



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

ADÃO BARROS DE MORAIS

**CRONOSSEQUÊNCIA EM SISTEMA AGROFLORESTAL:
IMPACTO NOS TEORES DE CARBONO, ÁGUA E NUTRIENTES DO SOLO**

FORTALEZA

2022

ADÃO BARROS DE MORAIS

CRONOSSEQUÊNCIA EM SISTEMA AGROFLORESTAL:
IMPACTO NOS TEORES DE CARBONO, ÁGUA E NUTRIENTES DO SOLO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa.

Co-orientador: Prof. Dr. Everton Alves Rodrigues Pinheiro.

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

M825c Morais, Adão Barros de.
Cronossequência em sistema agroflorestal: impactos nos teores de carbono, água e nutrientes do solo
/ Adão Barros de Morais. – 2022.
53 f.: il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa.

Coorientação: Prof. Dr. Everton Alves Rodrigues Pinheiro.

1. Perfil do solo. 2. Conservação do solo. 3. Agricultura sustentável. 4. Manejo da vegetação. I. Título.
CDD 630

ADÃO BARROS DE MORAIS

CRONOSSEQUÊNCIA EM SISTEMA AGROFLORESTAL:
IMPACTO NOS TEORES DE CARBONO, UMIDADE E NUTRIENTES DO SOLO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola. Área de concentração: Manejo e Conservação de Bacias Hidrográficas no Semiárido

Orientador: Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa.

Co-orientador: Prof. Dr. Everton Alves Rodrigues Pinheiro

Aprovada em ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Everton Alves Rodrigues Pinheiro
Universidade Federal do Tocantins (UFT)

Dr. Carlos Alberto Kenji Taniguchi
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA)

Prof. Dra. Maria Ivanilda de Aguiar
Universidade da Integração Internacional da Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

Prof. Dr. Julius Blum
Universidade Federal do Ceará (UFC)

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

À Agência Estadual de Desenvolvimento do Ceará (ADECE), Secretaria de Desenvolvimento Econômico e Trabalho do Ceará (SEDET), Fundação de Amparo ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico do Ceará (FUNCAP).

Ao Programa Cientista-chefe em Agricultura (Convênio 14/2022 SDE/ADECE/FUNCAP e Processo 08126425/2020/FUNCAP) pelo apoio financeiro fornecido para esta pesquisa.

Ao Prof. Dr. Carlos Alexandre Gomes Costa pela excelente orientação.

Ao Prof. Dr. Everton Alves Rodrigues Pinheiro pelas generosas contribuições e orientações.

Ao Prof. José Carlos e ao grupo Hidrosed pelo suporte e ensinamentos durante o desenvolvimento da pesquisa.

À EMBRAPA Agroindústria Tropical e ao Dr. Carlos Alberto Kenji Taniguchi pela análise e interpretação das amostras de solo.

Aos participantes da banca examinadora, Profa. Dra. Maria Ivanilda de Aguiar e Prof. Dr. Julius Blum, pelo tempo, pelas valiosas sugestões.

Aos colegas da turma de Mestrado, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas, nestes tempos de Pandemia, a falta de interação com todos, especialmente em campo, foi certamente o maior desafio para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos da comunidade Pachamama, Dr. Marco Antonio, Dra. Mércia e Gaia Machado, por todo apoio e generosidade a mim dedicados em todas as visitas e campanhas para coleta de dados.

À MSc. Dione Maria Almeida Marques pela generosidade e cuidado com a formatação deste trabalho.

À minha companheira de vida, Ana Maria Almeida Marques, por todo apoio, amor e cumplicidade na busca do conhecimento e no enfrentamento dos desafios cotidianos.

Às minhas filhas, Bruna Barros e Beatriz Barros e ao meu genro, Alysson Oliveira, por todo estímulo e carinho nestes tempos de estudo.

Enfim, ao Theo Barros de Oliveira, meu neto, para quem procurarei dentro dos limites humanos, garantir que em seu futuro haja árvores, florestas, água e ar limpos.

Quaisquer acertos deste trabalho devem-se fundamentalmente às pessoas que colaboraram para sua realização, eventuais erros são de minha inteira responsabilidade e por isso, agradeço aos autores consultados e referenciados, desconhecidos que fazem a ciência avançar e superar as trevas do obscurantismo e negacionismo deste nosso tempo.

RESUMO

Os sistemas agroflorestais (SAF) são viáveis para recompor a fertilidade dos solos e aliar produção e conservação do solo. Portanto, objetivou-se avaliar o nível de fertilidade da camada superficial do solo (0-10 cm) em cronosequência inicial de SAF e comparar os resultados com dois outros usos do solo: vegetação nativa (VN), e monocultura de feijão (MONO). A pesquisa foi conduzida na comunidade Pachamama, situada no município de Cascavel, Ceará. Para tanto, foram coletadas amostras de solo deformadas nas profundidades de 0-5 cm e de 5-10 cm, em cinco repetições nos três usos de solo, permitindo avaliar: i) carbono particionado; ii) fósforo; iii) temperatura e umidade do solo; iv) bases do solo; v) acidez. Os parâmetros de carbono particionado avaliados incluíram o teor de carbono orgânico total (COT) e suas frações, carbono orgânico particulado (COP) e carbono orgânico associado aos minerais (COam). Foram avaliados os teores de fósforo (P) e das bases potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg) e sódio (Na). O SAF foi distribuído em cronosequência de zero (SAF0) a quatro anos de implantação (SAF4). As médias dos resultados foram submetidas aos testes de normalidade e as médias comparadas pelo teste Scott-Knott a 5% de probabilidade. O manejo do solo na cronosequência de SAF elevou os teores de COT em até 322% no SAF2, 535% no SAF3 e 674% no SAF4 em relação à VN. O teor de COP do SAF2 foi 70% superior ao da VN, enquanto nos SAF3 e SAF4 os teores de COP foram equivalentes aos da VN. O teor de COam do SAF2, SAF3 e SAF4 foi de duas a nove vezes superior ao teor da VN; os teores de P mais elevados foram observados nos SAF1 e SAF2; os teores de saturação de bases (V%) foram mais elevados nos SAF2 e SAF1 e a CTC do solo máxima foi a do SAF4; SAF3 e SAF4 apresentaram acidez moderada; registrou-se temperatura do solo dos SAFs e de VN até 10 oC inferiores em relação à MONO, enquanto a umidade do solo em SAF4 e SAF3, foi até 50% superior aos demais usos de solo. Concluiu-se que os SAF elevaram o teor de COT, especialmente da fração mais estável, COam; reduziram a perda de P nos SAF1 e SAF2; elevaram a CTC dos SAF3 e SAF4; o teor das bases do solo não se mostrou diretamente relacionado aos manejos. Os SAF aumentaram o teor de água do solo, possivelmente por conta do alto teor de MOS e redistribuição da água subsuperficial pelas raízes de grupos funcionais heterogêneos e promoveram equilíbrio térmico do solo por conta da interceptação da luz solar pelo dossel e da cobertura do solo.

Palavras-chave: perfil do solo; conservação do solo; sustentabilidade agrícola; manejo da vegetação.

ABSTRACT

Agroforestry systems (AFS) are viable for restoring soil fertility and combining production and soil conservation. Therefore, the objective was to evaluate the fertility level of the soil surface layer (0-10 cm) in the initial AFS chronosequence and compare the results with two other land uses: native vegetation (VN) and bean monoculture (MONO). . The research was conducted in the Pachamama community, located in the municipality of Cascavel, Ceará. For this purpose, deformed soil samples were collected at depths of 0-5 cm and 5-10 cm, in five replications in the three soil uses, allowing the evaluation of: i) partitioned carbon; ii) phosphorus; iii) soil temperature and moisture; iv) soil bases; v) acidity. The partitioned carbon parameters evaluated included total organic carbon (TOC) and its fractions, particulate organic carbon (COp) and mineral-associated organic carbon (COam). Phosphorus (P) and potassium (K), calcium (Ca), magnesium (Mg) and sodium (Na) contents were evaluated. The SAF was distributed in chronosequence from zero (SAF0) to four years of implantation (SAF4). The means of the results were subjected to normality tests and the means compared by the Scott-Knott test at 5% probability. Soil management in the AFS chronosequence increased TOC levels by up to 322% in AFS2, 535% in AFS3 and 674% in AFS4 in relation to VN. The COp content of SAF2 was 70% higher than that of VN, while in SAF3 and SAF4 the COp contents were equivalent to those of VN. The COam content of SAF2, SAF3 and SAF4 was two to nine times higher than that of VN; the highest P contents were observed in AFS1 and AFS2; base saturation contents (V%) were higher in AFS2 and AFS1 and the maximum soil CEC was that of AFS4; SAF3 and SAF4 showed moderate acidity; Soil temperature in SAFs and VN was recorded up to 10 °C lower than MONO, while soil moisture in SAF4 and SAF3 was up to 50% higher than in other land uses. It was concluded that the APS increased the TOC content, especially the most stable fraction, COam; reduced P loss in AFS1 and AFS2; raised the CTC of SAF3 and SAF4; the content of soil bases was not directly related to management. AFS increased soil water content, possibly due to the high SOM content and redistribution of subsurface water by roots of heterogeneous functional groups, and promoted soil thermal balance due to the interception of sunlight by the canopy and soil cover.

Keywords: soil profile; soil conservation; agricultural sustainability; vegetation management.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização do estudo.....	27
Figura 2 - Precipitação média mensal observada entre os anos de 1991 a 2021, município de Cascavel, Ceará.....	28
Figura 3 - Perfil do solo da área de estudo (A) e usos do solo MONO (B), SAF0 (C), SAF1 (D), SAF2 (E), SAF3 (F), SAF4 (G) e VN (H).	29
Figura 4 - Coleta de solo para análise e uso de sensor para coleta de dados de umidade e temperatura	32
Figura 5 - Teor de carbono orgânico particulado (COp), carbono orgânico associado aos minerais (COam) e carbono orgânico total (COT) em três diferentes usos do solo: Mono, VN e SAF, na profundidade de 0-5cm e de 5 – 10 cm.	34
Figura 6 - Teor de carbono orgânico particulado (COp), em três diferentes usos do solo: Mono, VN e SAF, na profundidade de 0-5cm (A) e de 5 – 10 cm (B)	35
Figura 7 - Teor de carbono orgânico associado aos minerais (COam) em três diferentes usos do solo: Mono, VN e SAF, na profundidade de 0-5cm (A) e de 5 – 10 cm (B)....	37
Figura 8 - Padrão de crescimento de COp, COam e COT na cronossequência de SAF em que: 1 = SAF0; 2 = SAF1; 3 = SAF2; 4 = SAF3 e 5 = SAF 4, nas camadas de 0 – 5 cm e de 5 – 10 cm.	39
Figura 9 - Proporção dos teores de COp e COam em COT, nos usos de solo MONO, VN e cronossequência de SAF, nas camadas de 0 – 5 cm (A) e de 5 – 10 cm (B).....	40
Figura 10 - Teor de Fósforo (P) em Monocultura (Mono), Vegetação Nativa (VN) e em cronossequência de SAF, na profundidade de 0-5cm e de 5-10cm.....	41
Figura 11 - Potencial hidrogeniônico (A), acidez potencial (B), alumínio (C) e saturação por alumínio (D) em Monocultura (Mono) Vegetação Nativa (VN) e cronossequência de SAF, na profundidade de 0 a 5cm e de 5 a 10cm.....	44
Figura 12 - Temperatura em °C (A) e umidade médias do solo (B), em (m ³ m ⁻³), em monocultura, (MONO), vegetação nativa (VN) e em cronossequência de SAF nas camadas de 0-5cm e de 5-10cm	45
Figura 13 - Umidade do solo em%, no perfil de 0 a 60cm, em Monocultura (Mono), Vegetação Nativa (VN) e em cronossequência de SAF	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição geográfica e temas de trabalhos científicos sobre Sistemas Agroflorestais	22
Tabela 2 - Descrição e caracterização dos usos do solo da comunidade Pachamama, em Cascavel, Ceará, Brasil	28
Tabela 3 - Espécies presentes nos SAF da área de estudo: nome popular, nome científico e funções potenciais.....	30
Tabela 4 - Síntese do teor de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado e carbono orgânico associado aos minerais (COam), nas profundidades de 0-5cm e de 5-10cm, em monocultura, VN e cronossequência de SAF	37
Tabela 5 - Teores observados de Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V%) nos usos de solo monocultura (MONO), vegetação nativa (VN) e cronossequência de SAF, nas profundidades de 0-5cm e de 5-10cm.....	42

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	Alumínio
ATER	Assistência Técnica e Extensão Rural
C	Carbono
Ca	Cálcio
CO ₂	Dióxido De Carbono
CO _{am}	Carbono Orgânico associado aos minerais
CO _p	Carbono Orgânico particulado
COT	Carbono Orgânico Total
CTC	Capacidade de Troca de Cátions
DBC	Delineamento em Blocos Casualizados
FAO	Organização das Nações Unidas para a Alimentação e a Agricultura
FTSS	Florestas Tropicais Sazonalmente Secas
Funceme	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
K	Potássio
M	Saturação Por Alumínio
Mg	Magnésio
MONO	Monocultura
MOS	Matéria Orgânica do Solo
N	Nitrogênio
Na	Sódio
P	Fosforo
pH	Potencial Hidrogeniônico
PSA	Pagamento por Serviços Ambientais
SAF	Sistemas Agroflorestais
SE	Serviços Ecossistêmicos
V%	Saturação por bases
VN	Vegetação Nativa

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
2	REVISÃO DE LITERATURA	13
2.1	A agricultura convencional e as mudanças climáticas	13
2.2	Sistemas Agroflorestais (SAF)	14
2.3	Exemplos de sistemas agroflorestais	19
2.4	Matéria Orgânica do Solo (MOS) e carbono do solo.....	23
2.4.1	<i>Carbono Orgânico Total (COT)</i>	24
2.4.2	<i>Carbono Orgânico Particulado (COp) e Carbono Associado aos Minerais (COam)</i>	25
3	MATERIAL E MÉTODOS	27
3.1	Área de estudo.....	27
3.2	Caracterização dos usos do solo	28
3.3	Carbono orgânico total, carbono orgânico particulado e carbono orgânico associado aos minerais.....	31
3.4	Teor de nutrientes e elementos relacionados à acidez.....	31
3.5	Temperatura e umidade do solo	31
3.6	Análise estatística.....	32
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	34
4.1	Carbono Orgânico Total.....	34
4.2	Teor de Nutrientes	41
4.2.1	<i>Teor de Fósforo (P).....</i>	41
4.2.2	<i>Teor das bases do solo, capacidade de troca catiônica e saturação por bases (V%).</i>	42
4.2.3	<i>Elementos relacionados à acidez do solo</i>	43
4.3	Temperatura e umidade do solo	45
5	CONCLUSÕES.....	48
	REFERÊNCIAS.....	49

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, há consenso científico quanto à influência humana no processo de mudanças climáticas do planeta desde o início da era industrial, ou antropoceno. Indica-se, por meio de estudos, que a agricultura se encontra no centro desse processo porque para atender à demanda global de alimentos, fibras, madeira e energia transforma continuamente e em escala global, ecossistemas florestais em cultivos. Além disso, são requeridos para o desenvolvimento da agricultura, elevado aporte de insumos externos. (ALTIERI; NICHOLLS, 2017; MBOW *et al.*, 2014).

Assim, a agricultura intensiva quando mal manejada contribui para o agravamento das crises contemporâneas causando: i) liberação excessiva de dióxido de carbono (CO₂) e outros gases de efeito estufa para a atmosfera; ii) perda de água e de solo; iii) degradação dos ecossistemas; e iv) comprometimento da qualidade dos serviços ecossistêmicos (SE) (ALTIERI *et al.*, 2015; COSTANZA *et al.*, 1997).

Nesse contexto, faz-se necessário produzir alimentos, fibras e energia com mais sustentabilidade para uma população em expansão, adotando-se assim, os Sistemas Agroflorestais (SAF). Esses sistemas proporcionam maior cobertura do solo, favorecem a preservação da fauna e da flora, promovem a ciclagem de nutrientes a partir da ação de sistemas radiculares diversos e propiciam um contínuo aporte de matéria orgânica (MAIA *et al.*, 2006).

Em condições de clima tropical e semiárido a degradação da matéria orgânica é acelerada devido às elevadas temperaturas, porém, os SAF promovem aumento do teor de C, aumento da capacidade de retenção de água do solo e aumento da capacidade de ciclagem de nutrientes (BAYALA; PRIETO, 2019; CEZAR *et al.*, 2015; FROUFE *et al.*, 2020; ILSTEDT *et al.*, 2016). Apesar deste potencial, são poucos os estudos de avaliação dos impactos dos SAF na fertilidade do solo, especialmente no teor de carbono, capacidade de retenção de água e ciclagem dos nutrientes, o que possibilita inferir o grau de fertilidade, de perturbação ou degradação do solo de um determinado ecossistema com avaliação do teor do carbono orgânico total (COT), teor de carbono orgânico particulado (COp), carbono orgânico associado aos minerais (COam) (SUÁREZ *et al.*, 2021; WOLSCHICK *et al.*, 2018).

