



UNIVERSIDADE ESTADUAL VALE DO ACARAÚ
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ZOOTECNIA

**QUALIDADE QUÍMICA E BIOLÓGICA DE UM CAMBISSOLO EM SISTEMAS
INTEGRADOS DE PRODUÇÃO NO SEMIÁRIDO CEARENSE**

RODRIGO DIAS SILVA

Sobral

2020

Rodrigo Dias Silva

**QUALIDADE QUÍMICA E BIOLÓGICA DE UM CAMBISSOLO EM SISTEMAS
INTEGRADOS DE PRODUÇÃO NO SEMIÁRIDO CEARENSE**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação
em Zootecnia da Universidade Estadual Vale do
Acará como requisito parcial para a obtenção do título
de Mestre em Zootecnia.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Antunes de Souza

Co-orientador: Prof. Dr. Rafael Gonçalves Tonucci

Sobral

2020

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Universidade Estadual Vale do Acaraú

Sistema de Bibliotecas

Silva, Rodrigo Dias

Qualidade química e biológica de um Cambissolo em sistemas integrados de produção no Semiárido cearense [recurso eletrônico] / Rodrigo Dias Silva. -- Sobral, 2020.

1 CD-ROM: il. ; 4 ³/₄ pol.

CD-ROM contendo o arquivo no formato pdf do trabalho acadêmico com 70 folhas.

Orientação: Prof. Dr. Henrique Antunes de Souza.

Co-Orientação: Prof. Dr. Rafael Gonçalves Tonucci.

Dissertação (Mestrado em Zootecnia) - Universidade Estadual Vale do Acaraú / Centro de Ciências Agrárias e Biológicas

1. Sistemas Agroflorestais. 2. ILPF. 3. Manejo do solo. I. Título.

Rodrigo Dias Silva

**QUALIDADE QUÍMICA E BIOLÓGICA DE UM CAMBISSOLO EM SISTEMAS
INTEGRADOS DE PRODUÇÃO NO SEMIÁRIDO CEARENSE**

Esta Dissertação foi julgada adequada como requisito parcial para obtenção do título de “Mestre em Zootecnia” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Zootecnia da Universidade Estadual Vale do Acaraú

Sobral, 28 de Julho de 2020.



Profa. Cláudia Goulart de Abreu, Dr.^a
Coordenadora do Curso

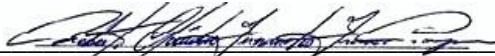
Banca Examinadora:



Prof. Henrique Antunes de Souza, Dr.
Orientador
Embrapa Meio-Norte



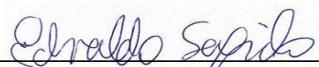
Prof. Rafael Gonçalves Tonucci, Dr.
Coorientador
Embrapa Caprinos e Ovinos



Prof. Roberto Cláudio Fernandes Franco Pompeu, Dr.
Examinador externo
Embrapa Caprinos e Ovinos



Prof. Luiz Fernando Carvalho Leite, Dr.
Examinador externo
Embrapa Meio-Norte



Prof. Edvaldo Sagrilo, Dr.
Examinador externo
Embrapa Meio-Norte

Este trabalho é dedicado a Deus, sem ele
nada seria possível, à minha esposa
Kalécia e a minha filha Ana Ester.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus pelo dom da vida e por ter me mantido durante a trajetória deste trabalho até aqui, com saúde e forças para chegar até o final.

Sou grato à minha família pelo apoio que sempre me deram durante toda a minha vida, a minha esposa Kalécia, minha filha Ana Ester, minha Mãe Osmaria e a meu pai Valdir, assim como meus irmãos Nágila, Ranyelle, Valdir Filho, José e Állyson.

Deixo um agradecimento especial ao meu orientador Dr. Henrique pelos incentivos e pela intensa dedicação e valorosa contribuição sobre esta dissertação. Dedico ao igualmente ao meu Coorientador Dr. Rafael, que muito contribuiu e agregou valor ao trabalho, assim como a professora Dr^a Melissa Oda que proporcionou relevantes contribuições estatísticas ao trabalho.

Também quero agradecer à Universidade Estadual Vale do Acaraú-UVA e a todos os professores do meu curso pela elevada qualidade do ensino oferecido. Assim como as Embrapa Caprinos e Ovinos e Embrapa Meio-Norte.

À Fundação Cearense de Apoio a Pesquisa – FUNCAP pela bolsa de estudos concedida.

Agradeço aos colegas de profissão que me auxiliaram desde as coletas até as análises dos dados, Sr. Pedro e Sr. Chiquinho pela ajuda em campo, José Wilson pela ajuda operacional, Ivanderlete pelos primeiros ensinamentos no mestrado, aos colegas Karina, Patrício, Jéssica, Kelry, Rogervânia, Shirley, Walter e André.

Aos técnicos Sr. Moreira, Sr. Afonso, Márcio e Alex pelos auxílios nas análises laboratoriais. Aos colegas de Teresina, Smaelô, Nill, Leovânio, Ane, Amanda, Alcilane, Suzy, Gabriela, Geania, Jeniffer e Renato.

