINHO, H. L. da C. Contribuição da serrapilheira para recuperação de áreas degradadas e para manutenção da sustentabilidade de sistemas agroecológicos. **Informe Agropecuário, Belo Horizonte**, v. 24, n. 220, p. 55–63, 2003.
- ARAGÃO, D. V. de et al. Avaliação de indicadores de qualidade do solo sob alternativas de recuperação do solo no Nordeste Paraense. **Acta Amazonica**, v. 42, n. 1, p. 11–18, 2012.
- ARAGÃO, L. E. O. E. C. DE; SHIMABUKURO, Y. E. Perspectivas para o estudo da biogeoquímica do carbono em macro-escala integrando diferentes técnicas: Modelagem ecológica, sensoriamento remoto e Sig. **Relatorio Técnico - INPE**, p. 98, 2004.
- ARATO, H. D.; MARTINS, S. V.; FERRARI, S. H. D. S. Produção e decomposição de serrapilheira em um sistema agroflorestral implantado para recuperação de área degradada em Viçosa-MG. **Revista Árvore**, v. 27, n. 5, p. 715–721, 2003.
- BAE, K. et al. Seasonal variation of soil respiration rates in a secondary forest and agroforestry systems. **Agroforestry Systems**, v. 87, n. 1, p. 131–139, 2013.

- BALBINO, L. C. et al. Evolução tecnológica e arranjos produtivos de sistemas de integração lavoura-pecuária-floresta no Brasil. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 46, n. 10, p. 1–12, 2011.
- BALBINO, L. C.; BARCELLOS, A. de O.; STONE, L. F. Marco referencial integração lavoura-pecuária-floresta. **Brasília: Embrapa**, v. 1, p. 130, 2011.
- BARBOSA, M. D. S. et al. Sistemas agroflorestais como estratégia de desenvolvimento rural sustentável da pequena produção familiar no município de Tomé-açu / PA. In: Congresso Norte Nordeste de Pesquisa e Inovação, 7., 2012. Palmas, **Anais...**Palmas: IFTO, 2012. 7p.
- BARDGETT, R. D. The biology of soil: A community and ecosystem approach. Oxford University Press, **Oxford**, UK, p. 256, 2005.
- BARRAL, M. P. et al. Quantifying the impacts of ecological restoration on biodiversity and ecosystem services in agroecosystems: A global meta-analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 202, p. 223–231, 2015.
- BAYER, C.; AMADO, T. J. C.; TORNQUIST, C. G.; CERRI, C. E. P.; DIECKOW, F.; ZANATTA, J. A.; NICOLOSO, R. S.; CARVALHO, P. C.F. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C., (eds.) **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, MG, v.7, p.55- 118, 2011.
- BAY, M. **Variabilidade do estoque de carbono no solo considerando diferentes coberturas vegetais e o uso da terra no Município Ariquemes - RO**. 2015. 112f. Dissertação (Mestrado em Geografia), Universidade Federal de Rondônia. 2015.
- BELLINGHAM, P. J. et al. Litterfall, nutrient concentrations and decomposability of litter in a New Zealand temperate montane rain forest. **New Zealand Journal of Ecology**, v. 37, n. 2, p. 162–171, 2013.
- BOLFE, E. L.; BOLFE, A. P. F.; BERGAMASCO, S. M. P. P.; FERREIRA, M. C. Sistemas agroflorestais e sua potencialidade como serviços ambientais na agricultura familiar. In: Congresso Brasileiro de Sistemas Agroflorestais, 7., Brasília, DF, 2009. **Anais...** Brasília: SBSAF: Embrapa, 2009.
- BOMBELLI, A. et al. An outlook on the Sub-Saharan Africa carbon balance. **Biogeosciences**, v. 6, n. 10, p. 2193–2205, 2009.
- BRITTO, G. C.; KATO, O. R.; HERRERA, J. A. A Prestação de serviços ambientais pode ser uma alternativa aos sistemas tradicionais da agricultura familiar no município de Pacajá , Amazônia Paraense – Brasil? **Sustentabilidade em Debate**, v. 3, n. 2, p. 159–176, 2012.
- BULLOCK, J. M. et al. Restoration of ecosystem services and biodiversity: Conflicts and opportunities. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 26, n. 10, p. 541-549, 2011.
- CALDEIRA, M. V. W. et al. Quantificação de serapilheira e de nutrientes - Floresta ombrófila mista Montana - Paraná. **Rev. Acad.**, v. 5, n. 2, p. 101–116, 2007.