Tendo em vista os benefícios que o SAF pode promover na qualidade química e física do solo, a hipótese desse estudo é que o SAF eleva os teores de carbono (C) e nutrientes do solo, contribuindo direta e indiretamente com a conservação do teor de água e com o regime térmico do solo.

Portanto, objetivou-se avaliar o nível de fertilidade da camada superficial do solo (0-10 cm) em cronosequência de sistemas agroflorestais (SAF) e comparar os resultados com dois outros usos do solo: vegetação nativa (VN), como uma referência do ecossistema mata de tabuleiro, comum nos tabuleiros costeiros, e monocultura de feijão (MONO). Para tanto, buscou-se: i) avaliar o carbono particionado e suas frações, COp e COam; ii) avaliar os teores de fósforo (P); iii) avaliar a temperatura e umidade do solo; iv) avaliar os teores das bases do solo; e v) avaliar as variáveis relacionadas à acidez do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A agricultura convencional e as mudanças climáticas

Evidencia-se na contemporaneidade múltiplas crises: social, ecológica e sanitária, decorrentes das atividades humanas. Indica-se por evidências científicas tendência de forte desequilíbrio climático global, com impactos diretos e indiretos sobre os ecossistemas naturais, o abastecimento de água e a saúde pública (GRÊT-REGAMEY *et al.*, 2017; IPCC, 2014, 2021; SHARMA; CHAUHAN; TRIPATHI, 2016).

Estima-se que cerca de 15% a 25% das emissões globais de dióxido de carbono (CO₂) para a atmosfera relacionam-se com a agricultura (FOSTER; NEUFELDT, 2014) principalmente em razão da transformação continuada, e em escala planetária, de florestas em cultivos e pastagens. Sobre isso, Altieri *et al.*, (2015) e a Organização das Nações Unidas para a Alimentação e Agricultura (FAO) estimam que aproximadamente 80% da terra arável do mundo destina-se à produção de *commodities* agrícolas. Estas mercadorias constituem-se na base econômica de países em desenvolvimento, o que os torna dependentes de recursos externos para produzir e comercializar, ao tempo em que se tem base produtiva ecologicamente frágil (FAO, IFAD, UNICEF, 2021).

A esse respeito, Jamal (2020) concluiu que nos países africanos as escolhas dos governos de especializarem a economia na produção de *commodities* em detrimento do desenvolvimento de outros setores produtivos, aceleraram a urbanização e intensificaram as pressões sobre os ecossistemas. Contudo, desenvolveu-se nos países periféricos a agricultura como atividade extratora de recursos naturais (ARAÚJO FILHO, 2013; BAYALA; PRIETO, 2019) e causadora de desmatamentos em larga escala. Além disso, desconsiderou-se no modelo agrícola adotado pela revolução verde as especificidades locais, os modos de produzir e as variedades adaptadas ao clima e aos solos regionais (ARAÚJO FILHO, 2013; BAYALA; PRIETO, 2019; MICCOLIS *et al.*, 2016).

Dessa forma, as mudanças climáticas ameaçam os sistemas de produção agrícola, a economia e a segurança alimentar dos países em desenvolvimento (GRÊT-REGAMEY *et al.*, 2017). Nesse sentido, estudos de modelagem climática indicam potenciais efeitos negativos sobre as safras, por exemplo, perda de áreas férteis, extinção de populações selvagens de espécies vegetais e aumento da vulnerabilidade socioeconômica das populações humanas que dependem das cadeias produtivas da agricultura (CHARBONNIER *et al.*, 2017).

Como agravante é observado o incremento gradual do plantio em monocultura e a

diminuição da riqueza, da diversidade de espécies vegetais e animais, o que coloca em risco a estabilidade ecológica dos ecossistemas terrestres (NESPER *et al.*, 2017; THOMAZINI *et al.*, 2015). Espera-se, ao utilizar mais variedades que demandam maior uso de agrotóxicos e fertilizantes, mais produção e renda a curto prazo, mas desconsidera-se possíveis impactos sobre os ecossistemas (GRÊT-REGAMEY *et al.*, 2017; JEZEER *et al.*, 2017). Por estes motivos é que cresce a relação causal da produção agrícola com a erosão genética, o comprometimento da estabilidade dos ecossistemas e a exclusão social (ALTIERI *et al.*, 2015; ALTIERI; NICHOLLS, 2017).

Desse modo, ao intensificar-se o uso de fertilizantes solúveis, por exemplo, mostrou-se que esta tecnologia não pode substituir os serviços que as florestas forneceriam, uma vez que tal prática não contribui para a estruturação do solo (MBOW *et al.*, 2014). Além disso, provoca-se com as práticas intensivas de cultivo, degradação do solo, *feedbacks* positivos para o aquecimento global (IPCC, 2014, 2021), queda da renda local e comprometimento da qualidade dos recursos hídricos (ALTIERI *et al.*, 2015; CHARBONNIER *et al.*, 2017; MBOW *et al.*, 2014). Assim, com a adoção dos SAFs é possível estabelecer modelos de produção mais estáveis e que podem amenizar as adversidades encontradas pela agropecuária nas regiões semiáridas.

2.2 Sistemas Agroflorestais (SAF)

Define-se Sistema Agroflorestal como o uso da terra no qual agricultores manejam de forma deliberada, no mesmo espaço árvores, arbustos e culturas agrícolas anuais (ZHANG; XIAO; HUANG, 2016). Altieri *et al.*, (2015) consideram esse sistema adotado por agricultores tradicionais, estratégia eficiente, desenvolvida ao longo dos séculos, às quais podem-se incorporar conhecimentos científicos. Este manejo da terra encontra-se amplamente difundido na literatura científica como um modo de preservar a qualidade dos serviços ecossistêmicos (SE) (TAUGOURDEAU *et al.*, 2014) prestados pelo solo. Na região do Sahel no Mali, por exemplo, reflete a estratégia dos agricultores para produzir grãos, pastagens e fibras e com os SAF diminuir riscos de perdas agrícolas por eventos climáticos extremos (ALTIERI *et al.*, 2015; BAYALA *et al.*, 2014). Para Foster e Neufeldt (2014), ao aliar-se os benefícios ambientais dos SAF ao potencial de gerar recursos para os agricultores familiares, é possível aumentar a produtividade agrícola e a segurança alimentar; possibilitar a redução da pobreza no campo e proporcionar maior resiliência aos cultivos.

Por outro lado, Thomazini *et al.*, (2015) consideram os SAF como sistemas de manejo agrícola essenciais no processo de transição da agricultura convencional, altamente dependente de insumos externos e geradora de degradação ambiental, para uma agricultura mais sustentável. Nesse sentido, Ordonez *et al.*, (2014) afirmam que, com SAF aumenta-se a capacidade de aproveitar e potencializar as interações entre espécies arbóreas, arbustos e culturas anuais herbáceas.

Em produção de café, por exemplo, observou-se que as árvores de sombra aumentaram a produtividade primária líquida (TAUGOURDEAU *et al.*, 2014), modificaram o microclima, reduziram o escoamento superficial e a erosão, regularam o fluxo de gás carbônico (CO₂) e diminuíram a perda de nutrientes do solo (THOMAZINI *et al.*, 2015). O objetivo da prática dos SAF é aproximar o ambiente agrícola em função e estrutura, dos ecossistemas florestais naturais, isto pode aumentar o sequestro de carbono (ALTIERI *et al.*, 2015; GOMES *et al.*, 2016), por meio da formação da biomassa das árvores (HENRY *et al.*, 2009) e, pela prática da poda, no próprio solo. Com as árvores integrando o sistema agrícola é possível conservar ou aumentar a biodiversidade, ao propiciar mais nichos ecológicos para o estabelecimento de populações de microrganismos, insetos, aves, répteis e mamíferos (BRAVO-MONROY; TZANOPOULOS; POTTS, 2015; CAUDILL; DECLERCK; HUSBAND, 2015).

Desse modo, as práticas fundamentais dos SAF visam manter o solo coberto com plantas vivas ou mortas, não promover queimadas e manejar adequadamente a biodiversidade vegetal e animal (ARAÚJO FILHO, 2013; BAYALA; PRIETO, 2019). De forma deliberada é acumulado material orgânico sob a copa das árvores e protege-se o solo da erosão, os organismos do solo são alimentados e isto melhora a estruturação e agregação do solo, contribui com a ciclagem de nutrientes, estabiliza a temperatura do solo e reduz a evaporação, conservando a umidade (GOMES *et al.*, 2016; TAUGOURDEAU *et al.*, 2014).

Os arranjos de SAF baseiam-se na dinâmica florestal de sucessão e estratificação. Na sucessão, as espécies pioneiras melhoram o ambiente e propiciam nichos ecológicos para outras mais exigentes, as secundárias iniciais, que por sua vez atuam no meio de forma a torná-lo propício para as de ciclo mais longo, secundárias tardias ou climáticas (GREGIO, 2020; VIEIRA; HOLL; PENEIREIRO, 2009).

Para otimizar os recursos como a luz solar, por exemplo, estes grupos sucessionais que possuem diferentes necessidades ecofisiológicas, podem ser organizados em estratos verticais diferenciados (CEZAR *et al.*, 2015; FROUFE *et al.*, 2020; MICCOLIS *et al.*, 2019).

Desta forma, quanto mais próxima da organização natural no espaço e no tempo, ou seja, grupos sucessionais em seus estratos verticais apropriados, maior será a produção e menor a dependência de recursos externos (REBELLO; SAKAMOTO, 2021).

Estudos recentes indicam a capacidade dos SAF de aumentar a fertilidade e qualidade dos solos (CEZAR *et al.*, 2015; FROUFE *et al.*, 2020; SUÁREZ *et al.*, 2021). Em particular, o manejo dos restos das podas das árvores como estratégia para aumentar a matéria orgânica do solo, o qual pode contribuir para melhorar os níveis de fertilidade do solo através do aumento da população de microrganismos responsáveis pela fixação de nitrogênio atmosférico, aumentando a oferta de nutrientes para a produção agrícola (COULIBALY *et al.*, 2017; JEZEER *et al.*, 2017; NESPER *et al.*, 2017). Desta forma, a prática da cobertura do solo, organizando-se o material oriundo das podas, pode diminuir impactos negativos da fertilização com adubos de alta solubilidade, especialmente em ambientes áridos e semiáridos (MBOW *et al.*, 2014), como a contaminação de corpos hídricos ou a salinização do solo.

Por outro lado, o potencial de fertilidade dos solos florestais e a necessidade crescente de produção de alimentos, fibras, madeira e energia aceleram o desmatamento (MWANGI *et al.*, 2016). Assim, em todo o mundo é promovida a substituição de florestas por agricultura, pecuária e áreas urbanizadas (MILLER; HESS, 2017). Adicionalmente, são observadas a geração e ampliação de danos ambientais, tais como: aumento do escoamento superficial, aceleração da erosão, aumento da compactação do solo e perda da fertilidade natural e de carbono do solo (BLANCO SEPÚLVEDA; AGUILAR CARRILLO, 2015).

Em regiões semiáridas, a erosão é das mais importantes formas de degradação do solo (ALEWELL *et al.*, 2020; BASHAGALUKE *et al.*, 2018), que pode ser agravada pelo manejo, ao se fazer a remoção dos resíduos das culturas pelo fogo, o que resulta em aceleração da queda da fertilidade natural do solo (ARAÚJO FILHO, 2013; FREITAS *et al.*, 2013; MBOW *et al.*, 2014; MICCOLIS *et al.*, 2016).

No Quênia, por exemplo, a escassez e o alto custo dos fertilizantes minerais, aliados ao baixo desempenho do sistema agrícola, evidenciaram o potencial dos SAF para manter ou melhorar a fertilidade do solo, tanto pelo aumento da matéria orgânica do solo como pela fixação biológica de nitrogênio (N) por bactérias em associação com certas espécies arbóreas (MBOW *et al.*, 2014). Demonstrou-se que a fixação de N atmosférico e a ciclagem de nutrientes pode elevar o rendimento em culturas anuais até ao dobro de cultivos adubados com insumos externos (COULIBALY *et al.*, 2017). Isto porque o manejo das árvores pela poda, aporta matéria orgânica ao solo, aumenta a capacidade de retenção de água, estabiliza a temperatura

do solo e reduz as perdas de água do solo por evaporação (THOMAZINI *et al.*, 2015; TUMWEBAZE; BYAKAGABA, 2016; UPSON; BURGESS; MORISON, 2016).

Desse modo, espécies como *Gliricidia sepium* e *Leucaena leucocephala*, por exemplo, podem aportar ao solo de 108 a 548 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N (COULIBALY *et al.*, 2017). Outras espécies podem realocar água e nutrientes das camadas mais profundas do solo até a superfície (BAYALA; PRIETO, 2019; CUBILLOS *et al.*, 2016) e permitir o aproveitamento desses recursos por espécies herbáceas.

Logo, a adoção de SAF promove aumento gradual da fertilidade do solo (MBOW *et al.*, 2014; SUÁREZ *et al.*, 2021), proporciona maior estabilidade da matéria orgânica (GUILLOT *et al.*, 2019), contribui para a sustentabilidade ecológica e aumenta a eficiência energética e do uso da terra quando comparado à agricultura tradicional (ALTIERI *et al.*, 2015; GUILLOT *et al.*, 2019; THOMAZINI *et al.*, 2015).

No bioma brasileiro Mata Atlântica, Froufe *et al.* (2020) concluíram que os SAF transferem para o solo C, N, P, K e Mg, e que a poda das árvores é o principal mecanismo para a ciclagem dos nutrientes. Por sua vez, Cezar *et al.* (2015) verificaram que a partir dos cinco anos de implantação de SAF as propriedades biológicas do solo são semelhantes aos dos solos florestais, além de produzir alimentos e madeira.

Em outro bioma, Suárez *et al.* (2021) avaliaram a qualidade dos solos de floresta, pastagem e SAF com cacau na Amazônia. Concluíram que a adoção de SAF regenerou a fertilidade dos solos antes ocupados por pastagens degradadas; aumentou a estabilidade dos agregados do solo; elevou o teor de C do solo e promoveu a partir de 4 anos de implantação diversidade biológica que não diferiu estatisticamente dos solos de floresta.

Em relação à conservação dos recursos hídricos, Mwangi *et al.* (2016) ponderam que é essencial a determinação da porcentagem de cobertura florestal em escala de bacia hidrográfica para não se comprometer a oferta de água, uma vez que a extração de água de camadas mais profundas pelas raízes das árvores pode, em certas situações, comprometer o fluxo de base. No entanto, Miccolis *et al.* (2016) verificaram que com a adoção de SAF protege-se os recursos hídricos, regula-se a disponibilidade e a manutenção da qualidade da água. Assim, para o manejo dos recursos hídricos os SAF podem trazer impactos positivos, especialmente na manutenção da qualidade das águas. Isto porque a proteção física propiciada pelo acúmulo da biomassa vegetal nos SAF (THOMAZINI *et al.*, 2015) aliada à cobertura das árvores diminuem a geração de escoamento superficial, a erosão e o fluxo de nutrientes para os rios e reservatórios (MICCOLIS *et al.*, 2016). Eventual aumento da evapotranspiração poderá ser compensado

tanto pela maior qualidade das águas como pelo aumento da produtividade do solo (MWANGI *et al.*, 2016). A este respeito, estudos evidenciaram maior produção de alimentos, diminuição de uso de adubos sintéticos e agrotóxicos e regulação do fluxo de água e nutrientes do solo em SAF (BARGUÉS; TOBELLA *et al.*, 2017; BAYALA *et al.*, 2014; KUYAH *et al.*, 2016).

Para Bayala e Prieto (2019) os SAF promovem o uso eficiente da água e nutrientes por propiciar meios aprimorados de aquisição, distribuição e compartilhamento desses recursos entre espécies de árvores, arbustos e culturas herbáceas. Grêt-Regamey *et al.* (2017) argumentam que os SAF contribuem para a manutenção da qualidade dos SE, entre os quais encontram-se a proteção dos corpos hídricos, a purificação da água e o controle da erosão. Assim, podem ser considerados como uma ferramenta para controle da erosão acelerada, da produção de sedimentos e da manutenção da integridade dos SE em escala regional (MICCOLIS *et al.*, 2016).