“É o Senhor que faz crescer o pasto para o gado, e as plantas que o homem cultiva, para da terra tirar o alimento...” (Salmo 104:14)

RESUMO GERAL

Os sistemas integrados de produção agropecuária proporcionam benefícios pelo consórcio de diferentes culturas agrícolas, florestais e forrageiras na mesma área, contribuindo para a ciclagem de nutrientes na conservação de carbono orgânico. Assim, objetivou-se avaliar alterações em atributos químicos e biológicos em Cambissolo na conversão de mata nativa de vegetação de Caatinga em sistemas agroflorestais. Foram conduzidos dois experimentos, ambos na Embrapa Caprinos e Ovinos, em Sobral, CE. O primeiro (i) avaliou seis manejos: (1) área de consórcio para a produção de volumoso, cultivada com milho e capim massai; (2) mata nativa (Caatinga); (3) sistema agroflorestal com milho em 66% da área; (4) sistema agroflorestal cultivado com sorgo em 66% da área; (5) sistema agroflorestal cultivado com sorgo em 33% da área; (6) sistema agroflorestal cultivado com milho em 33% da área. Todos os sistemas agroflorestais foram consorciados em faixas com feijão guandu e capim massai e o renque era composto por fragmentos de Caatinga nativa. Amostras de solo foram coletadas nas camadas 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,50 m para análise da fertilidade do solo, fracionamento químico (ácidos húmicos, fúlvicos e huminas) e físico (carbono orgânico mineralizável e particulado) da matéria orgânica. As análises biológicas realizadas foram carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, respiração basal do solo e quociente metabólico e microbiano. De posse dos dados, empregou-se a análise de componentes principais e análise de agrupamento. No segundo (ii) experimento, os manejos avaliados foram: (1) Área de consórcio para produção de volumoso, cultivada com milho e capim massai; (2) mata nativa (Caatinga); (3) SAF1: sistema agroflorestal com renques de espécies florestais lenhosas nativas ocupando 33% da área e parcela agrícola ocupando 66% da área e (4) SAF2: sistema agroflorestal apresentando proporções inversas do SAF1. Todos os sistemas agroflorestais foram consorciados com sorgo ou milho, feijão guandu e capim massai e o renque era composto por fragmentos de Caatinga nativa. Amostras de solo foram coletadas nas camadas 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40, 0,4-0,6 e 0,6-1,0 m para análise de carbono (C), nitrogênio (N), densidade e cálculos de estoque de C e N, além da relação C/N do solo. De posse dos dados, empregou-se a análise de componentes principais e análise de agrupamento. No experimento (i), verificou-se que a área de consórcio para produção de volumoso apresentou maiores concentrações para os atributos químicos e biológicos do solo na camada superficial. Os sistemas agroflorestais com renques de mata nativa apresentaram maiores concentrações para carbono orgânico e suas frações que a área de consórcio e mata nativa de Caatinga. No experimento (ii), a área

de consórcio proporciona maiores concentrações e estoques de C na camada superficial (0-0,1 m), sendo que a partir desta camada os sistemas agroflorestais apresentaram maiores concentrações e estoques de C até 1,0 m. Para o estoque de C acumulado até 1,0 m de profundidade, destaca-se o SAF2. Os sistemas agroflorestais apresentam-se como alternativas de incremento de C em áreas de conversão de mata nativa de vegetação de Caatinga.

Palavras-chave: Sistemas Agroflorestais, ILPF, Manejo do Solo

ABSTRACT

The integrated agricultural production systems provide benefits by the consortium of different agricultural, forest and forage crops in the same area, contributing to the cycling of nutrients in the conservation of organic carbon. Thus, the objective was to evaluate changes in chemical and biological attributes in Inceptisol in conversion of native forest of Caatinga vegetation to agroforestry systems. Two experiments were carried out, both at Embrapa Caprinos e Ovinos, in Sobral, CE; the first (i) evaluated six managements: (1) Consortium area for forage production, cultivated with corn and massai grass; (2) native forest (Caatinga); (3) agroforestry system with millet in 66% of the area; (4) agroforestry system cultivated with sorghum in 66% of the area; (5) agroforestry system cultivated with sorghum in 33% of the area; (6) agroforestry system cultivated with millet in 33% of the area. All agroforestry systems were intercropped in strips with pigeon pea and massai grass and the row was composed of fragments of native Caatinga. Soil samples were collected in layers 0-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.30 and 0.30-0.50 m for analysis of soil fertility, chemicals (humic, fulvic and humin acids) and physical (mineralizable and particulate organic carbon) fractionation of organic matter. The biological analyses performed were carbon and nitrogen from microbial biomass, basal soil respiration and metabolic and microbial quotient. In possession of the data, principal component analysis and cluster analysis were used. In the second (ii) experiment, the evaluated managements were: (1) Consortium area for bulk production, cultivated with corn and massai grass; (2) native forest (Caatinga); (3) SAF1: agroforestry system with rows of native woody forest species occupying 33% of the area and agricultural parcel occupying 66% of the area and (4) SAF2: agroforestry system presenting inverse proportions to SAF1. All agroforestry systems were intercropped with sorghum or millet, pigeon pea and massai grass and the row was composed of fragments of native Caatinga. Soil samples were collected in layers 0-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.40, 0.4-0.6 and 0.6-1.0 m for carbon analysis (C), nitrogen (N), density and C and N stock calculations, in addition to the ratio C/N of the soil. In possession of the data, principal component analysis and cluster analysis were used. In an experiment (i) it was found that the consortium area for bulk production presented higher concentrations for chemical and biological soil attributes in the surface layer. Agroforestry systems with higher rows of native forest graded for organic carbon and its fractions than the consortium area and native forest of Caatinga. In experiment (ii) the consortium area provides higher concentrations and stocks of C in the surface layer (0-0.1 m), and from this layer, the agroforestry systems showed higher

concentrations and stocks of C up to 1.0 m. For the stock of C accumulated up to 1.0 m in depth, SAF2 stands out. Agroforestry systems are presented as alternatives for increasing C in areas of conversion of native forest to Caatinga vegetation.