- CALONEGO, J. C. et al. Estoques de carbono e propriedades físicas de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Caatinga**, v. 25, n. 2, p. 128–135, 2012.
- CANUTO, J. C. **Sistemas Agroflorestais: experiências e reflexões**. 1 ed. Brasília, DF: Embrapa, p. 216, 2017.
- CAPORAL, F. R.; COSTABEBER, J. A. J. Agroecologia e extensão rural: contribuições para a promoção do desenvolvimento rural sustentável. 1 (eds). Brasília: MDA/SAF/DATER/IICA, 2004, 166p.
- CARMO, F. F. et al. Frações granulométricas da matéria orgânica em latossolo sob plantio direto com gramíneas. **Bioscience Journal**, v. 28, n. 3, p. 420–431, 2012.
- CARVALHO, J. L. N. et al. Potential of soil carbon sequestration in different biomes of Brazil. **Revista Brasileira de Ciencia Do Solo**, v. 34, n. 2, p. 277–289, 2010.
- CARVALHO, P. C. de F. et al. Definições e terminologias para sistema integrado de produção agropecuária. **Revista Ciencia Agronomica**, v. 45, n. 5, p. 1040–1046, 2014.
- CARVALHO, W. R. de. **Estoque de carbono e fracionamento físico da matéria orgânica do solo sob cultivos de palma de óleo (*Elaeis guineensis*) em sistemas agroflorestais na Amazônia Oriental**. 2011. 69f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Pará, Belém, 2011.
- CASTRO, R. M. D. S.; RUIVO, M. D. L. P.; SILVA, M. F. F. da. Disponibilidade de serapilheira em sistema agroflorestal com queima e sem queima e capoeirão, no Município de Bragança, Pará. **Revista FAFIBE on line**, v. 4, p. 1–6, 2011.
- CHAN, K. Y.; BOWMAN, A.; OATES, A. Oxidizable organic carbon fractions and soil quality changes in an oxic paleustalf under different pasture leys. **Soil Science**, v. 166, n. 1, p. 61–67, 2001.
- CHRISTENSEN, B. T. Organic matter in soil: structure, function and turnover. In: **PLANT production**. Tjele, p. 95, 2000. (DIAS Report, 30).
- CIANCIARUSO, M. V. et al. Produção de serapilheira e decomposição do material foliar em um cerradão na Estação Ecológica de Jataí, município de Luiz Antônio, SP, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 20, n. 1, p. 49–59, 2006.
- COGO, F. D. et al. Carbono orgânico de um Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiros em sistemas de manejo agroflorestal e convencional. **Revista Agroambiental**, v. 4, n. 2, p. 1–9, 2012.
- CONCEIÇÃO, P. C. et al. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio no estudo da proteção física da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 32, n. 1, p. 541–549, 2008.
- COSTA, E. A.; GOEDERT, W. J.; de SOUSA, D. M. G. Qualidade de solo submetido a sistemas de cultivo com preparo convencional e plantio direto. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 41, n. 7, p. 1185–1191, 2006.

COSTANZA, R. et al. Current History - an excellent six-page (including a concise chart) exposition of ecological economics. **Burlington, VM: University of Vermont and State Agricultural College**. p. 6, 2008.

DIAS, R. R. A. **Modelagem dos estoques de carbono do solo sob diferentes coberturas na Região do Cerrado**. 2010. 120f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) - Universidade de Brasília. 2010.

DICK, D. P. et al. Impacto da queima nos atributos químicos e na composição química da matéria orgânica do solo e na vegetação. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 1, p. 633–640, 2008.

ELOY, L.; COUDEL, E.; TONI, F. Implementando pagamentos por serviços ambientais no Brasil: caminhos para uma reflexão críticas. **Sustentabilidade em Debate**, v. 4, n. 1, p. 21–42, 2013.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 2 ed. ver. atual. p. 212, 1997.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análise de solo**. Documentos/ Embrapa Solos, v. 2, n. 132, p. 230, 2011.

ESPIG, S. A. et al. Sazonalidade, composição e aporte de nutrientes da serapilheira em fragmento de Mata Atlântica. **Revista Árvore**, v. 33, n. 5, p. 949–956, 2009.

FALLOON, P. et al. Climate change and its impact on soil and vegetation carbon storage in Kenya, Jordan, India and Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 122, n. 1, p. 114–124, 2007.

FEIDEN, A. Métodos alternativos para biocontrole na agricultura. Corumbá: Embrapa Pantanal, 2009. Disponível em: <<http://www.cpap.embrapa.br/publicacoes/online/FOL148.pdf>>. Acesso em: 26 mar. 2016.

FIDALGO, E. C. C. et al. Estoque de carbono nos solos do Brasil. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento/ Embrapa Solos**, v. 1, n. 121, p. 27, 2007.

FOLEY, J. A. et al. Solutions for a cultivated planet. **Nature**, v. 478, n. 7369, p. 337–342, 2011.

FREITAS, I. C. et al. Carbono no solo, acúmulo e qualidade da serapilheira em sistemas de produção familiar. **Floresta**, v. 46, n. 1, p. 31–38, 2016.