Por outro lado, a adoção da bacia hidrográfica como unidade de planejamento de projetos agroflorestais poderá facilitar a implantação de SAF, o que demonstra a complementaridade entre o manejo de bacias hidrográficas em seus aspectos hidrológicos e de gestão (ARAÚJO; GÜNTNER; BRONSTERT, 2006; FIGUEIREDO *et al.*, 2016; PINHEIRO;

COSTA; ARAÚJO, 2013) e as pesquisas sobre os impactos das propriedades hidráulicas do solo promovidas pelo manejo dos SAF (MICCOLIS *et al.*, 2016; MWANGI *et al.*, 2016). Além disso, o planejamento dos plantios de SAF por bacias hidrográficas e a avaliação dos impactos que isso poderá trazer, pode resultar em mais agilidade na implantação de projetos que visem a recuperação ou restauração ambiental (SHARMA; CHAUHAN; TRIPATHI, 2016; STEENBOCK *et al.*, 2021).

Embora reconhecidamente vantajosos em termos ambientais e sociais, quando comparados com a agricultura convencional (ALTIERI *et al.*, 2015; MICCOLIS *et al.*, 2016), há desafios que precisam ser enfrentados para que ocorra a adoção de SAF em maior escala. Em primeiro lugar, a generalidade dos SAF, com arranjos que são utilizados pela agricultura convencional, pouco diversa (GOMES *et al.*, 2016) à agricultura familiar altamente diversificada (BARGUÉS TOBELLA *et al.*, 2017) e que descreve inúmeras formas de uso do solo. Em segundo lugar, Miccolis *et al.* (2016) destacam a falta de conhecimento dos agricultores, dos cientistas e dos técnicos dos princípios e técnicas de implantação dos SAF. Finalmente, outros aspectos são inerentes aos agricultores, especialmente, a vocação destes e das suas famílias para o desenvolvimento de SAF, a demanda por mão-de-obra especializada, a exigência de conhecimentos de técnicas específicas, tais como a poda (MICCOLIS *et al.*,

2016) e a disponibilidade de terra para agricultura familiar (ARAÚJO FILHO, 2013). Desta forma, os desafios para que SAF sejam implantados em escala podem ser superados por meio de políticas públicas, planejadas preferencialmente em escala de bacias hidrográficas e de modo participativo.

Estas políticas públicas podem ser integradas por ações de promoção do acesso à terra, programas de assistência técnica e extensão rural (ATER), e organização de cadeias produtivas mais curtas. Desse modo, caso sejam enfrentados estes desafios, os SAF podem se tornar a forma de conciliar as necessidades humanas com as da conservação da natureza (SÁ-SOUSA, 2014).

2.3 Exemplos de sistemas agroflorestais

Em muitas regiões do continente africano registra-se a prática de SAF, ou *parklands*, com densidade de árvores que varia de 5% de cobertura na região do Sahel a 45% nas partes úmidas, onde cultiva-se cacau, palma e outras espécies arbóreas (MBOW *et al.*, 2014). O autor citado considera que os SAF garantem sequestro de C e, ao mesmo tempo, aumentam a segurança alimentar da população. A esse respeito, em amplo estudo em Burkina Faso, Ilstedt *et al.* (2016) concluíram que além da capacidade de sequestrar C, a cobertura moderada de árvores em sistemas consorciados de culturas anuais, aumentou a capacidade de recarga subterrânea de água e manteve o solo úmido por mais tempo.

Em revisão sobre a influência de SAF sobre SE, a maioria dos estudos apontou incremento na produção de alimentos, melhoria do microclima, aumento da ciclagem de nutrientes, equilíbrio no ataque de pragas, elevação do nível de fertilidade do solo e regulação do fluxo de água (KUYAH *et al.*, 2016). Especificamente sobre a regulação da água no solo, Bayala; Prieto (2019) demonstraram que em SAF, as plantas com raízes profundas elevam e redistribuem água para as camadas superiores do solo, o que beneficia as plantas adjacentes, constituindo-se em mecanismo ecologicamente viável para assegurar a produção de alimentos em ambientes semiáridos.

Assim, nos desenhos dos SAF facilita-se a aquisição da água e dos nutrientes pelas plantas, uma vez que, os diferentes grupos funcionais como árvores e arbustos desenvolvem raízes mais profundas do que plantas herbáceas (BARGUÉS TOBELLA *et al.*, 2017) e desta forma os SAF podem diminuir o problema relacionado ao fator limitante da produção e da própria sobrevivência das espécies nas regiões áridas e semiáridas que é a disponibilidade de

água (ALTIERI *et al.*, 2015).

Por outro lado, em regiões úmidas promove-se com o manejo dos SAF o acúmulo de resíduos de vegetação criando barreira física que confere maior estabilidade dos agregados do solo, maior proteção física à matéria orgânica e menores perdas de C do solo (GUILLOT *et al.*, 2019; THOMAZINI *et al.*, 2015). Segundo Gomes *et al.* (2016) este manejo em SAF reduz a evaporação da água do solo, proporciona maior estabilidade da temperatura do solo, mantém a umidade e regula o fluxo de CO₂. Isto porque a respiração do solo, constituída pela respiração das raízes e dos microrganismos edáficos depende da temperatura e do teor de água do solo (BARTHOLOMEUS *et al.*, 2008; DE JONG VAN LIER; PINHEIRO; INFORSATO, 2018).

Nesse sentido, Cubillos *et al.* (2016) analisaram a comunidade de microrganismos em sistemas agrosilvopastoris na Colômbia e encontraram alta similaridade de espécies entre este sistema ea floresta nativa, contrastando com os plantios e sistemas de pastejo convencionais.

Gosnell; Grimm; Goldstein (2020) revisaram estudos sobre o manejo holístico de pastagem, (*Holistic Management* HM) técnica desenvolvida no *Zimbabwe*, que propõe reverter ou prevenir a desertificação, especialmente das regiões áridas e semiáridas. Os autores concluem que é possível conciliar o pastoreio com a recuperação dos ecossistemas áridos, uma vez que HM reproduz as interações entre herbívoros e vegetais que se observam nos ecossistemas naturais.

Para Mbow *et al.* (2014), a mudança do paradigma de produção nas regiões semiáridas, com a adoção de modos de produção desenvolvidos para ecossistemas de clima temperado difundidos pela revolução verde, provocou maior degradação dos solos e dos recursos hídricos. O manejo agroflorestal e pastoril adotado nos SAF e em outros modelos de agricultura regenerativa podem garantir mais sustentabilidade à agricultura (BARGUÉS TOBELLA *et al.*, 2017; BAYALA; PRIETO, 2019; ILSTEDT *et al.*, 2016).

A União Europeia (UE) considera o SAF como uso da terra com potencial para a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas, sequestro de carbono e manutenção da qualidade dos serviços ecossistêmicos (HERDER *et al.*, 2017). Na península Ibérica, por exemplo, persistem de 3,5 a 4 milhões de ha cultivados com carvalhos (*Quercus spp.*) e oliveiras que se encaixam na definição de SAF pela diversidade e multifuncionalidade (SÁ-SOUSA, 2014). Para Sharma; Chauhan; Tripathi (2016) é necessário que os projetos envolvendo SAF busquem evidenciar resultados econômicos, coeficientes técnicos, além dos benefícios ambientais inerentes.

No Brasil, Ernst Götsch desenvolveu um complexo sistema agroflorestal

sucessional em pastagens abandonadas do nordeste do Brasil (GREGIO, 2020; VIEIRA; HOLL; PENEIREIRO, 2009). Este sistema é baseado na sucessão natural das espécies e nas suas necessidades ecofisiológicas, ou estratificação, e permite a implantação de SAF estratificados e biodiversos em qualquer contexto climático (MICCOLIS *et al.*, 2019).

Araújo Filho (2013) preconizou para o Nordeste Brasileiro (NEB), SAF integrados à pecuária que assegurassem proteção física do solo, observando aumento na capacidade de suporte forrageiro e de produção de outros alimentos, como milho e feijão caupi. Miccolis *et al.* (2016) consideram que nessa região, os SAF direcionados para a produção de forragem, bem como culturas de ciclo curto e frutíferas adaptadas ao clima, são alternativas que permitem aliar a conservação dos ecossistemas com a qualidade de vida dos agricultores.

Araújo Filho (2013) destaca que cerca de 80% dos solos do semiárido nordestino são destinados ao pastoreio, embora antes possa ter sido plantio de feijão, milho ou algodão. Esse manejo, associado ao fogo e a itinerância, nos moldes do sistema derrubada e queima do período Neolítico (MAZOYER; ROUDART, 2009) perdeu a sustentabilidade ecológica, provavelmente a partir do início do século XX com a explosão demográfica. Ressalte-se que há técnicas desenvolvidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) para essa região, como o raleio e enriquecimento, as quais envolvem a manipulação da vegetação e o manejo mais sustentável de pastagem (ARAÚJO FILHO, 2013; MICCOLIS *et al.*, 2019; PEREIRA *et al.*, 2016).

Segundo Miccolis *et al.* (2016), o manejo dos SAF praticado por agricultores familiares caracteriza atividade de baixo impacto ambiental que pode gerar novas oportunidades para produção na fase de recuperação em áreas de preservação permanente (APP) e de reserva legal (RL). Outros pesquisadores destacam o potencial de estocar carbono dos SAF, por vezes, superior à própria vegetação nativa. (ALTIERI; NICHOLLS, 2017; CAUDILL; DECLERCK; HUSBAND, 2015; CEZAR *et al.*, 2015; FROUFE *et al.*, 2020; QUANDT, 2020; SHARMA; CHAUHAN; TRIPATHI, 2016).

Em países de clima tropical como o Brasil (GOMES *et al.*, 2016), a Índia (SHARMA; CHAUHAN; TRIPATHI, 2016) e Uganda, estudos para avaliação do potencial dos SAF de gerar renda e produção de culturas diversas e de sequestrar carbono indicam a adequação dos SAF aos projetos do mercado de créditos de C ou aos programas de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA) (TUMWEBAZE; BYAKAGABA, 2016). Miccolis *et al.* (2016) relatam que, em SAF biodiversos e bem manejados, podem ser obtidos rendimentos até vinte vezes superiores aos da bovinocultura e dez vezes aos do plantio de soja (*Glycine max*) por

unidade de área.

Assim, para a recuperação de áreas degradadas e em projetos que visem a remuneração por sequestro de C, ou PSA, a adoção de SAF mostra-se a mais viável, especialmente para a agricultura familiar (ALTIERI *et al.*, 2015; SHARMA; CHAUHAN; TRIPATHI, 2016) dos países tropicais, inclusive, nas regiões áridas e semiáridas. Nessas regiões, a taxa de sequestro de carbono é menor em comparação às regiões úmidas, mas estudos indicam que os SAF (NOTARO; GARY; DEHEUVELS, 2020; QUANDT, 2020) e outras práticas vegetativas, como o raleio da vegetação nativa (ANDRADE *et al.*, 2020) proporcionam maior estoque de C no solo do que a manutenção da vegetação em regeneração natural ou pousio.

Desse modo, o plantio de SAF representa resgate de práticas da agricultura tradicional, como consórcios, que aumentam a eficiência do uso da terra (ALTIERI; NICHOLLS, 2017; JEZEER *et al.*, 2017). Ao aliar as práticas tradicionais ao conhecimento científico os SAF propiciam a recuperação de áreas degradadas, inclusive pastagens, especialmente em países em desenvolvimento, como Brasil, Índia e países africanos (GOMES *et al.*, 2016; MBOW *et al.*, 2014; MICCOLIS *et al.*, 2016; NESPER *et al.*, 2017).

Adicionalmente, os SAF podem melhorar as condições físicas do solo (TAUGOURDEAU *et al.*, 2014). Atualmente, foi estabelecido consenso científico acerca da influência das atividades humanas, entre as quais a agricultura, na emergência climática global e nos seus impactos sobre os ecossistemas terrestres. Desse modo, alguns estudos buscam resgatar conhecimentos sobre sistemas de cultivos tradicionais que se mostram resilientes e adaptados aos eventos extremos do clima, bem como entender a dinâmica que permite essa adaptação, o que suscita pesquisas em diversos países, relacionando os SAF a diferentes abordagens científicas (Tabela 1):

Tabela 1 - Distribuição geográfica e temas de trabalhos científicos sobre Sistemas Agroflorestais

País	Tema central	Autor (es)
Brasil	Fluxo de CO ² no solo	Gomes <i>et al.</i> , (2016)
	Gases do Efeito Estufa	Thomazini <i>et al.</i> , (2015)
	Sistema Pastoril Sustentável na Caatinga	Araújo-Filho (2013)
	Recuperação florestal Cerrado e Caatinga	Miccolis <i>et al.</i> , (2016)
	Propriedades biológicas do solo	Cezar <i>et al.</i> (2015)
	Ciclagem de nutrientes em agroflorestas estratificadas	Froufe <i>et al.</i> (2020)
	Restauração ecológica com plantio de SAF	Gregio (2020)
	Restauração ecológica agrossucessional	Vieira; Holl; Penereiro (2009)
	Agroecologia e SAF	Steenbock <i>et al.</i> (2021)

Continua

País	Tema central	Autor (es)
Colômbia	Polinização de café e outros SE	Bravo-Monroy <i>et al.</i> , (2015)
	Fauna do solo	Cubillo <i>et al.</i> , (2016)
	Propriedades do solo em florestas, pastagens e SAF	Suárez <i>et al.</i> (2021)
Nicarágua	Erosão	Sepúlveda; Carrillo (2015)
Costa Rica	Eficiência de uso da luz	Charbonnier <i>et al.</i> , (2017)
	Refúgio de mamíferos; biodiversidade	Caudillet <i>et al.</i> , (2015)
	Diversidade e multifuncionalidade	Ordonez <i>et al.</i> , (2014)
	IAF e Serviços Ecossistêmicos	Taugourdeau <i>et al.</i> , (2014)
EUA	Adaptação às mudanças climáticas	Altier <i>et al.</i> (2015)
	Resiliência dos cultivos tradicionais	Altieri; Nicholls (2017)
China	Estabilidade Temporal da Umidade do Solo	Zhang <i>et al.</i> , (2016)
França	Estabilidade ecológica e fauna do solo	Guillot <i>et al.</i> , (2019)
Inglaterra	Estoque de Carbono	Upson <i>et al.</i> , (2016)
Finlândia	Extensão dos SAF na Europa	Herder <i>et al.</i> , (2017)
Portugal	Valores ecológicos x demandas humanas	Sá-Sousa (2014)
Suíça	Serviços Ecossistêmicos (revisão)	Grêt-Regamey <i>et al.</i> , (2016)
Holanda	Estudo sobre cacau e café	Jezeer <i>et al.</i> , (2017)
Malawi	Fixação de Nitrogênio e segurança alimentar	Coulibaly <i>et al.</i> , (2017)
Mali	Aquisição de água pelas raízes	Bayala e Prieto (2019)
	Sahel; redistribuição hidráulica	Bayala <i>et al.</i> , (2014)
Moçambique	Pagamento por bioCarbono	Foster e Neufeldt (2014)
Quênia	Mitigação e adaptação às mudanças climáticas	Mbow <i>et al.</i> , (2014)
Burkina Faso	Uso de árvores x déficit hídrico sazonal	Tobella <i>et al.</i> , (2016)
Tanzânia	Modelagem de SAF em bacia hidrográfica	Mwangi <i>et al.</i> , (2016)
Uganda	Estoque de C sob SAF x monocultura	Tumwebaze; Byakagaba (2016)
Índia	Potencial do Carbono Orgânico do Solo	Sharma <i>et al.</i> , (2015)
	Qualidade e biodiversidade em SAF	Nesper <i>et al.</i> , (2017)

Fonte: elaboração própria, 2022.

2.4 Matéria Orgânica do Solo (MOS) e carbono do solo

A dinâmica da Matéria Orgânica do Solo (MOS) é um dos processos edáficos vitais da sustentação e transferência de energia entre os compartimentos planta-solo e é autorregulada no ecossistema natural e nos SAF (CEZAR *et al.*, 2015). Esse processo pode ser alterado por práticas agrícolas logo, a autorregulação do SAF e a manutenção da MOS dependem da composição das plantas, sua distribuição no tempo e no espaço e do manejo empregado nas áreas, principalmente a poda (FROUFE *et al.*, 2020).

Deste modo, as árvores de sombra fornecem recursos para a macrofauna do solo, incluindo microclima favorável, alimentação e abrigo, o que influencia o solo através da bioturbação, pois mistura-se desta forma a camada mineral do solo com matéria orgânica, melhorando a agregação e estabilidade de agregados devido ao acúmulo de matéria orgânica oriunda do aporte de resíduos vegetais (BOTTINELLI *et al.*, 2015; CHEN *et al.*, 2017; SUÁREZ *et al.*, 2021). Solos com altos teores de MO normalmente tendem a apresentar baixa

densidade aparente que, por sua vez, correlaciona-se positivamente com o teor de água do solo (UPSON; BURGESS; MORISON, 2016).