Keyword: Agroforestry Systems, CLFI, Soil Management

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------------------|---|
| CBM | Carbono da biomassa microbiana |
| COM | Carbono orgânico associado a minerais |
| COP | Carbono orgânico particulado |
| COT | Carbono orgânico total |
| CTC | Capacidade de troca de cátions |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| FAF | Fração Ácidos húmicos |
| FAH | Fração Ácidos fúlvicos |
| ILPF | Integração lavoura-Pecuária-Floresta |
| IMC | Índice de manejo de carbono |
| MOS | Matéria orgânica do solo |
| NBM | Nitrogênio da biomassa microbiana |
| PCA | Análise de componentes principais |
| qCO ₂ | Quociente metabólico |
| qMIC | Quociente microbiano |
| RBS | Respiração Basal do solo |
| SAF | Sistema agroflorestal |
| SB | Soma de bases |
| UVA | Universidade Estadual Vale do Acaraú |
| V% | Saturação por bases |

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| CAPÍTULO I | 18 |
| QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA-FLORESTA NO BIOMA CAATINGA | 18 |
| INTRODUÇÃO | 22 |
| MATERIAL E MÉTODOS | 24 |
| Tabela 1. Teores de areia, silte argila e classificação textural de área de consórcio, mata, sistema agroflorestral com milho (SAF MI 1 e 2) e sorgo (SAF SO 1 e 2)..... | 24 |
| Histórico das áreas de estudo | 24 |
| Descrição dos manejos das áreas avaliadas:..... | 24 |
| Amostragem e análises do solo | 26 |
| Figura 1. Esquema da área experimental dos sistemas agroflorestrais, mata nativa e consórcio | 27 |
| Análise e sistematização de dados | 28 |
| RESULTADOS E DISCUSSÃO | 29 |
| Tabela 2. Caracterização dos atributos químicos do solo em área de consórcio, de sistemas agroflorestrais e de mata nativa | 30 |
| Tabela 3. Caracterização do carbono orgânico total, substâncias húmicas, carbono orgânico particulado e carbono orgânico associado a minerais do solo em área de consórcio, de sistemas agroflorestrais e de mata nativa | 32 |
| Tabela 4. Caracterização do carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, respiração basal do solo e quociente metabólico e microbiano do solo em área de consórcio, de sistemas agroflorestrais e de mata nativa | 34 |
| Tabela 5. Coeficientes de pesos (autovetores), autovalores e variância explicada por cada componente principal (CP1 e CP2) de atributos químicos e biológicos do solo em área de consórcio, de sistemas agroflorestrais e de mata nativa | 35 |
| Figura 2. Biplot entre a relação de atributos do solo e área de consórcio, mata nativa e sistemas agroflorestrais para os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2), para a camada de 0-0,1 m (A), 0,1-0,2 (B), 0,2-0,3 (C) e 0,3-0,5 m (D) | 37 |
| Figura 3. Dendrograma de dissimilaridade entre atributos do solo em área de consórcio, mata nativa e sistemas agroflorestrais, para a camada de 0-0,1 m (A), 0,1-0,2 (B), 0,2-0,3 (C) e 0,3-0,5 m (D) | 39 |
| CONCLUSÕES | 42 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 43 |
| CAPÍTULO II | 47 |
| ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO DE SISTEMAS INTEGRADOS EM CAMBISSOLO NO SEMIÁRIDO | 47 |
| INTRODUÇÃO | 51 |

| | |
|---|----|
| MATERIAL E MÉTODOS | 53 |
| Histórico das áreas de estudo | 53 |
| Amostragem e análises do solo | 54 |
| Determinações dos teores de carbono e nitrogênio e estoque de carbono no solo | 55 |
| Análise e sistematização de dados | 56 |
| RESULTADOS E DISCUSSÃO | 57 |
| Tabela 1. Correlação, qualidade de representação (Cos^2) e contribuição (%) entre variáveis originais e componentes principais e relação, teor e estoque de C e N, e densidade do solo sob influência de manejo Consórcio, mata de Caatinga e sistemas agroflorestais para as camadas avaliadas. | 58 |
| Figura 1. Biplot entre a relação, teor e estoque de carbono e nitrogênio e a densidade do solo sob influência de manejo Consórcio, mata de Caatinga e sistemas agroflorestais para os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2), para a camada de 0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B), 0,2-0,4 m (C), 0,4-0,6 m (D) e 0,6-1,0 m (E)..... | 59 |
| Figura 2. Dendrograma de dissimilaridade entre relação, teor e estoque de C e N, e a densidade do solo sob influência de manejo Consórcio, mata de Caatinga e sistemas agroflorestais na camada de 0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B), 0,2-0,4 m (C), 0,4-0,6 m (D) e 0,6-1,0 m (E)..... | 61 |
| Tabela 2. Valores médios para relação teor e estoque de C e N e densidade do solo sob influência de manejo Consórcio, mata de Caatinga e sistemas agroflorestais para as camadas avaliadas | 62 |
| Figura 3. Estoque de C (A) e de N (B) acumulado até 1,0 m sob influência de manejo Consórcio, mata de Caatinga e sistemas agroflorestais. ¹ Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). | 63 |
| CONCLUSÕES | 66 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 67 |