FREIXO, A. et al. Estoques de carbono e nitrogênio e distribuição de frações orgânicas de latossolo do Cerrado sob diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 1, p. 425–434, 2002.

FREIXO, A. A.; CANELLAS, L. P.; MACHADO, P. L. O. A. Propriedades espectrais da matéria orgânica leve-livre e leve intra-agregado de dois latossolos sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, n. 3, p. 445–453, 2002.

FROUFE, L. C. M.; RACHWAL, M. F. G.; SEOANE, C. E. S. Potencial de sistemas agroflorestais multiestrata para sequestro de carbono em áreas de ocorrência de Floresta Atlântica. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 66, p. 143–154, 2011.

GAMA-RODRIGUES, E. F. et al. Alterações na biomassa e na atividade microbiana da serapilheira e do solo, em decorrência da substituição de cobertura florestal nativa por plantações de eucalipto, em diferentes sítios da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1489–1499, 2008.

GAMA-RODRIGUES, E. F. et al. Carbon storage in soil size fractions under Two cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. **Environmental Management**, v. 45, n. 2, p. 274–283, 2010.

GAMA-RODRIGUES, A. C. DA; GAMA-RODRIGUES, E. F. da; BARROS, N. F. Balanço de carbono e nutrientes em plantio puro e misto de espécies florestais nativas no Sudeste da Bahia. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1165–1179, 2008.

GARCIA, P. C. M. et al. Estoque e distribuição da serrapilheira em diferentes sistemas florestais. **Rev. Univ. Rural**, v. 25, n. 1, p. 12–17, 2005.

GÓMEZ-BAGGETHUN, E. et al. The history of ecosystem services in economic theory and practice: From early notions to markets and payment schemes. **Ecological Economics**, v. 69, n. 6, p. 1209–1218, 2010.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Cidades: Tomé-Açu. 2010. Disponível em: <<http://cod.ibge.gov.br/3SM>>. Acesso em: 04 out. 2016.

IKPE, F. N.; OWOEYE, L. G.; GICHURU, M. P. Nutrient recycling potential of *Tephrosia candida* in cropping systems of southeastern Nigeria. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 67, n. 2, p. 129–136, 2003.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate change 2014: synthesis report**. Contribution of working groups I, II and III to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva, Switzerland: IPCC, 2014. 151 p.

IWATA, B. de F. et al. Agroforestry systems and its effects on chemical attributes of an Ultisol in the “Cerrado” of Piauí State, Brazil. **Revista Brasileira De Engenharia Agrícola E Ambiental**, v. 16, n. 7, p. 730–738, 2012.

JAKELAITIS, A. et al. Quality of soil surface layer under forest, pasture and cropped areas. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 38, n. 2, p. 118–127, 2008.

JANZEN, H. H. Carbon cycling in earth systems - A soil science perspective. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 104, n. 3, p. 399–417, 2004.

JOSE, S. Agroforestry for conserving and enhancing biodiversity. **Agroforestry Systems**, v. 85, n. 1, p. 1–8, 2012.

KATO, M. S. A. et al. Fire-free alternatives to slash-and-burn for shifting cultivation in the eastern Amazon region: The role of fertilizers. **Field Crops Research**, v. 62, n. 2–3, p. 225–237, 1999.

KATO, O. R. et al. Agricultura sem queima : uma proposta de recuperação de áreas degradadas com sistemas agroflorestais sequencias. In: reunião brasileira de manejo e conservação do solo e da água, 18, 2010, Teresina. **Novos caminhos para a agricultura conservacionista no Brasil**. Teresina: Embrapa Meio-Norte: Universidade Federal do Piauí, 2010. 1 CD-ROM.. v. 1, p. 1–29.

KNICKER, H. et al. Characteristic alterations of quantity and quality of soil organic matter caused by forest fires in continental Mediterranean ecosystems: A solid-state ¹³C NMR study. **European Journal of Soil Science**, v. 57, n. 4, p. 558–569, 2006.

KNICKER, H. How does fire affect the nature and stability of soil organic nitrogen and carbon? A review. **Biogeochemistry**, v. 85, n. 1, p. 91–118, 2007.

KORN, H. et. al. Opções de mitigação e de adaptação a mudança climática: conexões com a biodiversidade e impactos sobre a biodiversidade. In: SÁ, A. L. L. de (Trad.). **Inter-relações entre biodiversidade e mudanças climáticas**. Brasília,DF: MMA, 2007. cap. 4, p. 79-137.

KRAGT, M. E.; ROBERTSON, M. J. Quantifying ecosystem services trade-offs from agricultural practices. **Ecological Economics**, v. 102, p. 147–157, 2014.