SAFs são planejados para manter o teor de MOS em níveis elevados, o que vai impactar diretamente no estoque de carbono orgânico total (COT) do solo e suas frações, proporcionando equilíbrio entre carbono orgânico particulado (COp) e carbono orgânico associado aos minerais (VIEIRA; HOLL; PENEIREIRO, 2009; REBELO; SAKAMOTO, 2021). Desta forma a fauna do solo se mantém diversa e atua no processo de mineralização que pela ciclagem da MOS disponibiliza nutrientes para as plantas (CUBILLOSet *al.*, 2016).

2.4.1 Carbono Orgânico Total (COT)

Manning *et al.* (2015) consideram o estoque de carbono do solo um serviço do ecossistema que permanece com seus fatores controladores incertos, particularmente no que diz respeito à sua composição e estabilidade. Para Lourenço *et al.* (2019) é importante avaliar o estoque e a estabilidade do carbono total do solo (COT) para compreender sua dinâmica e planejar estratégias para mitigação do aquecimento global. Considera-se COT importante parâmetro para as principais funções do solo e seus atributos vitais, como composição química, serviços hidrológicos e proteção de carbono correlacionados diretamente à fertilidade do solo (SUÁREZ *et al.*, 2021).

A influência da precipitação em regiões semiáridas na composição e estabilidade do C foi investigada por Campo; Merino (2016), estes autores concluíram que as Florestas Tropicais Sazonalmente Secas (FTSS) poderão manter a produtividade primária em um cenário de redução das precipitações, porém, com diminuição na velocidade de decomposição da matéria orgânica e tendência ao aumento de incêndios florestais.

Por sua vez, Manning *et al.* (2015) modelaram o estoque de carbono do solo mensurando fatores climáticos, como a precipitação média e a temperatura, associados às propriedades do solo, entre as quais, potencial hidrogeniônico (pH), porosidade e textura. Andrade *et al.* (2020) estudaram o efeito da prática de raleamento da vegetação da FTSS e da conservação florestal clássica e reportaram que em FTSS raleadas, o estoque de C e a umidade do solo foram mais elevados. Pereira *et al.* (2016) avaliaram o estoque de carbono nas FTSS e concluíram que este variou com as espécies vegetais e o tempo de conservação, assim o carbono total estocado na floresta tropical seca com 30 anos de regeneração está em torno de 27,19 t ha⁻¹ de C.

Chiti *et al.* (2018) estudaram a contribuição da floresta no estoque de C do solo, encontrando que o tempo de permanência do C derivado da floresta é maior do que o do C derivado de savanas e sua distribuição no solo atinge camadas mais profundas. Do mesmo modo, em SAF o C do solo e alguns nutrientes, como nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) apresentaram-se em estoques equivalentes aos de florestas bem preservadas (CEZAR *et al.*, 2015; FROUFE *et al.*, 2020), a partir de cinco anos de implantação do SAF.

Alguns estudos em ambientes semiáridos indicam maiores teores e estabilidade do C em sistemas de manejo do que em florestas preservadas de forma clássica, provavelmente porque o C é oriundo da decomposição de árvores, ou partes destas, com altos teores de lignina e celulose (ANDRADE *et al.*, 2020). Bardgett; Mommer; De Vries (2014), consideram que as raízes das plantas, de modo geral, evoluíram de modo a incorporar C ao solo e dessa forma estruturá-lo para que haja estabilidade.

Luan *et al.* (2018) afirmam que a diversidade de espécies da floresta amortece flutuações ambientais como a temperatura, o que pode conferir maior estabilidade ao C do solo e favorecer a mitigação dos efeitos das mudanças climáticas. Tal fato foi observado em SAF (ALTIERI *et al.*, 2015; BARDGETT; MOMMER; DE VRIES, 2014; CHARBONNIER *et al.*, 2017; GOMES *et al.*, 2016; TAUGOURDEAU *et al.*, 2014), o que credencia esse tipo de uso do solo a ser utilizado para manutenção e incremento do estoque de C do solo, manutenção da sua estabilidade e ciclagem dos nutrientes (CEZAR *et al.*, 2015; FROUFE *et al.*, 2020).

2.4.2 Carbono Orgânico Particulado (COp) e Carbono Associado aos Minerais (COam)

O Carbono Orgânico Particulado (COp) é a fração da MOS separada por dispersão e peneiramento, associada à fração areia (COp > 53µm). Tem sua permanência no solo condicionada à proteção física dos agregados e contém partículas derivadas de resíduos vegetais e hifas com estruturas celulares reconhecíveis (LOSS *et al.*, 2009). Por outro lado, a fração da MOS denominada Carbono Associado aos Minerais (COam) encontra-se associada às frações silte e argila do solo (COam < 53µm), e tem como característica a interação com a superfície de partículas minerais, formando complexos organominerais protegidos pelos colóides do solo (CONCEIÇÃO *et al.*, 2005).

Wolschick *et al.*, (2018) observaram que em sistemas de cultivo menos intensivo o teor de C orgânico particulado (COP) é maior, e que em sistemas mais intensivos de cultivo o

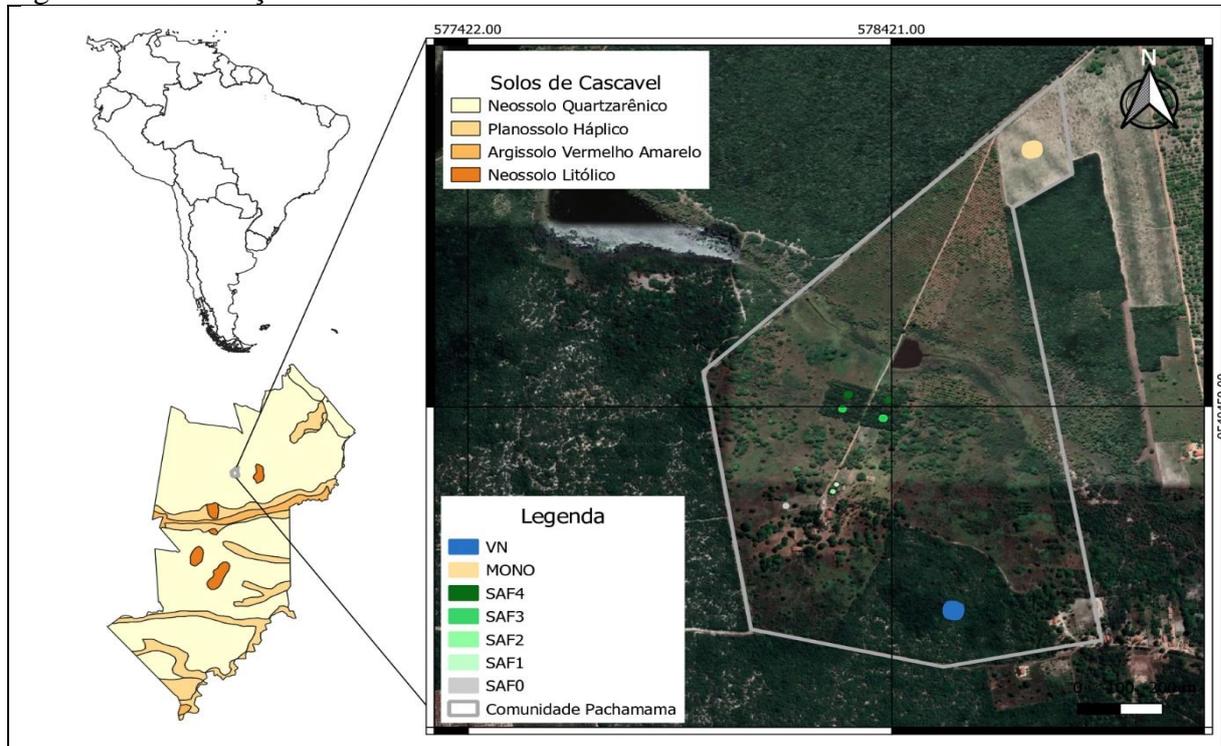
C remanescente é majoritariamente do tipo recalcitrante e associado aos minerais. As características da fração particulada da MOS permitem que esta seja utilizada como indicadora da qualidade do solo e das influências do manejo, especialmente em períodos curtos de avaliação (CONCEIÇÃO *et al.*, 2005).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na comunidade Pachamama, no município de Cascavel, estado do Ceará, Brasil. Os solos da região são parte da Formação Barreiras que se estende desde o estado do Rio de Janeiro até o estado do Amapá e apresenta paisagens formadas por partes altas e planas que deram origem ao termo Tabuleiros Costeiros (DUARTE, 2015). O perfil do solo da área de estudo apresenta horizonte A seguido de camada sedimentar, ausentes horizontes B, ou E, e textura arenosa. (Figura 01).

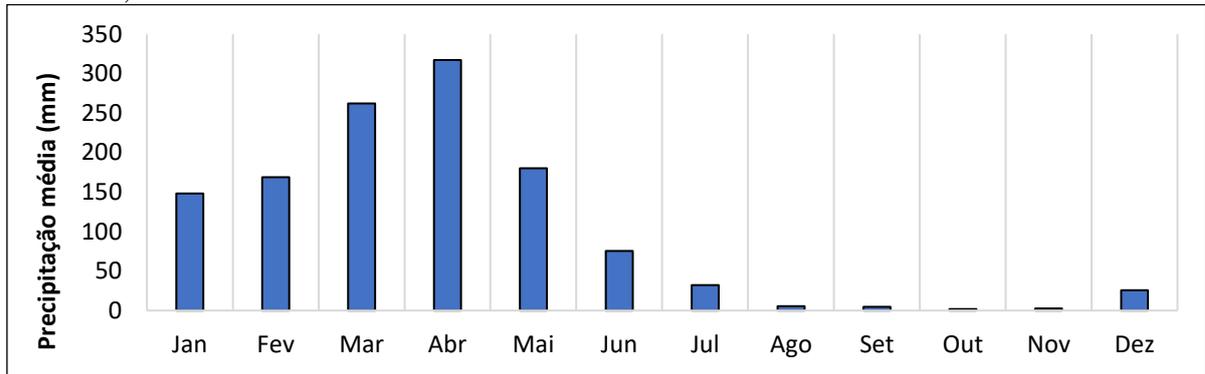
Figura 1 - Localização do estudo



Fonte: Elaboração própria, 2022.

O clima predominante na região é o tropical úmido do tipo “Aw” segundo a classificação de Köppen, com precipitações irregulares no tempo e no espaço e deficiência hídrica moderada a baixa (BEZERRA, 2006). A precipitação média observada entre os anos de 1991 a 2021 foi de 1.225 mm/ano (Figura 02), calculada a partir de dados do posto pluviométrico da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME) no município de Cascavel, e a evapotranspiração potencial (ETP) de 1.603 mm/ano (FUNCEME, 2018).

Figura 2 - Precipitação média mensal observada entre os anos de 1991 a 2021, município de Cascavel, Ceará



Fonte: Adaptado de FUNCEME, 2022.

3.2 Caracterização dos usos do solo

Os usos do solo da área de estudo compreendem a vegetação nativa (VN), sistema agroflorestal (SAF) e monocultura de feijão (MONO). Os principais manejos adotados e as informações gerais detalhando as principais características são descritos na (Tabela 2); o aspecto do perfil do solo e dos diferentes usos do solo à época do estudo podem ser observados na (Figura 03A-03H).

Tabela 2 - Descrição e caracterização dos usos do solo da comunidade Pachamama, em Cascavel, Ceará, Brasil

Usos do solo	Sigla	Características e manejo
Vegetação Nativa	VN	Área de reserva particular, encontra-se vedada ao uso para pastejo ou cultura há pelo menos 30 anos.
Monocultura de feijão	MONO	Área utilizada para plantio de feijão caupi com o seguinte manejo: a vegetação foi derrubada, queimada e a área destocada. Para o plantio a terra foi preparada com o uso de grade e as capinas foram realizadas com implemento de tração animal. O plantio é de sequeiro e não se fez correção ou adubação do solo.
Sistema agroflorestal (SAF)	SAF0	Área implantada em 2021, com linhas de árvores nativas e frutíferas, espaçadas a 6m. As entrelinhas são roçadas; não se aplicou corretivos e adubos; cultivo de sequeiro.
	SAF1 e SAF2	Áreas implantadas em 2020 e 2019, respectivamente, nas quais se fez o plantio de linhas de árvores nativas e frutíferas com largura de 4m. O espaço das entrelinhas foi plantado com hortaliças, mandioca, milho e feijão. A área é irrigada; foi aplicado calcário a lanço no plantio; a área foi adubada com pó de rocha, restos do processamento de pseudofrutos do caju e outros resíduos orgânicos. A poda é feita de acordo com a necessidade de luz e o crescimento das plantas.
	SAF3 e SAF4	Áreas implantadas em 2018 e 2017, respectivamente. A largura das linhas é de 5m e predomina eucalipto e acácia mangium, consorciada na linha com bananeira, mandioca, andu e árvores nativas. A irrigação foi desativada há um ano, não se fez correção do solo ou adubação, apenas cobertura do solo com bagana de carnaúba e outros restos de vegetais. Nas linhas é feita a poda das árvores de acordo com as necessidades de luz e crescimento das espécies. O manejo nas entrelinhas é o roço mecanizado.

Fonte: Elaboração própria, 2022.

Figura 3 - Perfil do solo da área de estudo (A) e usos do solo MONO (B), SAF0 (C), SAF1 (D), SAF2 (E), SAF3 (F), SAF4 (G) e VN (H).



Fonte: Elaboração própria, 2022.

Desta forma, todos os SAF da área foram implantados a partir de 2017 até o ano de 2021, com base no método sistematizado pelo agricultor e pesquisador suíço Ernst Götsch, denominado agricultura sintrópica (GREGIO, 2020; VIEIRA; HOLL; PENEIREIRO, 2009).

Este método é baseado na sucessão ecológica das espécies como abordado por Peneireiro (1999) e Miccolis *et al.* (2016). Desse modo, foram implantados consórcios de espécies pioneiras, secundárias iniciais e secundárias tardias (GANDOLFI; LEITÃO FILHO; BEZERRA, 1995) com diferentes necessidades ecofisiológicas, ou seja, que pertencem a diferentes estratos dentro da sucessão ecológica (REBELLO; SAKAMOTO, 2021). Usualmente, nestes SAF todas as espécies são plantadas no mesmo dia e na época chuvosa. Noplantio utilizaram-se sementes e mudas conforme as características específicas. Contudo, o sistema é aberto e pode ter ajustes com o decorrer do tempo (a depender das funções produtivas das plantas no sistema e da necessidade do agricultor). As espécies presentes nos SAF da área de estudo e suas funções são descritas na (Tabela 3).

Tabela 3 - Espécies presentes nos SAF da área de estudo: nome popular, nome científico e funções potenciais

Nome popular	Espécie	Função
1 Bananeira	<i>Musa sp.</i>	Produção do fruto, biomassa e fornecimento de água
2 Laranjeira	<i>Citrus sinensis</i>	Produção do fruto
3 Limoeiro	<i>Citrus spp.</i>	Produção do fruto
4 Mamoeiro	<i>Caricapapaya</i>	Produção do fruto e biomassa
5 Mandioca	<i>Manihotesculenta</i>	Tubérculo e aspectos edáficos (porosidade)
6 Abóbora	<i>Cucurbita mascata</i>	Frutos e proteção do solo
7 Eucalipto	<i>Eucalyptus sp.</i>	Madeira, fornecimento de biomassa
8 Mogno africano	<i>Khaya sp.</i>	Madeira, biomassa
9 Acácia mangium	<i>Racospermamangium</i>	Madeira e biomassa
10 Baobá	<i>Adansonia sp.</i>	Ornamental
11 Feijão-de-porco	<i>Canavalia ensiformes</i>	Fixação biológica de Nitrogênio; biomassa
12 Moringa	<i>Moringa oleifera</i>	Folhas alimentícias, biomassa e medicinal
13 Margaridão	<i>Tithoniadiversifolia</i>	Biomassa
14 Feijão-de-corda	<i>Vignaunguiculata</i>	Proteína vegetal e FBN
15 Gergelim	<i>Sesamumorientale</i>	Oleaginosa, controle de formiga cortadeira
16 Pau D'arco	<i>Tabebuia sp.</i>	Madeira
17 Amora	<i>Morus sp.</i>	Frutos
18 Acerola	<i>Malpighia glabra</i>	Frutos
19 Açafrão	<i>Curcuma longa</i>	Tempero; anti-inflamatório
20 Capim elefante	<i>Pennisetumpurpureum</i>	Biomassa e forrageira
21 Cajueiro precoce	<i>Anacardiumocidentale</i>	Pseudofruto, fruto e biomassa
22 Coqueiro	<i>Cocus nucifera</i>	Frutos
23 Jaqueira	<i>Artocarpusintegrifolia</i>	Frutas e biomassa
24 Milho	<i>Zea mays</i>	Grãos e biomassa
25 Mamona	<i>Ricinuscommunis</i>	Semente oleaginosa, biocombustível e biomassa
26 Gliricídea	<i>Gliricidiasepium</i>	Biomassa e forrageira
27 Feijão guandú	<i>Cajanuscajan</i>	Grãos, Adubo verde, biomassa
28 Aroeira	<i>Myracrodruonurundeuva</i>	Madeira
29 Mulungu	<i>Erythrina verna</i>	Madeira
30 Jatobá	<i>Hymenaea sp.</i>	Madeira
31 Romãzeira	<i>Punica granatum</i>	Frutos; medicinal
32 Graviola	<i>Annonamuricata</i>	Frutos
33 Mangueira	<i>Mangifera Indica</i>	Frutos e biomassa

Fonte: Elaboração própria, 2022.