CAPÍTULO I

QUALIDADE DO SOLO EM SISTEMAS DE INTEGRAÇÃO LAVOURA- PECUÁRIA-FLORESTA NO BIOMA CAATINGA

RESUMO: O adequado manejo do solo garante sua qualidade e proporciona a sustentabilidade de sistemas agropecuários. Na região semiárida brasileira, as condições edafoclimáticas impõem limitações que podem comprometer o desenvolvimento agropecuário, sobretudo quando a qualidade do solo é negligenciada. Objetivou-se com o presente trabalho quantificar atributos químicos e biológicos do solo em sistema agroflorestal, em seu ano de estabelecimento, nas condições edafoclimáticas do Semiárido brasileiro. O estudo foi realizado em Sobral, CE, em área experimental da Embrapa Caprinos e Ovinos, em Cambissolo Háplico. Os manejos avaliados foram: (1) área de consórcio para produção de volumoso, cultivada com milho e capim massai; (2) mata nativa (Caatinga); (3) sistema agroflorestal com milheto em 66% da área; (4) sistema agroflorestal cultivado com sorgo em 66% da área; (5) sistema agroflorestal cultivado com sorgo em 33% da área; (6) sistema agroflorestal cultivado com milheto em 33% da área. Todos os sistemas agroflorestais foram consorciados em faixas com feijão guandu e capim massai e o renque era composto por fragmentos de Caatinga nativa. Amostras de solo foram coletadas nas camadas 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30 e 0,30-0,50 m para análise da fertilidade do solo, fracionamento químico (ácidos húmicos, fúlvicos e huminas) e físico (carbono orgânico mineralizável e particulado) da matéria orgânica. As análises biológicas realizadas foram carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, respiração basal do solo e quociente metabólico e microbiano. De posse dos dados, empregou-se a análise de componentes principais e análise de agrupamento. A área de consórcio para produção de volumoso apresentou maiores concentrações para os atributos químicos e biológicos do solo na camada superficial. Os sistemas agroflorestais com renques de mata nativa apresentaram maiores concentrações para carbono orgânico e suas frações que a área de consórcio e mata nativa de Caatinga. Os sistemas agroflorestais com menor área agricultável (33% da área) apresentaram características semelhantes para fracionamento do C, atributos químicos e biológicos do solo a mata nativa de Caatinga.

Palavras chaves: Sistemas Agroflorestais, ILPF, Manejo do Solo.

ABSTRACT: The adequate management of soil ensures its quality and provides the sustainability of farming systems. In the Brazilian semi-arid region, the soil and climate conditions impose limitations that can compromise agricultural development, especially when soil quality is neglected. The objective of this work was to quantify chemical and biological attributes of the soil in an agroforestry system, in its year of establishment, in the edaphoclimatic conditions of the Brazilian semiarid region. The study was conducted in Sobral, CE, in the experimental area of Embrapa Caprinos e Ovinos, in Inceptisol. The managements evaluated were: (1) Consortium area for volume production, cultivated with corn and massai grass; (2) native forest (Caatinga); (3) agroforestry system with millet in 66% of the area; (4) agroforestry system cultivated with sorghum in 66% of the area; (5) agroforestry system cultivated with sorghum in 33% of the area; (6) agroforestry system cultivated with millet in 33% of the area. All agroforestry systems were intercropped in strips with cowpea bean and massai grass, and the renque was composed of fragments of native Caatinga. Soil samples were collected in layers 0-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.30 and 0.30-0.50 m for soil fertility analysis, chemical (humic, fulvic and humin acids) and physical (mineralizable and particulate organic carbon) fractioning of organic matter. The biological analyses performed were microbial biomass carbon and nitrogen, soil basal respiration, and metabolic and microbial quotient. With the data, we used principal component analysis and cluster analysis. The area of intercropping for bulking showed higher concentrations for the chemical and biological soil attributes in the surface layer. The agroforestry systems with native forest branches presented higher concentrations for organic carbon and its fractions than the intercropping area and native Caatinga forest. The agroforestry systems with smaller agricultural area (33% of the area) presented similar characteristics for fractioning of C, chemical and biological attributes of the soil to the native forest of Caatinga.

Keyword: Agroforestry Systems, CLFI, Soil Management

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|------------------|---|
| CBM | Carbono da biomassa microbiana |
| COM | Carbono orgânico associado a minerais |
| COP | Carbono orgânico particulado |
| COT | Carbono orgânico total |
| CTC | Capacidade de troca de cátions |
| EMBRAPA | Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária |
| FAF | Fração Ácidos húmicos |
| FAH | Fração Ácidos fúlvicos |
| ILPF | Integração lavoura-Pecuária-Floresta |
| IMC | Índice de manejo de carbono |
| MOS | Matéria orgânica do solo |
| NBM | Nitrogênio da biomassa microbiana |
| PCA | Análise de componentes principais |
| qCO ₂ | Quociente metabólico |
| qMIC | Quociente microbiano |
| RBS | Respiração Basal do solo |
| SAF | Sistema agroflorestal |
| SB | Soma de bases |
| UVA | Universidade Estadual Vale do Acaraú |
| V% | Saturação por bases |

INTRODUÇÃO

O bioma Caatinga abrange uma área de aproximadamente 10% do território brasileiro, sendo a região Semiárida mais populosa do mundo com 27 milhões de habitantes (Sudene, 2017). Nessa região há predominância de solos rasos, pedregosos e que estão sobre embasamento cristalino, dificultando acúmulos de água no subsolo e favorecendo processos erosivos (Freire et al., 2018).

Além dessas características, a técnica de corte e queima da vegetação, seguida por aração e gradagem prevalecem no manejo do solo (Miranda, 2019). Essas práticas são descritas na literatura, como potenciais degradadoras, afetando negativamente a estrutura do solo (Salomão, 2019), diminuindo a sua fertilidade (Silva e De Maria, 2011) e reduzindo a matéria orgânica do solo em sua fração lábil (Medeiros et al., 2020). Essas características, aliadas às baixas precipitações da região colocam esse bioma em vulnerabilidade (Mota e Valladares, 2011; Pompeu et al., 2019), e somadas ao pastejo excessivo (Araújo Filho et al., 2010; Pereira Filho et al., 2013) potencializam a degradação do solo gerando processos de desertificação (Souza et al., 2015).

Desse modo, faz-se necessários estudos para mitigar os impactos causados pela agricultura nessa região, pois diferentes usos e manejos podem aumentar ou reduzir a qualidade dos atributos químicos do solo (Corrêa et al., 2017), sobretudo a matéria orgânica (Asmar Junior, 2019), que é um dos indicadores mais úteis para avaliação da qualidade do solo.