KUNDE, R. J. et al. Frações físicas da matéria orgânica em Latossolo cultivado com cana-de-açúcar no Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1520–1528, 2016.

KUNKEL, M. L. et al. A simplified approach for estimating soil carbon and nitrogen stocks in semi-arid complex terrain. **Geoderma**, v. 165, n. 1, p. 1–11, 2011.

KUTSCH, W. L.; BAHN, M.; HEINEMEYER, A. Soil carbon dynamics: an integrated methodology. **United States of America by Cambridge University Press**, v. 6, p. 298, 2009.

LAL, R. Challenges and opportunities in soil organic matter research. **European Journal of Soil Science**, v. 60, n. 2, p. 158–169, 2009.

LEITE, L. F. C.; IWATA, B. de F.; ARAÚJO, A. S. F. Soil organic matter pools in a tropical Savanna under Agroforestry system in Northeastern Brazil. **Revista Árvore**, v. 38, n. 4, p. 711–723, 2014.

LEMOS, E. C. **Emissão de dióxido de carbono e estoque de carbono em sistemas convencionais e alternativos de produção agropecuária no Nordeste Paraense**. 2011. 90f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - UFPA/MPEG/EMBRAPA, Belém, 2011.

LIMA, A. M. N. et al. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de eucalipto no Vale do Rio Doce-MG. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 32, n. 3, p. 1053–1063, 2008.

- LIMA, A. J. P. de; CARMO, M. S. do. Agricultura sustentável e a conversão agroecológica. **Desenvolvimento em Questão**, v. 4, n. 7, p. 47–72, 2006.
- LIMA, S. S. de et al. Serapilheira e teores de nutrientes em argissolo sob diferentes manejos no norte do Piauí. **Revista Árvore**, v. 34, n. 1, p. 75–84, 2010.
- LIMA, S. S. de et al. Chemical properties and carbon and nitrogen stocks in an acrisol under agroforestry system and slash and burn practices in northern Piauí state. **Revista Arvore**, v. 35, n. 1, p. 51–60, 2011.
- LINHARES, J. M. da S. et al. Variabilidade de atributos físico-químico e dos estoques de carbono orgânico em argissolo vermelho sob sistemas agroflorestais no assentamento Umari sul do Amazonas. **Rev. Geogr. Acadêmica**, v. 10, n. 1, p. 93–117, 2016.
- LOPES, P.; LOPES, K. Sistemas de produção de base ecológica—a busca por um desenvolvimento rural sustentável. **REDD—Revista Espaço de Diálogo e Desconexão**, v. 4, n. 1, p. 32, 2011.
- LUCIANO, R. V. et al. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, n. 6, p. 1733–1744, 2012.
- LUIZÃO, F. J.; TAPIA-CORAL, S.; GALLARDO-ORDINOLA, J.; SILVA, G. C.; LUIZÃO, R. C. C.; TRUJILLO-CABRERA, L.; WANDELLI, E.; FERNANDES, E. C. M. Ciclos biogeoquímicos em agroflorestas na Amazônia. In: CBSAF. 6. 2006, Campos dos Goytacazes. **Anais...** Campos dos Goytacazes: UENF, 2006. p. 87-100.
- MACHADO, P. L. O. D. A. Carbono do solo e a mitigação da mudança climática global. **Química Nova**, v. 28, n. 2, p. 329–334, 2005.
- MAO, D. H. et al. Soil organic carbon in the sanjiang plain of China: storage, distribution and controlling factors. **Biogeosciences**, v. 12, p. 1635–1645, 2015.
- MARAFIGA, J. S. et al. Deposição de nutrientes pela serapilheira em um fragmento de Floresta Estacional Decidual no Rio Grande do Sul. **Revista Ceres**, v. 59, n. 6, p. 765–771, 2012.
- MARCOLAN, A. L.; LOCATELLI, M.; FERNANDES, S. R. Atributos químicos e físicos de um Latossolo e rendimento de milho em diferentes sistemas de manejo da capoeira. **Comunicado técnico- Embrapa**, v. 352, p. 1–6, 2009.
- MARKS, E. et al. Conservation of soil organic carbon, biodiversity and the provision of other ecosystem services along climatic gradients in West Africa. **Biogeosciences Discussions**, v. 5, n. 6, p. 4413–4452, 2008.
- MARQUES, J. D. de O. et al. Distribution of organic carbon in different soil fractions in ecosystems of central amazonia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 1, p. 232–242, 2015.