3.3 Carbono orgânico total, carbono orgânico particulado e carbono orgânico associado aos minerais

Para avaliar a influência dos manejos nos diferentes usos de solo sobre o teor de COT e suas frações coletaram-se amostras de solo simples, deformadas, com cinco repetições, nas profundidades de 0-5 cm e de 5-10 cm nos usos de solo MONO, VN e cronossequência de sistema agroflorestal de 0-4 anos (SAF0; SAF1; SAF2; SAF3; e SAF4) A coleta de solos ocorreu nos dias 25, 26 e 27 de maio de 2021. O material foi seco ao ar e peneirado em malha de 2,00 mm para realização das análises. Avaliou-se a matéria orgânica pelo método de (Walkley-Black), o carbono orgânico total (COT), segundo Embrapa (1997), e o fracionamento granulométrico da MOS (CAMBARDELLA & ELLIOTT, 1992), obtendo-se o carbono orgânico particulado (COp) e carbono orgânico associado aos minerais (COam). Aproximadamente 20 g de solo e 60 mL de solução de hexametáfosfato de sódio (5 g L^{-1}) foram agitados durante 15 horas em agitador horizontal. A seguir, a suspensão foi passada por uma peneira de 53 μm . O material retido na peneira (COp) foi seco em estufa a 50 °C, quantificado em relação a sua massa, moído em gral de porcelana e analisado em relação ao teor de COT (EMBRAPA, 1997).

O COam foi obtido a partir da diferença entre COT e COp, o que permitiu a determinação dos percentuais de cada fração da MOS em COT, além de permitir a elaboração da curva de crescimento do COT, COp e COam.

3.4 Teor de nutrientes e elementos relacionados à acidez.

Determinou-se para os usos de solo MONO, VN e cronossequência de SAF, nas profundidades 0 -5 cm e 5 -10 cm, os teores de P e das bases do solo K, Na (Mehlich 1), Ca e Mg. Também foram determinados os seguintes parâmetros: saturação por bases (V%), a soma de bases, o potencial hidrogeniônico (pH em água), a acidez trocável (Al^{3+}), acidez potencial (H+Al), a saturação por alumínio (m) e a capacidade de troca de cátions (CTC).

3.5 Temperatura e umidade do solo

Para avaliar o teor de umidade e a temperatura no perfil do solo até 60 cm de

profundidade foi realizada uma coleta de dados entre os dias 25 a 27 de maio de 2021 na qual utilizou-se o sensor portátil *Umwelt-geräte-Technik GmbH*, modelo COMBI 6000 (Figura 04). Para isso o perfil do solo foi estratificado da seguinte forma: 0-5 cm, 5-10 cm, 10-15 cm, 15-20 cm, 20-40 cm e 40-60 cm. Os dados foram coletados em cada profundidade acima referida, com cinco repetições nos respectivos sistemas de uso do solo, MONO; VN; SAF0; SAF1; SAF2; SAF3 e SAF4.

Figura 4 - Coleta de solo para análise e uso de sensor para coleta de dados de umidade e temperatura



Fonte: Arquivo próprio, 2022.

3.6 Análise estatística

Utilizou-se delineamento em blocos casualizados (DBC), logo, realizou-se análises estatísticas entre os usos de solo e entre as profundidades, ambas com cinco repetições. Os dados obtidos foram analisados estatisticamente, e processados utilizando-se o *Software*

AgroEstat. Foi feita avaliação da normalidade dos dados, e como não se ajustaram à distribuição normal (Montecarlo), e por terem alta variabilidade aplicou-se transformação ($\sqrt{x+1}$) para todos os parâmetros. Os dados transformados foram submetidos aos testes de homogeneidade das variâncias dos erros. Posteriormente, os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA) com aplicação do teste F, e os valores médios foram comparados entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

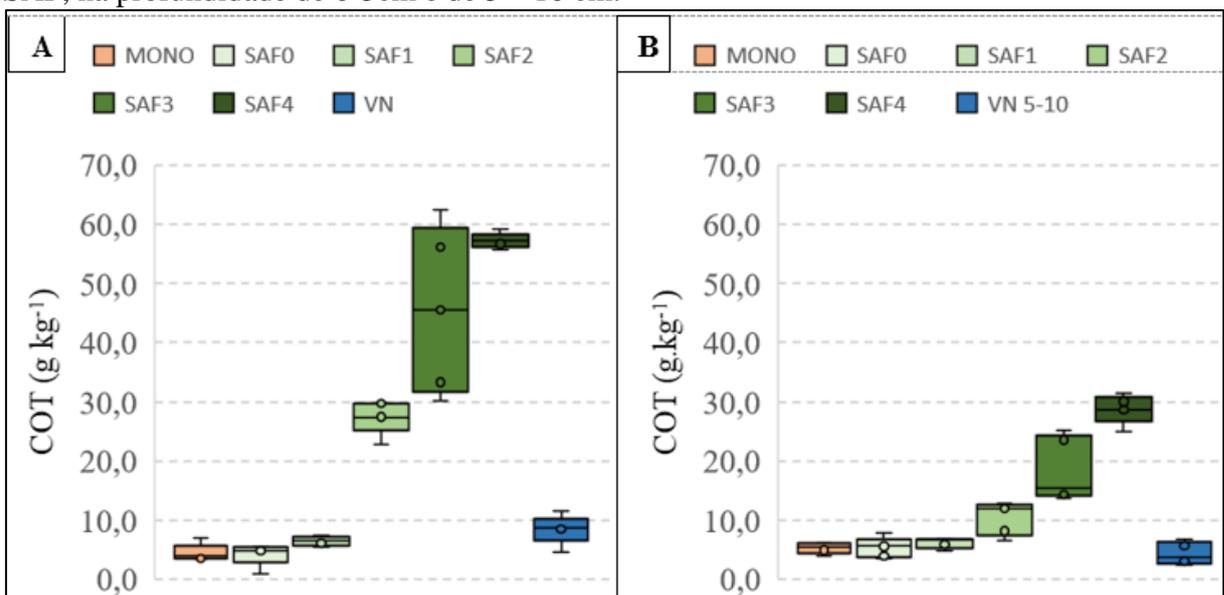
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Carbono Orgânico Total

Os teores de COT na primeira camada de solo (0-5 cm) permitiram separar os usos do solo em três grupos: 1) MONO e SAF0, com teores de COT abaixo de VN; 2) SAF1, cujo teor é equivalente ao de VN e 3) SAF2, SAF3 e SAF4 com teores de COT de três a seis vezes superiores aos de VN.

A camada de 5-10 cm dos usos MONO, SAF0, SAF1 e VN apresentou teores de COT equivalentes, enquanto SAF2, SAF3 e SAF4 apresentaram teores de COT superiores aos de VN (Figura 05 e Tabela 4).

Figura 5 - Teor de carbono orgânico particulado (COp), carbono orgânico associado aos minerais (COam) e carbono orgânico total (COT) em três diferentes usos do solo: Mono, VN e SAF, na profundidade de 0-5cm e de 5 – 10 cm.



Fonte: Elaboração própria, 2022.

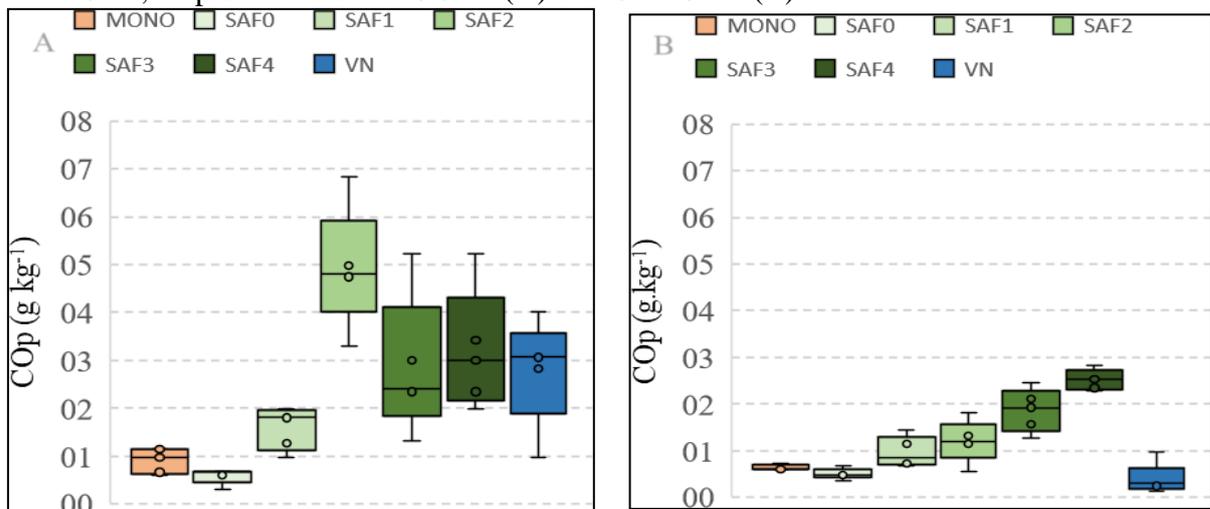
Os grupos de valores de COT nos usos de solo indicam que ao se transformar a vegetação nativa em monocultura há considerável perda de COT; da mesma forma no início os SAF não permitem a reposição de COT, o que ficou evidente em SAF0, cujo teor encontra-se abaixo do COT de VN na camada de 0 – 5 cm. SAF1 apresentou teor de COT equivalente ao de VN, porém, a partir de dois anos de manejo os SAF superaram os teores de COT de VN e os teores de COT apresentaram crescimentos relacionados ao tempo de implantação. Estes

resultados são condizentes com os de Maia *et al* (2006), que observaram situação semelhante em SAF no semiárido do NEB.

Nos usos de solo SAF2, SAF3 e SAF4, que apresentaram os teores de COT mais elevados, houve redução entre as profundidades (0-5 cm e 5-10 cm) da ordem de 38%, 41% e 50%, respectivamente. Apesar da redução de COT em profundidade, os teores da camada de 5-10 cm são superiores aos de VN, indicando que a partir de dois anos o manejo dos SAF aportou COT até 10 cm. O manejo adotado nestes SAF forneceu aporte contínuo de matéria orgânica, por meio das podas e da cobertura do solo com as partes de árvores, além de terem densidade e variedade de espécies arbóreas. Sobre a influência da diversidade e densidade de árvores no estoque de C, Henry *et al.* (2009) observaram em estudo no Kenya que o aporte de C na biomassa vegetal é maior em plantios mais diversos e mais densos. Outros autores observaram que a poda é o principal meio de transferir a matéria orgânica da biomassa das árvores ao solo (FROUFE *et al.*, 2020; SUÁREZ *et al.*, 2021). A magnitude do teor de COT dos usos de solo confirmam a hipótese que SAF foram capazes de elevar o COT nas duas camadas estudadas.

Na camada de 0 – 5 cm o teor de COp em SAF2 foi superior ao de VN, enquanto SAF3 e SAF4 apresentaram COp equivalente à VN, por outro lado, MONO, SAF0 e SAF1 exibem teores de COp inferiores aos de VN. Na segunda camada estudada (5 – 10 cm) SAF3 e SAF4 apresentaram teores de COp superiores aos de VN, todos os demais usos do solo apresentaram teores equivalentes aos de VN (Figura 06 e Tabela 4).

Figura 6 - Teor de carbono orgânico particulado (COp), em três diferentes usos do solo: Mono, VN e SAF, na profundidade de 0-5cm (A) e de 5 – 10 cm (B)

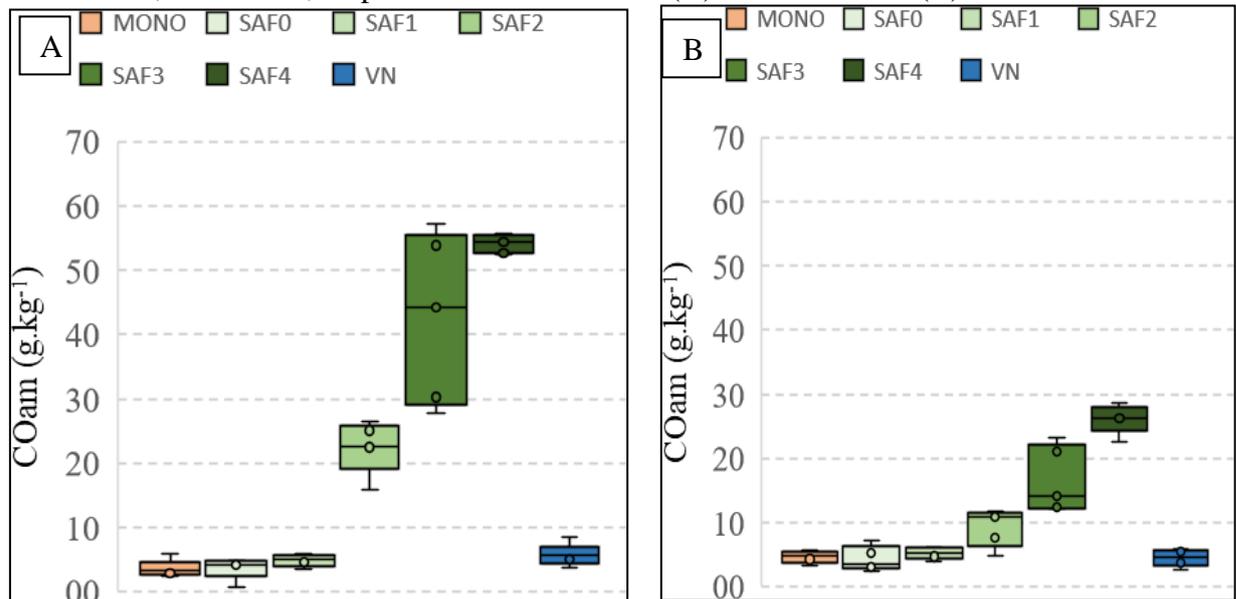


Fonte: Elaboração própria, 2022

O maior teor de COp na profundidade de 0-5 cm em SAF2 pode ser atribuído à alta densidade do plantio e ao manejo da poda. A densidade aumenta a intensidade da poda, sendo que esta regula a quantidade de luz recebida pelos diferentes estratos e resulta em aporte de elevado volume de material orgânico íntegro ou em fase de transformação na superfície.

A este respeito, Loss *et al.* (2009), verificaram maior teor de COp na profundidade de 0-5 cm. Isto indica que o teor de COp depende da adição de restos vegetais. O padrão do teor de COp observado entre os usos de solo sugere que o aporte de material orgânico pela poda, induzido pelos outros fatores do sistema, como a densidade de plantas, foi mais acentuado até dois anos de implantação (SAF2), cujo teor de COp foi 70% superior ao de VN, enquanto os SAF3 e SAF4 tiveram valores equivalentes aos de VN para o teor de COp. Por outro lado, na profundidade de 5 – 10 cm SAF3 e SAF4 exibiram teores de COp superiores aos de VN e aos demais usos do solo, logo, nas condições estudadas, três anos é o tempo necessário para os SAF terem seus teores de COp estabilizado e começar a aumentar em profundidade. Houve redução do teor de COp entre as camadas nos usos de solo SAF2, SAF3 e VN. Estes resultados corroboram os de Wolschick *et al.* (2018) que observou teor de COp maior em profundidade em usos de solo com pouco revolvimento, o que protege a matéria orgânica da oxidação. O teor de COam apresentou nas duas camadas estudadas (0-5 cm e de 5 – 10 cm) dois grupos distintos: MONO, SAF0 e SAF1 com teores de COam equivalentes ao de VN, enquanto SAF2, SAF3 e SAF4 apresentaram teores da ordem de quatro, sete e nove vezes superiores à VN respectivamente (Figura 07 e Tabela 4).