Um sistema agroflorestal (SAF) localizado em Sobral, CE, proporcionou melhorias nos atributos químicos e físicos do solo em relação aos sistemas tradicionais de cultivo agrícola, o que é justificado pela deposição de material vegetal advindo da poda e esterco de animais que pastejaram a área (Silva, 2008). Desse modo, SAFs apresentam melhoria nos atributos físicos, o que são atribuídos aos bioporos oriundos da decomposição das raízes de diversas plantas (Nascimento, 2016).

A decomposição da vegetação da Caatinga promove a elevação das concentrações de P, K, Ca e Mg no solo, o que justifica o emprego de espécies lenhosas em sistemas integrados e contribuem para a melhoria da fertilidade do solo pela ciclagem de nutrientes que essas espécies proporcionam; aumentando, também, a quantidade e qualidade da matéria orgânica do solo pela decomposição de raízes, sobretudo quando da presença de leguminosas arbóreas (Primo et al., 2018; Magalhães, 2017).

Assim, sistemas integrados conseguem de forma sustentável promover aumento da qualidade dos indicadores químicos (Lazzaretti et al., 2019) e biológicos (Alves, 2014) do solo, afetando-os positivamente (Azevedo et al., 2019). De fato, a conversão de florestas primárias e secundárias em sistemas agrícolas leva à redução nos estoques de C do solo, no entanto, é parcialmente reversível quando há inclusão de árvores (Don et al., 2010).

A hipótese do presente trabalho é de que a introdução de sistemas integrados com renques de espécies da Caatinga proporciona a manutenção dos atributos químicos, microbiológicos e carbono do solo similares à mata nativa de Caatinga. Assim, objetivou-se avaliar a fertilidade do solo, o fracionamento do carbono e atributos biológicos de um Cambissolo sob sistemas integrados no Semiárido cearense.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em sistema agroflorestal da Embrapa Caprinos e Ovinos, no município de Sobral, CE (3° 44' 53.642" S, 40° 21' 46.231" W). O clima da região é quente e semiárido, BSw'h', segundo a classificação climática Köppen com 7-8 meses de deficiência hídrica (Duarte e Caracristi, 2005). Assim, a região tem uma temperatura média anual entre 26-28°C, regime pluviométrico médio de 821,6 mm/ano (Funceme, 2019) e altitude média de 81 m. O solo da área em estudo é classificado como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico típico, A moderado, textura média, com classificação textural entre franco-arenoso e franco-argilo-arenoso (Tabela 1).

Tabela 1. Teores de areia, silte argila e classificação textural de área de consórcio, mata, sistema agroflorestal com milho (SAF MI 1 e 2) e sorgo (SAF SO 1 e 2)

| Camada | Areia | Silte | Argila | Classificação | Camada | Areia | Silte | Argila | Classificação |
|-----------------|--------------------|-------|--------|-----------------------|------------------|--------------------|-------|--------|-----------------------|
| m | g kg ⁻¹ | | | textural | m | g kg ⁻¹ | | | textural |
| SAF MI 1 | | | | | SAF MI 2 | | | | |
| 0,0-0,1 | 763 | 110 | 127 | Franco-arenosa | 0,0-0,1 | 669 | 145 | 186 | Franco-arenosa |
| 0,1-0,2 | 674 | 185 | 142 | Franco-arenosa | 0,1-0,2 | 675 | 169 | 156 | Franco-arenosa |
| 0,2-0,3 | 644 | 207 | 148 | Franco-arenosa | 0,2-0,3 | 702 | 142 | 156 | Franco-arenosa |
| 0,3-0,5 | 542 | 181 | 277 | Franco-argilo arenosa | 0,3-0,5 | 667 | 158 | 176 | Franco-arenosa |
| SAF SO 1 | | | | | CONSÓRCIO | | | | |
| 0,0-0,1 | 700 | 155 | 144 | Franco-arenosa | 0,0-0,1 | 593 | 210 | 197 | Franco-arenosa |
| 0,1-0,2 | 693 | 140 | 167 | Franco-arenosa | 0,1-0,2 | 560 | 238 | 202 | Franco-argilo arenosa |
| 0,2-0,3 | 671 | 139 | 190 | Franco-arenosa | 0,2-0,3 | 525 | 269 | 206 | Franco-argilo arenosa |
| 0,3-0,5 | 545 | 160 | 295 | Franco-argilo arenosa | 0,3-0,5 | 520 | 281 | 198 | Franco-arenosa |
| SAF SO 2 | | | | | MATA | | | | |
| 0,0-0,1 | 700 | 145 | 155 | Franco-arenosa | 0,0-0,1 | 731 | 142 | 128 | Franco-arenosa |
| 0,1-0,2 | 747 | 127 | 126 | Franco-arenosa | 0,1-0,2 | 758 | 106 | 136 | Franco-arenosa |
| 0,2-0,3 | 723 | 102 | 176 | Franco-arenosa | 0,2-0,3 | 719 | 123 | 158 | Franco-arenosa |
| 0,3-0,5 | 656 | 108 | 236 | Franco-argilo arenosa | 0,3-0,5 | 697 | 143 | 160 | Franco-arenosa |

Fonte: Autor (2020).