- MARTIUS, C. et al. Litterfall, litter stocks and decomposition rates in ranforest and agroforestry sites in central Amazonia. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 68, p. 137–154, 2004.
- MATOS, F. O. et al. Teores de nutrientes do solo sob sistema agroflorestal manejado com e sem queima no estado do Pará. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 3, p. 257–266, 2012.
- MATTOS, L., HERCOWITZ, M. Economia do meio ambiente e serviços ambientais estudo aplicado à agricultura familiar, às populações tradicionais e aos povos indígenas. **Embrapa Informação Tecnológica**, v. 1, n. 1, p. 294, 2011.
- MATTOS, L. **Marco Referencial em Agroecologia**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, p. 70, 2006.
- Millennium Ecosystem Assessment - MEA, 2005. Ecosystems and Human Well-being: Synthesis. Island Press, Washington, DC.
- MINATEL, J. F.; BONGANHA, C. A. Agronegócios: a importância do cooperativismo e da agricultura familiar. **Empreendedorismo, Gestão e Negócios**, v. 4, n. 4, p. 247–259, 2015.
- MONROE, P. H. M. et al. Soil carbon stocks and origin under different cacao agroforestry systems in Southern Bahia, Brazil. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 221, p. 99–108, 2016.
- MOTA, M. C.; TOREZAN, J. M. D. Necromassa em reflorestamentos com espécies nativas da Mata Atlântica com 4, 6 e 8 anos de implantação. **Hoehnea**, v. 40, n. 3, p. 499–505, 2013.
- NEGASH, M.; STARR, M. Biomass and soil carbon stocks of indigenous agroforestry systems on the south-eastern Rift Valley escarpment, Ethiopia. **Plant and Soil**, v. 393, n. 1–2, p. 95–107, 2015.
- OELBERMANN, M. et al. Soil carbon dynamics and residue stabilization in a Costa Rican and southern Canadian alley cropping system. **Agroforestry Systems**, v. 68, n. 1, p. 27–36, 2006.
- OELBERMANN, M.; PAUL VORONEY, R.; GORDON, A. M. Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: A review with examples from Costa Rica and southern Canada. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 104, n. 3, p. 359–377, 2004.
- OLIVEIRA, E. S.; REATTO, A.; ROIG, H. L. Estoque de carbono do solo segundo os componentes da paisagem. **Caderno de Ciência & Tecnologia**, v. 32, p. 71–93, 2015.
- PACHECO, N. A.; BASTOS, T. X. Boletim Agrometeorológico 2005 – Tomé Açú. **Embrapa Amazônia Oriental**, v. 277, p. 35, 2006.
- PACHECO, N. ARAUJO; BASTOS, T. X. Boletim agrometeorológico 2006 - Igarapé-Açu. **Documentos/ Embrapa**, v. 1, n. 296, p. 30, 2007.

- PARRON, L. M. et al. Estoque de carbono no solo como indicador de serviços ambientais. **Embrapa Florestas**. p. 370, 2015.
- PEDRA, W. N. et al. Estoques de carbono e nitrogênio sob diferentes condições de manejo de um Argissolo Vermelho Amarelo, cultivado com milho doce nos tabuleiros costeiros de Sergipe. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, n. 6, p. 2075–2089, 2012.
- PEDROSO-JUNIOR, N. N.; ADAMS, C.; MURRIETA, R. S. S. Slash-and-burn agriculture: A system in transformation. **Bol. Mus. Para. Emílio Goeldi**, v. 3, n. 2, p. 153–174, 2008.
- PEREIRA, E. L.; NASCIMENTO, J. S. Efeitos do Pronaf sobre a produção agrícola familiar dos municípios tocantinenses. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 52, n. 1, p. 139–156, 2014.
- PEREIRA, M. F. S. et al. Ciclagem do carbono do solo nos sistemas de plantio direto e convencional. **ACSA – Agropecuária Científica no Semi-Árido**, v. 8, n. 1, p. 21–32, 2013.
- PEZARICO, C. R. et al. Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais. **Revista de Ciências Agrárias - Amazon Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 56, n. 1, p. 40–47, 2013.
- PINHEIRO, E. F. M. et al. Fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo sob diferentes sistemas de manejo e cobertura vegetal em Paty do Alferes (RJ). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 3, p. 731–737, 2004.
- PIRES, L. A. et al. Produção, acúmulo e decomposição da serapilheira em uma restinga da Ilha do Mel, Paranaguá, PR, Brasil. **Acta Botanica Brasilica**, v. 20, n. 1, p. 173–184, 2006.
- PORTUGAL, A. F. et al. Determinação de estoques totais de carbono e nitrogênio e suas frações em sistemas agrícolas implantados em argissolo vermelho-amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 5, p. 2091–2100, 2008.
- PRADO, M. R. V. et al. Organic carbon and total nitrogen in the densimetric fractions of organic matter under different soil management. **Revista Caatinga**, v. 29, n. 2, p. 263–273, 2016a.
- PRADO, R. B. et al. Current overview and potential applications of the soil ecosystem services approach in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1021–1038, 2016b.
- PRADO, R. de M.; ROQUE, C. G.; SOUZA, Z. M. de. Sistemas de preparo e resistência à penetração e densidade de um Latossolo Vermelho eutrófico em cultivo intensivo e pousio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, n. 12, p. 1795–1801, 2002.
- PREVIATI, R. et al. Isolamento e quantificação das populações de bactérias em geral e de actinomicetos presentes no solo. **Arquivos de Ciências ...**, v. 15, n. 2, p. 155–160, 2012.