Figura 7 - Teor de carbono orgânico associado aos minerais (COam) em três diferentes usos do solo: Mono, VN e SAF, na profundidade de 0-5cm (A) e de 5 – 10 cm (B)



Fonte: Elaboração própria, 2022

Tabela 4 - Síntese do teor de carbono orgânico total (COT), carbono orgânico particulado e carbono orgânico associado aos minerais (COam), nas profundidades de 0-5cm e de 5-10cm, em monocultura, VN e cronossequência de SAF

Usos do solo	Prof. (cm)	COT (g kg ⁻¹)	COp (g kg ⁻¹)	COam (g kg ⁻¹)
MONO	0-5	4,43Ae	0,90Ad	3,53Ad
	5-10	5,25Ad	0,63Ab	4,62Ad
SAF0	0-5	4,29Ae	0,57Ad	3,72Ad
	5-10	5,32Ad	0,50Ab	4,82Ad
SAF1	0-5	6,49Ad	1,58Ac	4,91Ad
	5-10	6,13Bd	0,96Ab	5,17Ad
SAF2	0-5	27,40Ac	4,93Aa	22,47Ac
	5-10	10,41Bc	1,20Bb	9,21Bc
SAF3	0-5	45,48Ab	2,85Ab	42,62Ab
	5-10	18,43Bb	1,86Ba	16,57Bb
SAF4	0-5	57,24Aa	3,19Ab	54,05Aa
	5-10	28,70Ba	2,52Aa	26,18Ba
VN	0-5	8,49Ad	2,79Ab	5,69Ad
	5-10	4,83Bd	0,38Bb	4,44Ad

Fonte: elaboração própria, 2000

Nota: Médias seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si; médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre as profundidades pelo teste de Scott&Knott a 5% (*) e a 1% (**) de significância.

O teor de COam entre os usos de solo nas duas camadas (0-5 cm e de 5-10 cm) apresentou aumento em relação à VN a partir do segundo ano de implantação da cronossequência (SAF2). Com o aumento da profundidade SAF4, SAF3 e SAF2 apresentaram redução do teor de COam.

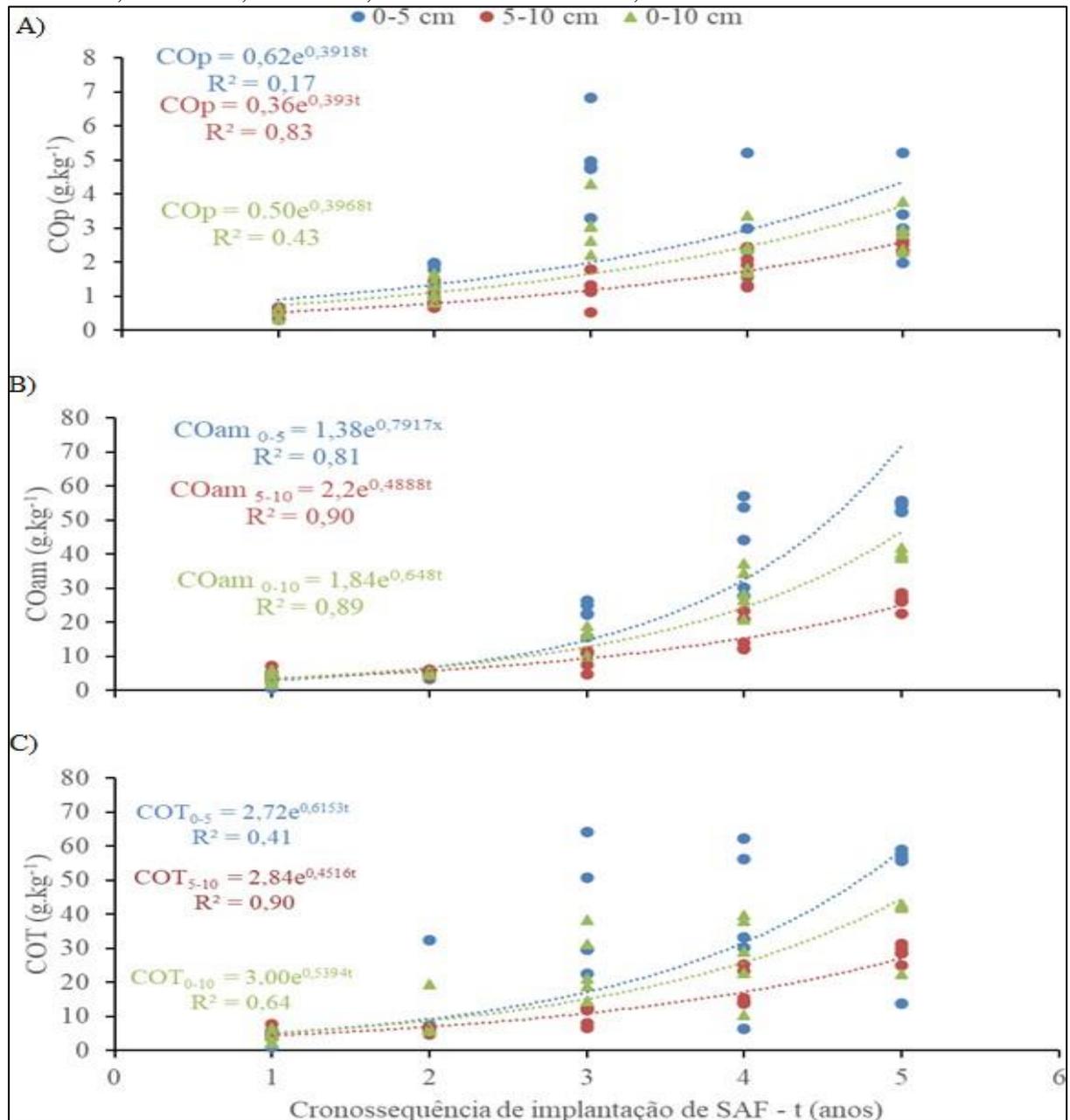
Tem-se na literatura COam como a fração da matéria orgânica mais resiliente, menos influenciada pelo manejo, com grande estabilidade química e que representa a fase

avançada de humificação (LOSS *et al.*, 2009; WOLSCHICK *et al.*, 2018). Entretanto, os resultados desse estudo evidenciaram que a partir de dois anos de implantação (SAF2) o manejo dos SAF foi capaz de elevar o teor de COam nas duas camadas (0-5 cm e 5-10 cm). Isto ocorreu devido ao aporte das partes vegetais podadas, inclusive partes de árvores com cadeias proteicas complexas e substâncias recalcitrantes.

Sobre a influência das plantas, especialmente árvores no teor de COam, em estudo no país africano Gabão, Chiti *et al.* (2018), utilizaram os isótopos $\delta^{13}\text{C}$ e $\delta^{14}\text{C}$ para determinar a influência das plantas de floresta e savanas na formação do COT do solo. Verificaram que até 30 cm de profundidade as plantas das florestas podem representar até 25% do COT, e que as árvores fornecem carbono recalcitrante, por conta dos compostos presentes nas suas partes estruturais como ceras, suberina, cutina e terpenóides.

Com o valor de COT para cada etapa da cronossequência de SAF foi possível detectar que o COT cresceu de forma exponencial com o passar do tempo (Figura 08).

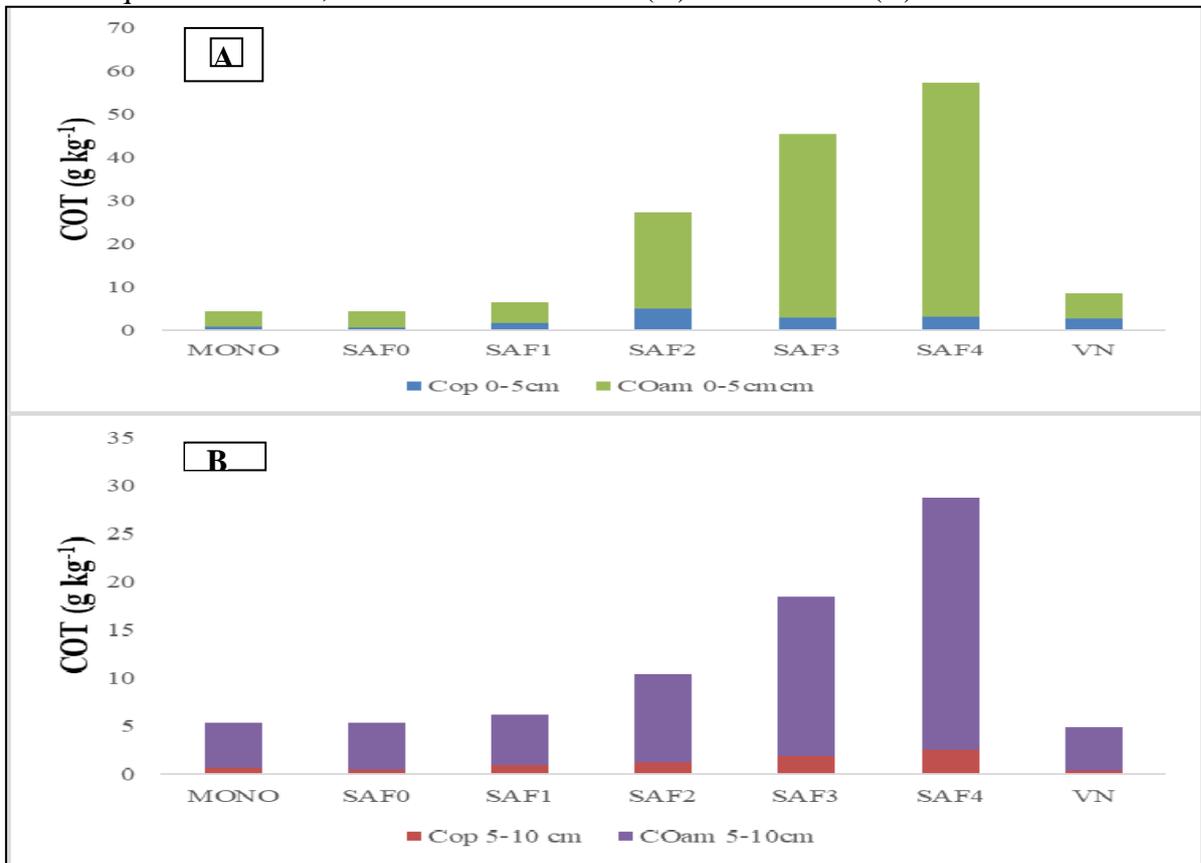
Figura 8 – Padrão de crescimento de COp, COam e COT na cronossequência de SAF em que: 1 = SAF0; 2 = SAF1; 3 = SAF2; 4 = SAF3 e 5 = SAF 4, nas camadas de 0-5 cm e de 5-10 cm.



Fonte: Elaboração própria, 2022

O teor de COp apresentou alta dispersão na camada de 0-5 cm, isto resultou em coeficiente de determinação R² igual a 0,17, o que significa que 17% da variação de COT é explicada pelo tempo de implantação. Ao se utilizar o valor de COp de 5 – 10 cm o R² é de 0,36; para o teor de COp 0 – 10 cm, aqui tomado como a média das duas camadas, obteve-se melhor ajuste com R² = 0,83. A dispersão de SAF2 e a baixa proporção de COp no teor de COT em todos os usos de solo podem ter determinado este resultado (Figura 09).

Figura 9 - Proporção dos teores de COP e COam em COT, nos usos de solo MONO, VN e cronossequência de SAF, nas camadas de 0-5 cm (A) e de 5-10 cm (B).



Fonte: elaboração própria, 2022

O teor de COam apresentou valores pouco dispersos, o que permitiu a obtenção de R^2 igual a 0,81 (COam 0 – 5 cm), R^2 0,90 (COam 5 – 10 cm) e R^2 de 0,89 (COam de 0 – 10 cm). Para o teor de COT o melhor ajuste foi de 0 – 5 cm, com R^2 de 0,90, coincidindo com R^2 do teor de COam, possivelmente por influência da alta proporção desta fração da MOS em COT.

Embora o modelo exponencial tenha representado bem o crescimento observado de COP, COam e COT na cronossequência de SAF, este não deve ser utilizado para projeção do crescimento destas frações do C, pois no ano 14, o teor de COT perderia completamente o sentido físico. Isto porque com o tempo o estoque de COT e suas frações tenderá a se estabilizar e este modelo não representa esta situação. As proporções de COP e COam podem ser observadas na Figura 09.

COam é a fração de C predominante em todos os usos de solo estudados nas duas profundidades (0 – 5 cm e 5 – 10 cm). VN e SAF2 apresentaram maiores proporções de COP na primeira camada (0 – 5 cm), enquanto SAF3 e SAF4 exibem proporções de COP mais

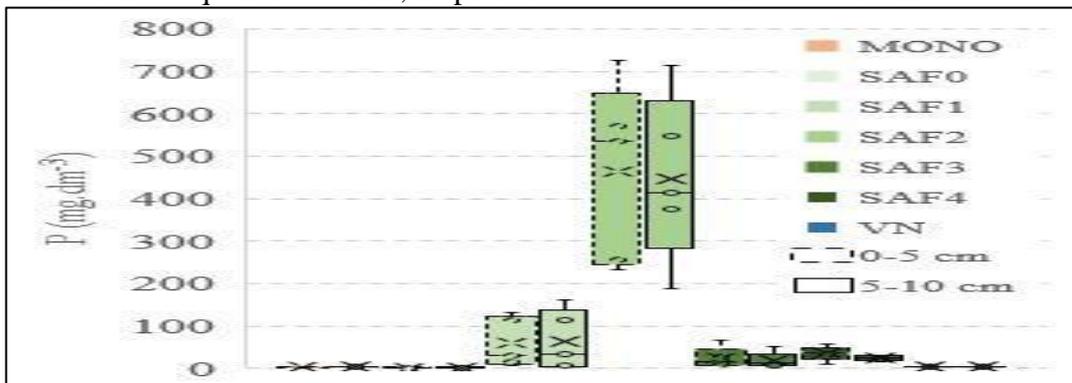
elevadas na camada mais profunda (5 – 10 cm). Os resultados divergem dos obtidos por Wolschick *et al.* (2018). A maior proporção de COam em COT é devido ao clima da região, que apresenta temperaturas elevadas durante todo o ano, o que favorece a rápida degradação da matéria orgânica, ou seja, COp é rapidamente degradado pelos organismos do solo. Desta forma, COam por ter mais estabilidade química e por ter a proteção dos coloides do solo foi a fração que permaneceu em maior proporção.

4.2 Teor de Nutrientes

4.2.1 Teor de Fósforo (P)

O teor de P em SAF2 é superior aos demais usos de solo, a média deste uso do solo para o teor de P é superior ao comumente encontrados nos solos da região (Figura 10).

Figura 10 - Teor de Fósforo (P) em Monocultura (Mono), Vegetação Nativa (VN) e em cronossequência de SAF, na profundidade de 0-5cm e de 5-10cm



Fonte: elaboração própria, 2022.

O teor de P dos diferentes usos do solo evidenciou a influência da adubação inicial com pó de rocha, com doses de 600 kg ha⁻¹ no SAF1 e de 1200 kg ha⁻¹ no SAF2. Entretanto, SAF4 tem média de P equivalente à SAF1, evidenciando a influência da ciclagem de nutrientes que com o tempo poderá fornecer P sem entrada de insumos externos. Estes resultados corroboram os de Froufe *et al.* (2020). Estes autores concluíram que SAF proporcionam com a decomposição da serrapilheira uma sincronicidade entre a decomposição e a disponibilidade de nutrientes, o que pode proporcionar ao menos 5 kg de P ha⁻¹ ano⁻¹.

Apesar da influência do manejo inicial de adubação no teor de P observou-se nos SAF2 e SAF1 que foram adubados, teor de P disponível alto ou muito alto após 2 anos desde a

adubação, indicativo que o manejo destes SAF pode ter reduzido a perda deste nutriente. Isto pode ter ocorrido devido a cobertura do solo que diminuiu o escoamento superficial e a erosão. Alewell *et al.* (2020) estimaram que a erosão hídrica é responsável ao menos por 50% das perdas de P na agricultura e isto pode acelerar a escassez global de P, resultando em colapso global da agricultura.

4.2.2 Teor das bases do solo, capacidade de troca catiônica e saturação por bases (V%)

Os teores das bases do solo (K, Ca, Mg e Na) foram mais elevados no SAF2 nas duas profundidades (0–5 cm e 5–10 cm). Porém, o elemento Mg apresentou teores equivalentes nos SAF2 e SAF4 nas duas camadas estudadas. De modo geral, nos usos de solo MONO e SAF0 foram registrados os menores teores de bases do solo na camada de 0-5 cm, enquanto na camada de 5-10 cm a variação entre os usos de solo diminuiu. Para a soma de bases (V%) SAF2 teve os valores máximos observados, SAF1, SAF0, MONO e VN apresentaram valores intermediários, mas SAF3 e SAF4 registraram os menores valores. A CTC do solo foi maior no SAF4, enquanto SAF2 e SAF3 registraram valores intermediários, SAF1, SAF0, MONO e VN apresentaram menores valores de CTC. Apenas MONO e SAF0 não apresentaram variação da CTC em profundidade (Tabela 5).