Histórico das áreas de estudo

Descrição dos manejos das áreas avaliadas:

01 - *Consórcio*: Área de consórcio aberta entre 2016 e 2017, destinada exclusivamente ao cultivo de forragem (milho ou sorgo) consorciado com capim massai, cuja finalidade é de produção de silagem e colhida mecanicamente. Os materiais resultantes das rebrotas não foram pastejados, sendo deixados como cobertura do solo e incorporados com arado e gradeado no ano seguinte. O solo foi preparado com aração e gradagem, e cultivado no seu

primeiro ano (2017) com sorgo forrageiro (espaçamento de 0,9 m entre linhas e 15 sementes por metro linear) com 2 kg ha⁻¹ de sementes de capim massai semeadas a lanço na entrelinha de plantio, sendo realizadas adubações: mineral com 200 kg ha⁻¹ de NPK (8-28-16), na fundação, adubação orgânica com esterco caprino e ovino, 7 Mg ha⁻¹ (composição do esterco: N: 14,0 - 21,9 g kg⁻¹, P: 1,15 - 6,5 g kg⁻¹, K: 1,3 - 14,7 g kg⁻¹, Ca: 11,0 - 28,1 g kg⁻¹, e Mg 7,0 g kg⁻¹; Peixoto Filho et al, 2013; Pereira et al., 2014; Leite et al., 2015) e 50 kg N ha⁻¹ (fonte: ureia) em cobertura. No ano seguinte (2018), a área foi cultivada com milho no espaçamento de 0,9 x 0,2 m, consorciado com capim massai (*Megathyrus maximus* cv. Massai) (2 kg ha⁻¹), semeado a lanço nas entrelinhas, e foram aplicados 300 kg ha⁻¹ de NPK (8-28-16) no plantio e na cobertura foram usados 50 kg N ha⁻¹ (fonte: ureia) e 30 kg K₂O ha⁻¹ (fonte: KCl).

02 - *Mata nativa (Caatinga)*: Área de mata nativa do bioma Caatinga, com presença de espécies arbustivas e arbóreas hiperxerófilas, caracterizada por plantas adaptadas à escassez de água (7 a 8 meses), caducifólias, de menor porte, e alguns indivíduos apresentam espinhos. Não há histórico de cultivo ou extração de madeira na área desde a década de 1980, e, ocasionalmente, utilizada para pastejo animal, sendo as espécies mais frequentes: Pau branco (*Auxemma oncocalyx*), Marmeleiro (*Croton sonderianus*), Jurema preta (*Mimosa tenuiflora*), Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia*), Juazeiro (*Ziziphus joazeiro*), Umburana (*Amburana cearenses*) e atingueira (*Caesalpinia pyramidalis*). O sistema agroflorestal (SAF) avaliado foi aberto no final do ano de 2017 e dividido em 4 áreas, após a retirada das estacas e lenha. Os ramos, folhas e galhos finos oriundos da abertura das faixas (equivalente a 19 Mg ha⁻¹ de material vegetal) foram incorporados pela aração e gradagem do solo, sendo que nos manejos com maior área agricultável, esses restolhos foram previamente triturados com máquina trituradora de galhos e resíduos em uma fração < 0,05 m e distribuídos sobre o solo. O plantio foi realizado em 26 de fevereiro de 2018, em consórcio de milho (20 sementes por metro linear) ou sorgo (9 sementes por metro linear) com guandu (9 sementes por metro linear), intercalados, em linhas com espaçamento de 0,8 m com semeadora mecânica, e na caixa de adubo da semeadora foi adicionado o capim massai, sendo utilizados 3 kg de sementes e 150 kg ha⁻¹ de NPK (8-28-16). Na adubação de cobertura foram utilizados 100 kg ha⁻¹ de N (fonte: ureia) e 20 kg ha⁻¹ de K₂O (fonte: KCl) em 02/04/2018. Não foi realizada calagem em nenhum dos manejos.

O SAF foi subdividido em 04, cada um com largura total de 30 metros, sendo (10 ou 20 m) aberto e cultivado em consórcio e o restante (10 ou 20 m) composto pelo renque de mata de vegetação de Caatinga.

03 - *SAF MI 1*: Cultivado em 2/3 da largura da faixa com consórcio de milho e 1/3 composto por renque de vegetação de Caatinga;

04 - *SAF SO 1*: Cultivado em 2/3 da sua área com consórcio de sorgo e 1/3 composto por renque de vegetação de Caatinga;

05 - *SAF SO 2*: Cultivado em 1/3 da sua área com consórcio de sorgo e 2/3 composto por renque de vegetação de Caatinga;

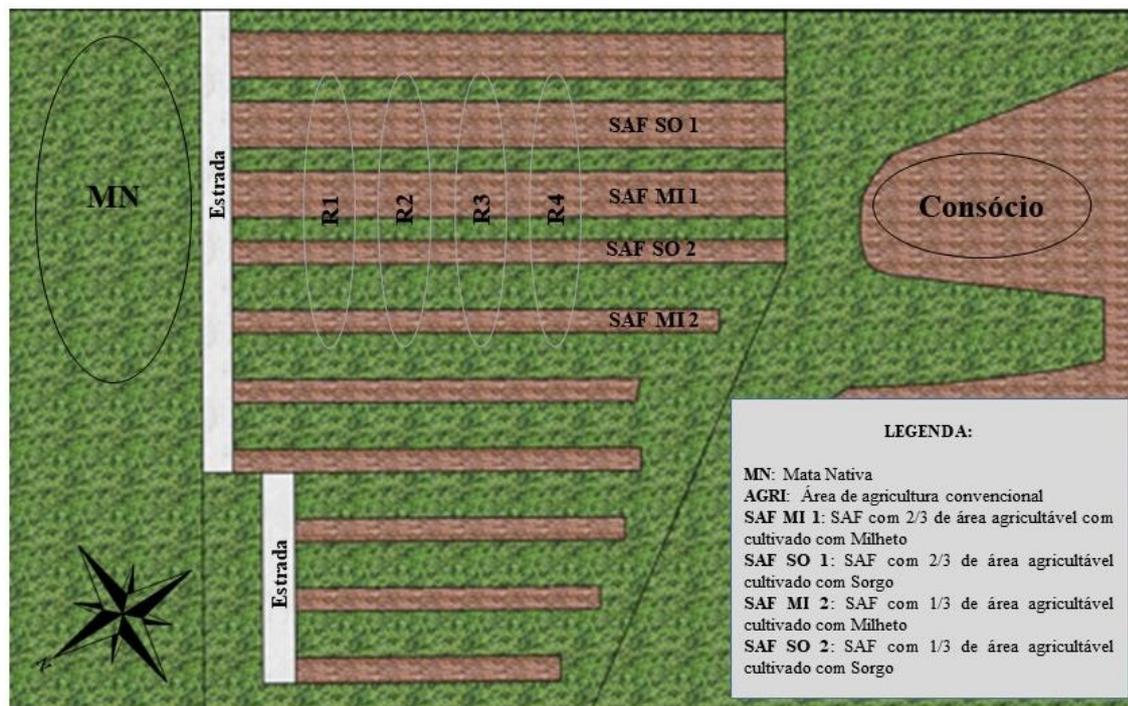
06 - *SAF MI 2*: Cultivado em 1/3 da sua área com consórcio de milho e 2/3 composto por renque de vegetação de Caatinga.