- RAMESH, T. et al. Assessment of soil organic carbon stocks and fractions under different agroforestry systems in subtropical hill agroecosystems of north-east India. **Agroforestry Systems**, v. 89, p. 677–690, 2015.
- RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A. Estoques de carbono e nitrogênio e frações orgânicas de latossolo submetido a diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, v. 31, n. 6, p. 1609–1623, 2007.
- RANGEL-VASCONCELOS, L. G. et al. Estoque de carbono e diversidade florística de vegetação de pousio em áreas submetidas aos sistemas de corte-e-queima e corte-e-trituração em Marapanim, Nordeste Paraense. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 4, n. 2, p. 2558–2561, 2009.
- REDIN, M. et al. Impacts of burning on chemical, physical and biological. **Ciência Florestal**, v. 21, p. 381–392, 2011.
- RHEINHEIMER, D. D. S. et al. Modificações nos atributos químicos de solo sob campo nativo submetido à queima. **Ciência Rural**, v. 33, p. 49–55, 2003.
- RITA, J. C. O. et al. C and N content in density fractions of whole soil and soil size fraction under cacao agroforestry systems and natural forest in Bahia, Brazil. **Environmental Management**, v. 48, n. 1, p. 134–141, 2011.
- ROCHA, G. P. et al. Characterization and carbon storage of agroforestry systems in brazilian savannas of Minas Gerais, Brazil (In Portuguese). **Ciência Rural**, v. 44, n. 7, p. 1197–1203, 2014.
- ROCHA, M. de S.; PEREIRA, E. S.; TEIXEIRA, V. M. Avaliação de impactos ambientais na agricultura familiar de Colorado Do Oeste, Rondônia. In: V Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, Belo Horizonte/MG, p. 1–5, 2014. **Anais...** Belo Horizonte/MG, 2014.
- RODRIGUES, S. J. S. de et al. Matéria orgânica leve do solo em sistemas com preparo de área com queima e trituração em Igarapé-Açu. In: Seminário de Iniciação Científica da Embrapa oriental, 17.; Seminário de Pós-graduação da Embrapa Amazônia Oriental, 1., 2013, Belém, PA. **Anais**. Belém, PA: Embrapa Amazônia Oriental, 2013.
- ROSCOE, R. et al. Effects of fire on soil organic matter in a "cerrado sensu-stricto" from Southeast Brazil as revealed by changes in $\delta^{13}\text{C}$. **Geoderma**, v. 95, p. 141–160, 2000.
- ROSCOE, R. et al. Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopic ratio in a Cerrado's oxisol. **Geoderma**, v. 104, n. 3–4, p. 185–202, 2001.
- ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. de. A. Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica. **Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos**. p. 86, 2002.
- ROSENDO, J. D. S.; ROSA, R. Comparação do estoque de C estimado em pastagens e vegetação nativa de Cerrado. **Sociedade & Natureza**, v. 24, n. 2, p. 359–376, 2012.

ROSSET, J. S. et al. Agricultura convencional versus sistemas agroecológicos: modelos, impactos, avaliação da qualidade e perspectivas. **Scientia Agraria Paranaensis**, v. 13, n. 2, p. 80–94, 2014.

SÁ, T. D. DE A. et al. Queimar ou não queimar? **Revista USP**, n. 72, p. 90–97, 2007.

SAMPAIO, C. A.; KATO, O. R.; NASCIMENTO-E-SILVA, D. Corte e trituração da capoeira sem queima como alternativa de uso da terra, rumo à sustentabilidade florestal: O caso Tipitamba em Igarapé-Açu-Pará. In: Ix Engema - Encontro Nacional Sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente, Curitiba, 2007. **Resumo**. Curitiba: FEA/FGV, 2007.

SAMPAIO, C. A.; KATO, O. R.; NASCIMENTO-E-SILVA, D. Sistema de corte e trituração da capoeira sem queima como alternativa de uso da terra, rumo à sustentabilidade florestal no Nordeste Paraense. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 2, n. 1, p. 41–53, 2008.

SANCHES, L. et al. Dinâmica sazonal da produção e decomposição de serrapilheira em floresta tropical de transição Seasonal dynamics of the litterfall production and decomposition in tropical transitional forest. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 2, p. 183–189, 2009.