Tabela 5 - Teores observados de Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), capacidade de troca de cátions (CTC) e saturação por bases (V%) nos usos de solo monocultura (MONO), vegetação nativa (VN) e cronosequência de SAF, nas profundidades de 0-5cm e de 5-10cm

Usos do solo	Prof. (cm)	K	Ca	Mg	Na	CTC	V%
..... mmol _c dm ⁻³							
MONO	0-5	1,12Ac	13,74Ac	2,60Ac	0,86Ac	40,58Ad	53,04Ac
	5-10	0,8Ab	13,62Ac	2,53Ab	0,5Ac	32,14Ac	63,22Bc
SAF0	0-5	1,06Ac	13,48Ac	2,65Ac	0,96Ac	39,22Ad	55,4Ac
	5-10	0,52Ab	10,92Ac	2,32Ab	0,48Ac	34,9Ac	46,72Bd
SAF1	0-5	3,3Ab	32,22Ab	3,89Ab	2,14Ab	67,72Ac	76,76Ab
	5-10	1,92Bb	27,1Ab	2,98Bb	1,14Ab	46,32Bc	78,72Ab
SAF2	0-5	14,08Aa	92,26Aa	4,78Aa	4,32Aa	137,3Ab	96,04Aa
	5-10	4,42Ba	93,32Aa	3,82Ba	3,68Aa	115,08Bb	100Aa
SAF3	0-5	3,1Ab	16,04Ac	3,34Ac	1,58Ab	148,08Ab	21,10Ae
	5-10	1,18Bb	5,86Bb	2,44Bb	1,38Ab	108,78Bb	13,94Bf
SAF4	0-5	2,86Ab	39,22Ab	4,31Aa	1,94Ab	190,86Aa	32,92Ad
	5-10	1,3Bb	30,4Bb	3,68Ba	1,66Ab	158,44Ba	30,06Ae
VN	0-5	2,14Ab	29,34Ab	3,66Ab	1,04Ac	77,82Ac	58,66Ac
	5-10	0,92Bb	14,64Bc	2,76Bb	0,52Ac	43,8Bc	52,5Ad

Fonte: Elaboração própria, 2022

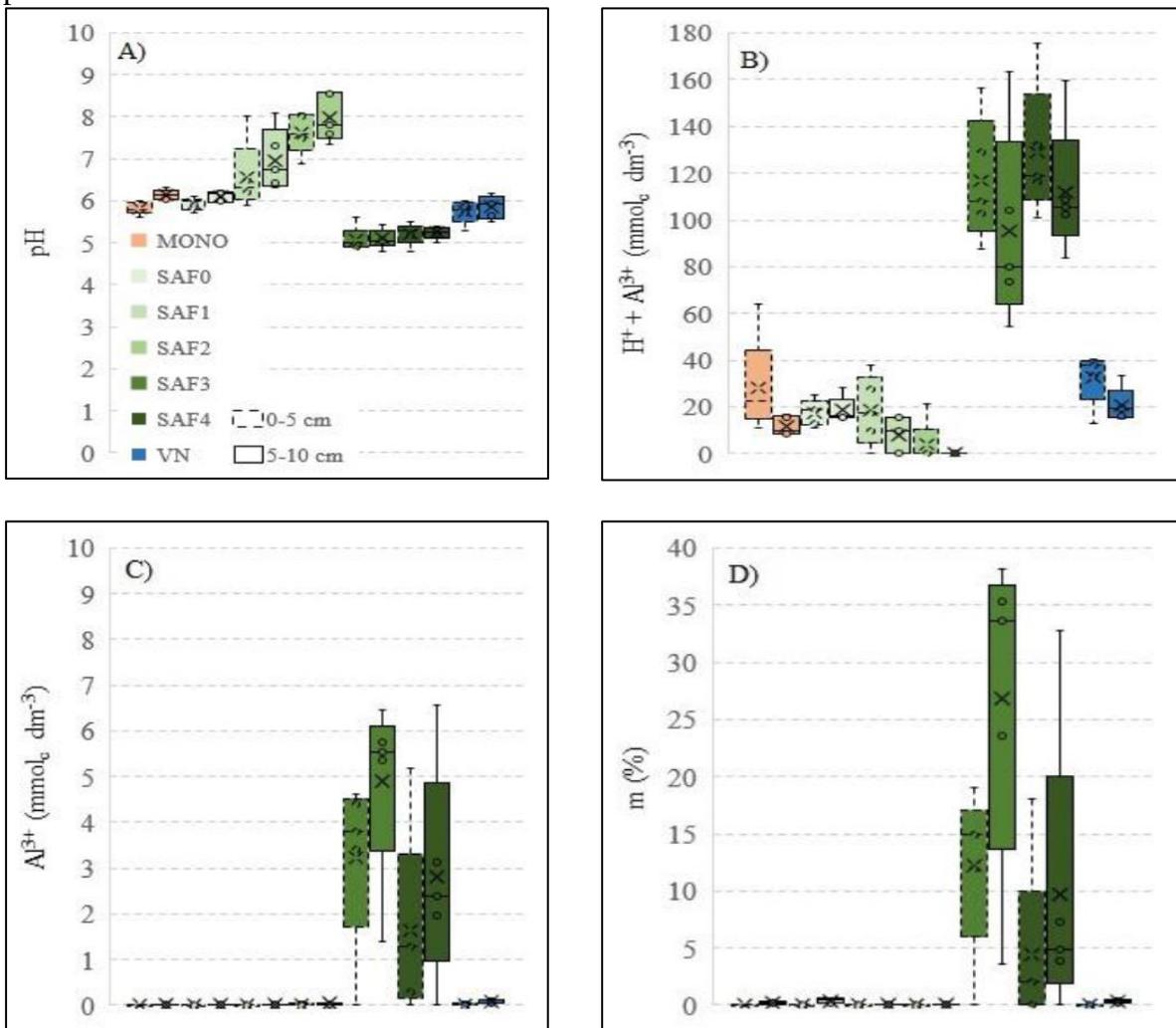
Nota: Médias seguidas da mesma letra minúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Skott-knott a 5% de probabilidade; médias seguidas de mesma letra maiúscula na linha não diferem entre as profundidades pelo teste de Skott-knott a 5% de probabilidade.

Os teores das bases do solo K, Ca e Mg foram influenciados pela aplicação de calcário, por ocasião do plantio realizada nos SAF1 e principalmente no SAF2, possivelmente pela maior quantidade aplicada, o dobro de SAF1, este SAF apresenta maiores teores das bases do solo e saturação por bases de 96,04% e 100% para a camada de 0-5 cm e de 5-10 cm, respectivamente. A VN apresenta o dobro de K e Ca em relação à MONO e SAF0 na camada de 0-5 cm, o que indica que as maiores perdas das bases do solo ocorrem ao se plantar monoculturas sem adubação, ou no início de implantação do SAF. Os teores das bases registrados no SAF4 variaram de equivalentes a superiores aos de VN, enquanto SAF3, ou foi equivalente ou ligeiramente inferior à VN. Estes resultados indicam que estes SAF, apesar da alocação de nutrientes para a biomassa viva e as colheitas, podem gradualmente aumentar ou conservar os teores das bases do solo, isto por conta da alocação de matéria orgânica promovida pelas podas, e pela ação dos diferentes sistemas radiculares dos diversos grupos funcionais que aumentaram a eficiência na ciclagem de nutrientes, especialmente nos SAF estratificados, o que é documentado em outros trabalhos de avaliação de SAF (MAIA *et al.*, 2006; CEZAR *et al.*, 2015; FROUFE *et al.*, 2020).

4.2.3 Elementos relacionados à acidez do solo

Os resultados relacionados à acidez do solo como potencial hidrogeniônico (pH) teor de hidrogênio (H) e de alumínio (Al), bem como a saturação por alumínio (m) revelaram que os solos dos SAF3 e SAF4 são levemente ácidos, sendo que todos os demais usos do solo se encontram na faixa de pH adequada para cultivos e dentro da normalidade para os teores de Al, H e saturação por Al (m). (Figura 11).

Figura 11 - Potencial hidrogeniônico (A), acidez potencial (B), alumínio (C) e saturação por alumínio (D) em Monocultura (Mono) Vegetação Nativa (VN) e cronossequência de SAF, na profundidade de 0 a 5cm e de 5 a 10cm



Fonte: elaboração própria, 2022.

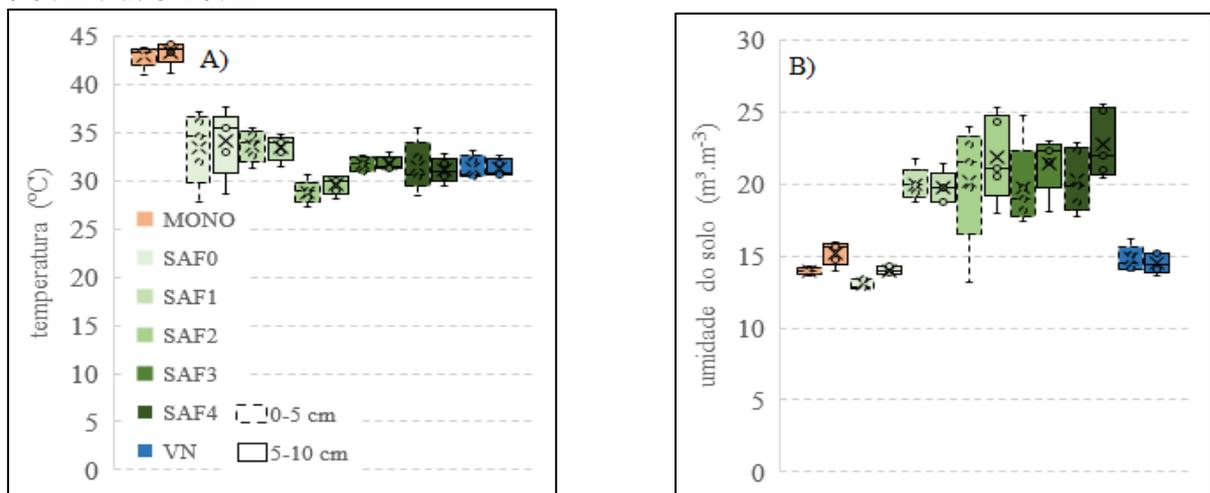
Observou-se maiores acidez trocável, acidez potencial e saturação por alumínio (m) nos usos de solo SAF3 e SAF4. Isto provavelmente ocorreu devido ao alto teor de MOS destes SAF, e ao tipo de material oriundo das podas. Além disso, a incorporação dos nutrientes básicos, Ca, Mg e K à biomassa viva das árvores, pode ter desequilibrado as quantidades destas bases no solo, e deixado como remanescentes Al^{3+} e H^+ , enquanto as outras bases foram absorvidas aos complexos formadores das estruturas das árvores, como apontado por Maia *et al.* (2006). O solo da área de estudo não apresentou acidez trocável ou potencial nos outros usos, como VN e MONO, por exemplo. Porém, é preciso cautela ao se avaliar estes parâmetros uma vez que em solos com alto teor de MOS, o efeito tampão desta pode compensar eventuais malefícios às culturas (EBELING *et al.*, 2008).

A biomassa das árvores dos SAF3 e SAF4, ou seja, a biomassa das árvores pode ser utilizada para reciclar os nutrientes, por meio da poda, aproveitando eventuais partes comerciais e usando todo o resto, especialmente as folhas e ramos como cobertura de solo, o que em tese, poderá contribuir para restabelecer o equilíbrio das bases do solo (Ca, Mg e K) com o Al e H, uma vez que estes elementos básicos são encontrados em maior proporção nas folhas, ramos finos e partes reprodutivas (FROUFE *et al.*, 2020; CEZAR *et al.*, 2015; THOMAZINI *et al.*, 2015).

4.3 Temperatura e umidade do solo

Em relação à temperatura do solo, o uso em monocultura apresentou maiores temperaturas médias, enquanto o SAF2 apresentou a mais baixa temperatura entre todos os usos. SAF1, SAF3, SAF4 e VN apresentaram valores equivalentes. Por outro lado, a umidade do solo foi mais baixa em SAF0, VN e MONO, enquanto se mostrou mais elevada nos demais tratamentos (Figura 12).

Figura 12 - Temperatura em °C (A) e umidade médias do solo (B), em ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), em monocultura, (MONO), vegetação nativa (VN) e em cronossequência de SAF nas camadas de 0-5cm e de 5-10cm



Fonte: elaboração própria, 2022.

O uso do solo MONO apresentou a maior temperatura do solo observada, acima dos demais usos do solo em até 10°C por não haver neste uso de solo a cobertura de serrapilheira, presente em VN e cobertura de restos de poda, observada nos SAF. Outro fator é que as plantas herbáceas não cobriram o solo de forma homogênea, o que potencializou a

energia solar incidente sobre o solo. Certamente a temperatura elevada de MONO contribui para a perda de C e outros elementos como N, pela desnitrificação e volatilização e poderá ocorrer maior emissão de CO₂ pelo aumento da respiração do solo (DE JONG VAN LIER; PINHEIRO; INFORSATO, 2018). Thomazini *et al.* (2015) apontaram, em estudo comparativo de café em SAF e café plantado a pleno sol, que com as altas temperaturas dos cultivos elevam o teor de gás carbônico no solo. A cobertura de solo dos SAF pela serrapilheira e pelo dossel das árvores conferiu equilíbrio térmico comparável ao sistema natural (VN). Este fator deve ser levado em consideração pois indica uso de solo com potencial de adaptação e mitigação das mudanças climáticas (MBOW *et al.*, 2014; ALTIERI *et al.* (2015).

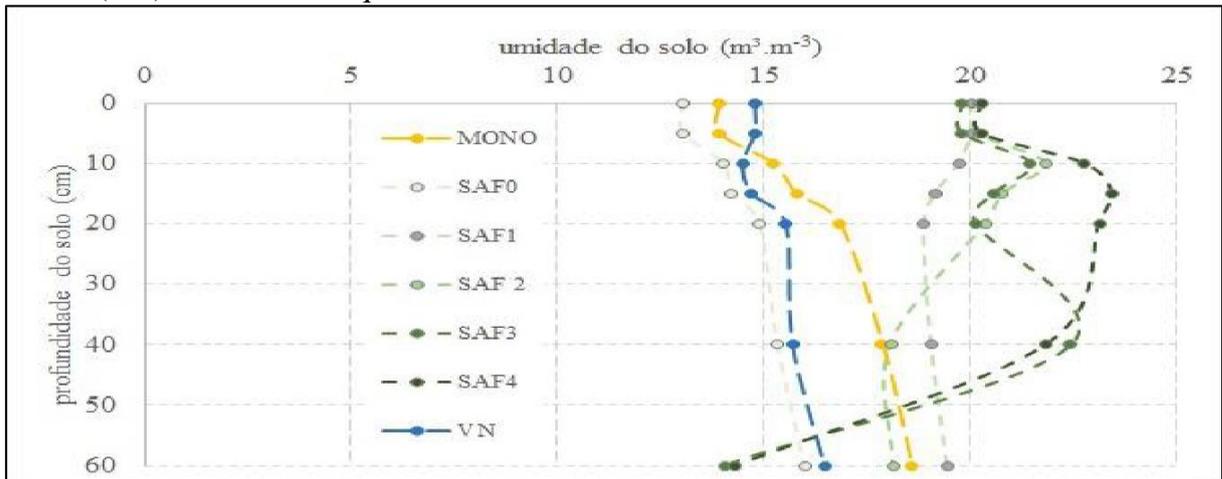
O arranjo espacial vertical das árvores nos SAF, denominados estratos, proporcionaram provavelmente, a diminuição da temperatura nestes usos do solo e permitiram o maior aproveitamento da energia solar, de modo que mais energia solar nos SAF foi interceptada pelas folhas e, a luz que chegou ao solo era difusa e encontrou barreira de matéria orgânica acumulada pela poda. Charbonnier *et al.* (2017) calcularam que em agroflorestas a eficiência do uso da luz é incrementada em até 60%, mesmo com a interceptação pelo dossel das árvores de sombra.