Todas as áreas agricultáveis no SAF foram consorciadas com guandu e massai e o restante da área não cultivada era composto por mata nativa de espécies da Caatinga.

Amostragem e análises do solo

As amostras de solo foram coletadas nas seguintes camadas: 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,30; 0,30-0,50 m, com 4 repetições, sendo que cada amostra foi composta por cinco amostras simples que foram retiradas em transecto que perpassava a área cultivada (culturas anuais) e preservada (componente florestal) do SAF, para as análises de fertilidade do solo e fracionamento do carbono (Figura 1). As amostras para análises biológicas foram coletadas na camada 0-0,10 m, com 10 amostras simples para formar uma composta, espaçadas a cada 3 metros entre cada amostra simples, e 10 metros entre cada repetição perpassando a área cultivada e preservada no SAF. As coletas para análise de fertilidade e fracionamento do C foram realizadas entre junho e julho (após a colheita) e para análises biológicas foram realizadas em maio de 2018 (antes da colheita) da forragem.

Figura 1. Esquema da área experimental dos sistemas agroflorestais, mata nativa e consórcio



Fonte: Autor (2020).

Os atributos químicos analisados foram: potencial hidrogeniônico (pH CaCl_2), fósforo (P), potássio (K), cálcio (Ca), magnésio (Mg), acidez potencial ($\text{H}+\text{Al}$), carbono orgânico total (COT) e calculados a soma de bases (SB), a capacidade de troca de cátions (CTC) e a saturação de bases (V%), conforme descrito em Teixeira et al. (2017). Para as análises biológicas, foram determinados os valores de carbono (CBM) e o nitrogênio da biomassa microbiana (NBM) conforme metodologia da irradiação-extração estabelecida por Ferreira et al. (1999). A respiração basal do solo (RBS) foi determinada conforme Alef (1995). O quociente metabólico (qCO_2) foi calculado pela relação entre a respiração basal do solo e o carbono microbiano, segundo Silva et al. (2007). Adicionalmente, realizou-se a determinação do fracionamento químico da matéria orgânica do solo, quantificando as substâncias húmicas (frações: ácido fúlvico, ácido húmico e humina), segundo a técnica de solubilidade diferencial, estabelecidos pela Sociedade Internacional de Substâncias Húmicas, desenvolvidos por Swift (1996) e adaptado por Benites et al. (2003). Já o fracionamento físico da matéria orgânica foi realizado conforme Cambardella e Elliott (1992).

A partir dos resultados de COT e dos teores de C em cada fração granulométrica, calculou-se o índice de manejo de carbono (IMC) para cada uma das áreas avaliadas. Assim,

O IMC foi determinado conforme proposto por Blair et al. (1995), considerando o índice de compartimento de carbono e o índice de labilidade, sendo o primeiro obtido pela relação entre o teor de C na amostra (COT) e o teor de C em uma amostra da mesma profundidade de uma área de referência (COT da área de Caatinga), enquanto ao índice de labilidade é calculado pela relação entre a labilidade do C na amostra e a labilidade do C em uma amostra da mesma profundidade da área de referência.

Nesse trabalho, a labilidade da matéria orgânica do solo foi determinada pela relação entre o carbono particulado e o associado a minerais.

Análise e sistematização de dados

Os dados foram apresentados por suas médias e foram realizadas as análises com estatísticas multivariadas, para o exame de componentes principais (PCA), com o objetivo de sintetizar as variações multidimensionais encontradas a partir dos atributos estudados nos diferentes usos e manejos do solo, e análise de agrupamento pela distância Euclidiana por meio do programa R (R Core Team, 2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos atributos químicos, fracionamento do C e microbiológicos foram comparados com valores obtidos em outros trabalhos realizados na região Semiárida, o que permite inferir a qualidade do solo, frente à implantação de sistemas agroflorestais (SAF) em áreas de Caatinga.

Para a fertilidade do solo (Tabela 2), quando analisam-se as variáveis determinadas (pH, P, K, Ca e Mg) com as concentrações dentro do intervalo verificado entre os módulos agrícola e pastoril de SAF consolidado (>15 anos de implantação), do tipo savana e mesma região de estudo (Souza et al., 2017), permite-se verificar se há restrições químicas, necessidade de aporte de nutrientes ou se a mudança de uso da terra, mesmo com a adoção de sistemas integrados, contribui com a manutenção dos níveis de fertilidade do solo e da ciclagem de C.