SANDERSON, M. A. et al. Diversification and ecosystem services for conservation agriculture: Outcomes from pastures and integrated crop–livestock systems. **Renewable Agriculture and Food Systems**, v. 28, n. 2, p. 129–144, 2013.

SANTOS, L. de O. L. **Percepção de um grupo de agricultores da localidade São João do Município de Marapanim-PA, sobre o método de corte e trituração como alternativa ao método tradicional de corte e queima da vegetação secundária**. 2006. 184f. Dissertação (Mestrado em Agriculturas Familiares e Desenvolvimento Sustentável) - NEAF/UFP/EMBRAPA, Belém. 2006.

SANTOS, J. O. dos et al. Os sistemas alternativos de produção de base agroecológica. **ACSA – Agropecuária Científica no Semi-Árido**, v. 9, n. 1, p. 1–8, 2013.

SEEHUSEN, S. E.; GUEDES, F. B. **Pagamento por Serviços Ambientais na Mata Atlântica - lições aprendidas e desafios**. Brasília: MMA, p. 272, 2011.

SHARROW, S. H.; ISMAIL, S. Carbon and nitrogen storage in agroforests, tree plantations, and pastures in western Oregon, USA. **Agroforestry Systems**, v. 60, n. 2, p. 123–130, 2004.

SILVA, M. S. C. **Indicadores de qualidade do solo em sistemas agroflorestais em Paraty, RJ**. 2006, 68f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2006.

SILVA, I.R.; MENDONÇA, E.S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B.; NEVES, J.C.L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.275-374. 2007.

SILVA, M. M., LOVATO, P. E., VIEIRA, I. C. O Sistema de produção de corte e queima desenvolvido pelos agricultores familiares na região da Transamazônica- Pará. **Revista Brasileira de Agroecologia**, v. 4, n. 2, p. 4401–4404, 2009.

SILVA, A. K. L. et al. Estoque de serapilheira e carbono no solo em sistemas de preparo de área com corte-e-queima e corte-e-trituração da vegetação secundária na Região Bragantina, Nordeste do Pará, Amazônia. In: Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, 29.; Reunião brasileira sobre micorrizas, 13.; Simpósio brasileiro de microbiologia do solo, 11.; Reunião brasileira de biologia do solo, 8.; 2010, Guarapari. Fontes de nutrientes e produção agrícola: modelando o futuro. **Anais...** Viçosa, MG: SBCS, 2010.

SILVA, M.; SIQUEIRA, E. R.; COSTA, J. L. D. S. Hidrólise de diacetato de fluoresceína como bioindicador da atividade microbológica de um solo submetido a reflorestamento. **Ciência Rural**, v. 34, n. 5, p. 1493–1496, 2004.

SILVA, R. M. et al. Aplicação da espectroscopia de emissão ótica com plasma induzido por laser (LIBS) na quantificação de carbono em amostras de solo intacto. **Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento**, v. 1, p. 17, 2008.

SILVA, L. R. P. da et al. Agricultura familiar amazônica: sistema de produção - Ilha Compompema - Abaetetuba - Pará. **Fragmentos de Cultura**, v. 25, n. 2, p. 253–262, 2015.

SILVA, M. S. C. da et al. Estoque de serapilheira e atividade microbiana em solo sob sistemas agroflorestais. **Floresta e Ambiente**, v. 19, n. 4, p. 431–441, 2012.

SILVEIRA, N. D. et al. Aporte de nutrientes e biomassa via serrapilheira em sistemas agroflorestais em Paraty (RJ). **Ciência Florestal**, v. 17, n. 2, p. 129–136, 2007.

SIMINSKI, A.; FANTINI, A. C. Roça-de-toco: uso de recursos florestais e dinâmica da paisagem rural no litoral de Santa Catarina. **Ciência Rural**, v. 37, n. 3, p. 690–696, 2007.

SIX, J. et al. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturatin of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155–176, 2002.

SMITH, P. Land use change and soil organic carbon dynamics. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 81, n. 2, p. 169–178, 2008.

SOARES, J. P. G.; CAVALCANTE, A. C. R.; JUNIOR, E. V. H. Agroecologia e sistemas de produção orgânica para pequenos ruminantes. **Embrapa Agrobiologia/ Embrapa Caprinos**, p. 40, 2008.

SOHI, S. P. et al. A Procedure for Isolating Soil Organic Matter Fractions Suitable for Modeling. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 4, p. 1121, 2001.

SOMMER, R. et al. Nutrient balance of shifting cultivation by burning or mulching in the Eastern Amazon - Evidence for subsoil nutrient accumulation. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 68, n. 3, p. 257–271, 2004.