Observou-se que o teor de água do solo foi cerca de 33% mais elevado nos SAF1, SAF2, SAF3 e SAF4 em comparação aos SAF0, VN e MONO, nas duas profundidades. Ressalte-se que SAF1 e SAF2 recebem irrigação, enquanto SAF3 e SAF4 não são irrigados há 1 ano, indicando que a proteção do dossel das árvores, da serrapilheira e as interações dos sistemas radiculares dos diferentes grupos funcionais compensaram a falta de irrigação dos SAF mais maduros e proveram umidade do solo equivalente a prática da irrigação realizada nos SAF1 e SAF2. A este respeito, Bayala;Prieto (2019), concluíram que em SAF ocorre a elevação hidráulica pelas raízes mais profundas e que isto promove um compartilhamento de água entre espécies de árvores e plantas herbáceas. Bargués-Tobella (2017), utilizaram isótopos $\delta^{18}\text{O}$ e verificaram que as árvores de SAF utilizavam água de fontes profundas e a redistribuíam para a superfície, favorecendo as espécies herbáceas vizinhas.

Avaliou-se ainda a umidade no perfil do solo e os usos do solo dividiram-se em dois grupos quanto à umidade no perfil. Os usos de solo MONO, SAF0 e VN, apresentaram teores de água abaixo de 15% e a curva destes três usos de solo descreve leve incremento da umidade com o aumento da profundidade. SAF1 e SAF2, irrigados, apresentaram umidade na superfície em torno de 20%, que diminui para 18% e se mantém nesta faixa até 60 cm. SAF3 e SAF4, na superfície tem umidade semelhante aos SAF1 e SAF2, mas, esses SAF apresentaram

aumentada umidade no perfil do solo que em SAF4 foi dos 10 aos 40cm com umidade na faixa de 23%. Desta profundidade aos 60 cm SAF3 e SAF4 têm seus teores de água reduzidos a menos de 15% (Figura13).

Figura 13 - Umidade do solo em%, no perfil de 0 a 60cm, em Monocultura (Mono), Vegetação Nativa (VN) e em cronossequência de SAF



Fonte: elaboração própria, 2022.

As curvas de umidade no perfil do solo indicam que SAF são capazes de reter mais água no solo e isto relaciona-se com o teor de matéria orgânica do solo, maior em SAF3 e SAF4. Estes resultados corroboram os de Thomazini *et al.*, (2015) que verificaram maior retenção de água em plantios de SAF. Sugerem, a exemplo de Kuyah *et al.*, (2016) que as árvores dos SAF regulam a quantidade de água disponível no solo influenciando as relações solo-planta-atmosfera.

5 CONCLUSÕES

Conclui-se que na camada mais superficial solo, o sistema agroflorestal (SAF) elevou os níveis de matéria orgânica do solo (MOS), o carbono orgânico total (COT) em comparação a monocultura.

A partir do segundo ano da cronosequência de SAF os níveis de CO_p, CO_{am} e COT são superiores aos do ecossistema natural preservado, o que demonstra o efeito catalisador do SAF na ciclagem de nutrientes e no aumento da capacidade de sequestro de carbono do solo.

A temperatura do solo em SAF é comparável ao ecossistema natural preservado e inferior em até 10° C em relação ao solo com cultivo de monocultura.

A umidade do solo em SAF de com três e quatro anos de implantação é 30% superior aos demais usos de solo, indicativo de redistribuição hidráulica pelas raízes das árvores a partir deste tempo de implantação.

Não foi observada relação direta entre o tempo de implantação de SAF, os teores de bases do solo e os parâmetros relacionados à acidez do solo.

REFERÊNCIAS

- ALTIERI, M. A. et al. Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. **Agronomy for Sustainable Development**, [s. l.], v. 35, n. 3, p. 869–890, 2015.
- ALTIERI, M. A.; NICHOLLS, C. I. The adaptation and mitigation potential of traditional agriculture in a changing climate. **Climatic Change**, [s. l.], v. 140, n. 1, p. 33–45, 2017.
- ANDRADE, E. M. et al. Ecohydrology in a Brazilian tropical dry forest: thinned vegetation impact on hydrological functions and ecosystem services. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, [s. l.], v. 27, n. November 2019, p. 100649, 2020.
- ARAÚJO FILHO, J. A. DE. **Manejo Pastoril Sustentável da Caatinga**. 22. ed. Recife: 2013.
- ARAÚJO, J. C.; GÜNTNER, A.; BRONSTERT, A. Loss of reservoir volume by sediment deposition and its impact on water availability in semiarid Brazil. **Hydrological Sciences Journal**, [s. l.], v. 51, n. 1, p. 157–170, 2006.
- BARDGETT, R. D.; MOMMER, L.; DE VRIES, F. T. Going underground: Root traits as drivers of ecosystem processes. **Trends in Ecology and Evolution**, [s. l.], v. 29, n. 12, p. 692–699, 2014.
- BARGUÉS TOBELLA, A. et al. Strategies trees use to overcome seasonal water limitation in an agroforestry system in semiarid West Africa. **Ecohydrology**, [s. l.], v. 10, n. 3, 2017.
- BAYALA, J. et al. Parklands for buffering climate risk and sustaining agricultural production in the Sahel of West Africa. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 28–34, 2014.
- BAYALA, J.; PRIETO, I. Water acquisition, sharing and redistribution by roots: applications to agroforestry systems. **Plant and Soil**, [s. l.], v. 453, n. 1–2, p. 17–28, 2019.
- BLANCO SEPÚLVEDA, R.; AGUILAR CARRILLO, A. Soil erosion and erosion thresholds in an agroforestry system of coffee (*Coffea arabica*) and mixed shade trees (*Inga* spp and *Musa* spp) in Northern Nicaragua. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s. l.], v. 210, p. 25–35, 2015.
- BRAVO-MONROY, L.; TZANOPOULOS, J.; POTTS, S. G. Ecological and social drivers of coffee pollination in Santander, Colombia. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s. l.], v. 211, p. 145–154, 2015.
- CAUDILL, S. A.; DECLERCK, F. J. A.; HUSBAND, T. P. Connecting sustainable agriculture and wildlife conservation: Does shade coffee provide habitat for mammals? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s. l.], v. 199, p. 85–93, 2015.
- CEZAR, R. M. et al. Soil biological properties in multistrata successional agroforestry systems and in natural regeneration. **Agroforestry Systems**, [s. l.], v. 89, n. 6, p. 1035–1047, 2015.

- CHARBONNIER, F. et al. Increased light-use efficiency sustains net primary productivity of shaded coffee plants in agroforestry system. **Plant Cell and Environment**, [s. l.], v. 40, n. 8, p. 1592–1608, 2017.
- CHITI, T. et al. Contribution and stability of forest-derived soil organic carbon during woody encroachment in a tropical savanna. A case study in Gabon. **Biology and Fertility of Soils**, [s. l.], v. 54, n. 8, p. 897–907, 2018.
- CONCEIÇÃO, Paulo Cesar et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 777-788, 2005.
- COSTANZA, R. et al. The value of the world's ecosystem services and natural capital. **Nature**, [s. l.], v. 387, n. 6630, p. 253–260, 1997.
- COULIBALY, J. Y. et al. Adoption of agroforestry and the impact on household food security among farmers in Malawi. **Agricultural Systems**, [s. l.], v. 155, n. March, p. 52–69, 2017.
- CUBILLOS, A. M. et al. Effect of the conversion of conventional pasture to intensive silvopastoral systems on edaphic bacterial and ammonia oxidizer communities in Colombia. **European Journal of Soil Biology**, [s. l.], v. 72, n. 40, p. 42–50, 2016.
- FAO, IFAD, UNICEF, W. AND W. 2021. **The State of Food Security and Nutrition in the World 2021**. Rome: 2021, 2021.
- FIGUEIREDO, J. V. et al. Runoff initiation in a preserved semiarid Caatinga small watershed, Northeastern Brazil. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 13, p. 2390–2400, 2016.
- FOSTER, K.; NEUFELDT, H. Biocarbon projects in agroforestry: Lessons from the past for future development. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 148–154, 2014.
- FREITAS, M. A. S. R. et al. Bedload sediment and nutrient losses in agro-ecosystems of the Brazilian semiarid region. **Nutr Cycle Agroecosyst**, [s. l.], n. 96, p. 203–213, 2013.
- FROUFE, L. C. M. *et al.* Nutrient cycling from leaf litter in multistrata successional agroforestry systems and natural regeneration at Brazilian Atlantic Rainforest Biome. **Agroforestry Systems**, v. 94, n. 1, p. 159–171, 2020.
- GOMES, L. DE C. et al. Trees modify the dynamics of soil CO₂ efflux in coffee agroforestry systems. **Agricultural and Forest Meteorology**, [s. l.], v. 224, p. 30–39, 2016.
- GOSNELL, H.; GRIMM, K.; GOLDSTEIN, B. E. A half century of Holistic Management: what does the evidence reveal? **Agriculture and Human Values**, [s. l.], v. 37, n. 3, p. 849–867, 2020.
- GRÊT-REGAMEY, A. et al. Review of decision support tools to operationalize the ecosystem services concept. **Ecosystem Services**, [s. l.], v. 26, n. February 2021, p. 306–315, 2017.

- GUILLOT, E. et al. With or without trees: Resistance and resilience of soil microbial communities to drought and heat stress in a Mediterranean agroforestry system. **Soil Biology and Biochemistry**, [s. l.], v. 129, n. June 2018, p. 122–135, 2019.
- HAINES-YOUNG, R.; POTSCHIN-YOUNG, M. B. Revision of the common international classification for ecosystem services (CICES V5.1): A policy brief. **One Ecosystem**, [s. l.], v. 3, p. 1–6, 2018.
- HENRY, Matieu et al. Biodiversity, carbon stocks and sequestration potential in aboveground biomass in smallholder farming systems of western Kenya. **Agriculture, ecosystems & environment**, [s. l.], v. 129, n. 1-3, p. 238-252, 2009.
- HERDER, M. et al. Current extent and stratification of agroforestry in the European Union. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s. l.], v. 241, p. 121–132, 2017.
- IBGE-<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/cascavel/panorama> acessoem 07/06/2022 às 17:18
- ILSTEDT, U. et al. Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. **Scientific Reports**, [s. l.], v. 6, n. February, p. 1–12, 2016.
- IPCC. Synthesis Report. **Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Geneva, Switzerland: Cambridge University Press, 2014.
- 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 Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer**. Geneva, Switzerland: [s.n.]. Disponível em: <http://www.ipcc.ch>. Acessoem: 25 maio. 2020.
- IPCC. Summary for Policymakers. In: **Climate Change 2021: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge University Press. In Press.
- JAMAL, A. **Natural resources revenues, agriculture development and urbanization in African countries Evidence from a static and dynamic panel data** *New Medit.* [s.l.: s.n.].
- JEZEER, R. E. et al. Shaded Coffee and Cocoa – Double Dividend for Biodiversity and Small-scale Farmers. **Ecological Economics**, [s. l.], v. 140, p. 136–145, 2017.
- KALANTARI, Z. et al. Nature-based solutions for flood-drought risk mitigation in vulnerable urbanizing parts of East-Africa. **Current Opinion in Environmental Science and Health**, [s. l.], v. 5, p. 73–78, 2018.
- KESSTRA, S. et al. The superior effect of nature based solutions in land management for enhancing ecosystem services. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 610–611, p. 997–1009, 2018.
- KUYAH, S. et al. Trees in agricultural landscapes enhance provision of ecosystem services in Sub-Saharan Africa. **International Journal of Biodiversity Science, Ecosystem Services and Management**, [s. l.], v. 12, n. 4, p. 255–273, 2016.

- LIU, Z. et al. Spatial pattern and temporal stability of root-zone soil moisture during growing season on a larch plantation hillslope in Northwest China. **Forests**, [s. l.], v. 9, n. 2, 2018.
- LOSS, Arcângelo et al. Carbono e frações granulométricas da matéria orgânica do solo sob sistemas de produção orgânica. **Ciência Rural**, [s. l.], v. 39, n. 4, p. 1067-1072, 2009.
- LOURENÇO, V. R. et al. Temporal stability of total organic carbon of soils under different uses in the Caatinga biome. **Revista Caatinga**, [s. l.], v. 32, n. 3, p. 760–768, 2019.
- LUAN, J. et al. Tree species diversity promotes soil carbon stability by depressing the temperature sensitivity of soil respiration in temperate forests. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 645, n. January 2019, p. 623–629, 2018.
- MANNING, P. et al. Simple measures of climate, soil properties and plant traits predict national-scale grassland soil carbon stocks. **Journal of Applied Ecology**, [s. l.], v. 52, n. 5, p. 1188–1196, 2015.
- MBOW, C. et al. Achieving mitigation and adaptation to climate change through sustainable agroforestry practices in africa. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 8–14, 2014.
- MICCOLIS, A. et al. **Restauração ecológica com sistemas agroflorestais: como conciliar conservação com produção. Opções para Cerrado e Caatinga.** [s.l: s.n.].
- MILLER, J. D.; HESS, T. Urbanisation impacts on storm runoff along a rural-urban gradient. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 552, p. 474–489, 2017.
- MWANGI, H. M. et al. Modelling the impact of agroforestry on hydrology of Mara River Basin in East Africa. **Hydrological Processes**, [s. l.], v. 30, n. 18, p. 3139–3155, 2016.
- NESPER, M. et al. Shade tree diversity enhances coffee production and quality in agroforestry systems in the Western Ghats. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s. l.], v. 247, p. 172–181, 2017.
- NOTARO, M.; GARY, C.; DEHEUVELS, O. Correction to: Plant diversity and density in cocoa-based agroforestry systems: how farmers' income is affected in the Dominican Republic (Agroforestry Systems, (2020), 94, 3, (1071-1084), 10.1007/s10457-019-00472-7). **Agroforestry Systems**, [s. l.], v. 94, n. 3, p. 1085, 2020.
- ORDONEZ, J. C. et al. Constraints and opportunities for tree diversity management along the forest transition curve to achieve multifunctional agriculture. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, [s. l.], v. 6, n. 1, p. 54–60, 2014.
- PARADELO, R.; VIRTO, I.; CHENU, C. Net effect of liming on soil organic carbon stocks: A review. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s. l.], v. 202, p. 98–107, 2015.
- PAVAN, A. L. R.; OMETTO, A. R. Ecosystem Services in Life Cycle Assessment: A novel conceptual framework for soil. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 643, p. 1337–1347, 2018.

PEREIRA, L. R. et al. Carbon stocks in a tropical dry forest in Brazil. **Revista Ciência Agrônômica**, [s. l.], v. 47, n. 1, p. 32–40, 2016.

PINHEIRO, E. A. R.; COSTA, C. A. G.; ARAÚJO, J. C. Effective root depth of the Caatinga biome. **Journal of Arid Environments**, [s. l.], v. 89, p. 1–4, 2013.

QUANDT, A. Contribution of agroforestry trees for climate change adaptation: narratives from smallholder farmers in Isiolo, Kenya. **Agroforestry Systems**, [s. l.], v. 94, n. 6, p. 2125–2136, 2020.

REBELLO, J. F. S.; SAKAMOTO, D. G. Agricultura sintrópica segundo Ernst Götsch. Rio de Janeiro: Revinter, 2021.

SÁ-SOUSA, P. The Portuguese montado: Conciliating ecological values with human demands within a dynamic agroforestry system. **Annals of Forest Science**, [s. l.], v. 71, n. 1, p. 1–3, 2014.

SHARMA, R.; CHAUHAN, S. K.; TRIPATHI, A. M. Carbon sequestration potential in agroforestry system in India: an analysis for carbon project. **Agroforestry Systems**, [s. l.], v. 90, n. 4, p. 631–644, 2016.

SUÁREZ, L. R. et al. Cacao agroforestry systems improve soil fertility: Comparison of soil properties between forest, cacao agroforestry systems, and pasture in the Colombian Amazon. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s. l.], v. 314, n. January, 2021.

TAUGOURDEAU, S. et al. Leaf area index as an indicator of ecosystem services and management practices: An application for coffee agroforestry. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, [s. l.], v. 192, p. 19–37, 2014.

THOMAZINI, A. et al. SOC dynamics and soil quality index of agroforestry systems in the Atlantic rainforest of Brazil. **Geoderma Regional**, [s. l.], v. 5, p. 15–24, 2015.

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

UPSON, M. A.; BURGESS, P. J.; MORISON, J. I. L. Soil carbon changes after establishing woodland and agroforestry trees in a grazed pasture. **Geoderma**, [s. l.], v. 283, p. 10–20, 2016.

WOLSCHICK, N. H. et al. Long-Term Effect of Soil Use and Management on Organic Carbon and Aggregate Stability. **Rev. Brasileira de Ciência do Solo**, [s. l.], v. 42, p. 170393, 2018.

ZHANG, Y.; XIAO, Q.; HUANG, M. Temporal stability analysis identifies soil water relations under different land use types in an oasis agroforestry ecosystem. **Geoderma**, [s. l.], v. 271, p. 150–160, 2016.