- SOTO-PINTO, L. et al. Carbon sequestration through agroforestry in indigenous communities of Chiapas, Mexico. **Agroforestry Systems**, v. 78, n. 1, p. 39–51, 2010.
- SOUSA NETO, L. E. et al. Atributos físicos do solo e produtividade de milho em resposta a culturas de pré-safra. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 2, p. 255–260, 2008.
- SOUZA JÚNIOR, J. C. de et al. O manejo com a trituração da vegetação favorece o incremento de matéria orgânica e as formas de fósforo no solo. **Scientia Plena**, v. 11, n. 9, p. 10–16, 2015.
- SRIVASTAVA, P. et al. Soil carbon sequestration: An innovative strategy for reducing atmospheric carbon dioxide concentration. **Biodiversity and Conservation**, v. 21, n. 5, p. 1343–1358, 2012.
- STROSSER, E. Methods for determination of labile soil organic matter: an overview. **Journal of Agrobiology**, v. 27, n. 2, p. 49–60, 2010.
- STYGER, E. et al. Influence of slash-and-burn farming practices on fallow succession and land degradation in the rainforest region of Madagascar. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 119, n. 3–4, p. 257–269, 2007.
- TAPIA-CORAL, S. C. et al. Carbon and nutrient stocks in the litter layer of agroforestry systems in central Amazonia, Brazil. **Agroforestry Systems**, v. 65, n. 1, p. 33–42, 2005.
- TITO, M. R.; ORTIZ, R. A. Projeto apoio aos diálogos setoriais EU-Brasil. Pagamentos por serviços ambientais: desafios para estimular a demanda. **Brasília: MMA**, p. 52, 2013.
- TORMENA, C. A. et al. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Scientia Agricola**, v. 59, n. 4, p. 795–801, 2002.
- TRENTIN, C. B. **Estoque de carbono nas áreas de vegetação campestre da área de proteção ambiental (APA) do Ibirapuitã**. 2015. 98f. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.
- TRINDADE, E. F. et al. Disponibilidade de fósforo em solos manejados com e sem queima no Nordeste Paraense. **Ciência & Desenvolvim**, v. 6, n. 12, p. 7–20, 2011.
- TRINDADE, E. F. da S.; VALENTE, M. A.; MOURÃO JÚNIOR, M. Propriedades físicas do solo sob diferentes sistemas de manejo da capoeira no nordeste paraense. **Agroecossistemas**, v. 4, n. 1, p. 50–67, 2012.
- TSCHARNTKE, T. et al. Global food security, biodiversity conservation and the future of agricultural intensification. **Biological Conservation**, v. 151, n. 1, p. 53–59, 2012.
- TURETTA, A. P. D. et al. An approach to assess the potential of agroecosystems in providing environmental services. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1051–1060, 2016.

- URQUIAGA, S. et al. Manejo de sistemas agrícolas para seqüestro de carbono no solo. **Curso Agrobiologia**, p. 323–342, 2005.
- VALE, R. S. **Agrossilvicultura com eucalipto como alternativa para o desenvolvimento sustentável da Zona da Mata de Minas Gerais**. 2004. p. 101. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2004.
- VARELA, L. B.; SANTANA, A. C. de. Aspectos econômicos da produção e do risco nos sistemas agroflorestais e nos sistemas tradicionais de produção agrícola em Tomé-Açu, Pará – 2001 a 2003. **Árvore, Viçosa-MG**, v. 33, n. 1, p. 151–160, 2009.
- VELDKAMP, E. Organic carbon turnover in three tropical soils under pasture after deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.175-180, 1994.
- VERBRUGGEN, E. et al. Provision of contrasting ecosystem services by soil communities from different agricultural fields. **Plant and Soil**, v. 350, n. 1–2, p. 43–55, 2012.
- VIEIRA, T. A. et al. Sistemas agroflorestais em áreas de agricultores familiares em Igarapé-Açu, Pará: caracterização florística, implantação e manejo. **Acta Amazonica**, v. 37, n. 4, p. 549–558, 2007.
- WATTEL-KOEKKOEK, E. J. W.; BUURMAN P. Mean residence time of kaolinite and smectitebound organic matter in Mozambiquean soils. **Soil Sci. Soc. Am.**, 68:154-161, 2004.
- WICKEL, B. Water and nutrient dynamics of a humid tropical watershed in Eastern Amazonia. Bonn: Center of Development Research-University of Bonn, 2004, 135 p. (Ecology and development series 21).
- WODA, C. Indicadores para serviços ambientais em sistemas agroflorestais: um estudo de caso no nordeste paraense. In: PORRO, R. (Ed. Tec.) **Alternative agroflorestral na Amazônia em transformação**. Brasília. DF. p. 625-642, 2009.
- WORLD RESOURCES INSTITUTE (WRI). **Avaliação empresarial dos serviços dos ecossistemas**. Diretrizes para a identificação de riscos e oportunidades empresariais decorrentes da alteração dos ecossistemas. 2012.