Tabela 2. Caracterização dos atributos químicos do solo em área de consórcio, de sistemas agroflorestais e de mata nativa

| Uso e Manejo | pH (CaCl ₂) | P | K ⁺ | Ca ²⁺ | Mg ²⁺ | H+Al | SB | T | V |
|-------------------------|----------------------------|--------------------|----------------|-----------------------------------|------------------|------|-------|------|----|
| | | mg/dm ³ | | ----- cmolc/dm ³ ----- | | | | | % |
| Camada 0-0,1 m | | | | | | | | | |
| CONSÓRCIO | 6,1 | 87,5 | 0,37 | 19,5 | 2,1 | 0,78 | 22,00 | 22,8 | 96 |
| SAF SO 1 | 5,3 | 24,1 | 0,32 | 19,7 | 1,7 | 2,18 | 21,80 | 24,0 | 90 |
| SAF MI 1 | 5,3 | 11,4 | 0,45 | 27,1 | 1,4 | 2,42 | 29,00 | 31,4 | 91 |
| SAF SO 2 | 5,2 | 7,6 | 0,32 | 11,7 | 0,8 | 1,65 | 12,90 | 14,6 | 89 |
| SAF MI 2 | 4,9 | 5,4 | 0,29 | 11,5 | 0,9 | 1,91 | 12,70 | 14,6 | 87 |
| MATA | 4,8 | 0,6 | 0,18 | 11,2 | 0,7 | 1,35 | 12,10 | 13,5 | 90 |
| Camada 0,1-0,2 m | | | | | | | | | |
| CONSÓRCIO | 6,0 | 83,9 | 0,26 | 33,3 | 1,6 | 0,70 | 35,27 | 36,0 | 98 |
| SAF SO 1 | 5,2 | 17,6 | 0,27 | 19,5 | 1,6 | 2,20 | 21,46 | 23,7 | 89 |
| SAF MI 1 | 5,2 | 8,0 | 0,39 | 9,3 | 1,2 | 1,80 | 10,98 | 12,8 | 83 |
| SAF SO 2 | 4,9 | 4,6 | 0,21 | 9,8 | 0,9 | 1,20 | 10,90 | 12,2 | 89 |
| SAF MI 2 | 4,7 | 3,4 | 0,20 | 10,6 | 1,1 | 1,50 | 11,91 | 13,4 | 88 |
| MATA | 4,7 | 0,6 | 0,16 | 10,9 | 0,8 | 1,20 | 11,98 | 13,2 | 90 |
| Camada 0,2-0,3 m | | | | | | | | | |
| CONSÓRCIO | 6,0 | 30,5 | 0,13 | 24,3 | 2,31 | 0,75 | 26,77 | 27,5 | 97 |
| SAF SO 1 | 5,0 | 10,3 | 0,20 | 21,2 | 2,71 | 2,00 | 24,17 | 26,2 | 92 |
| SAF MI 1 | 5,0 | 5,7 | 0,34 | 10,1 | 1,37 | 2,02 | 11,95 | 13,0 | 85 |
| SAF SO 2 | 4,7 | 3,1 | 0,12 | 10,5 | 1,19 | 1,32 | 11,87 | 13,2 | 90 |
| SAF MI 2 | 4,6 | 2,6 | 0,17 | 10,9 | 1,37 | 1,47 | 12,65 | 14,1 | 90 |
| MATA | 4,7 | 1,1 | 0,13 | 12,7 | 1,61 | 1,33 | 14,47 | 15,8 | 92 |
| Camada 0,3-0,5 m | | | | | | | | | |
| CONSÓRCIO | 6,0 | 23,3 | 0,13 | 22,7 | 2,07 | 0,71 | 24,97 | 25,6 | 97 |
| SAF SO 1 | 5,0 | 17,6 | 0,17 | 17,5 | 3,10 | 1,95 | 20,87 | 22,8 | 87 |
| SAF MI 1 | 4,8 | 4,1 | 0,27 | 13,1 | 1,77 | 2,02 | 15,30 | 17,3 | 88 |
| SAF SO 2 | 4,7 | 3,9 | 0,17 | 12,3 | 1,67 | 1,4 | 14,32 | 15,7 | 91 |
| SAF MI 2 | 4,7 | 2,1 | 0,13 | 12,0 | 2,21 | 1,08 | 14,85 | 15,9 | 93 |
| MATA | 4,8 | 1,0 | 0,07 | 14,9 | 2,29 | 1,06 | 17,36 | 18,4 | 94 |

Fonte: Autor (2020). Médias de quatro repetições para: pH – Potencial hidrogeniônico (CaCl₂); P – Fósforo (Mehlich⁻¹), K – Potássio; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; H+Al – Acidez potencial; SB – Soma de bases; T – capacidade de troca catiônica; V – saturação por bases.

Durante a introdução de sistemas integrados em área de Caatinga, analisaram-se as concentrações obtidas nas camadas de 0-0,1 m e 0,1-0,2 m, comparando-as com o sistema agroflorestal consolidado (para módulos agrícola e pastoril), conforme Souza et al. (2017).

Em relação ao P, a referência das concentrações seriam: 0-0,1 m: 8,5 a 24,6 mg P dm⁻³ e 0,1-0,2 m: 4,5 a 11,7 mg P dm⁻³), cujos manejos de SAF MII e SAF SO1, para a camada de 0-0,1 m, e o SAF MII e o SAF SO2 para a camada 0,1-0,2 m, apresentaram concentrações próximas aos verificados em SAF tipo savana consolidado (Souza et al., 2017). Para K as concentrações de referência seriam: 0-0,1 m: 0,5 cmol_c dm⁻³ e 0,1-0,2 m: 0,35 a 0,39 cmol_c dm⁻³.

Assim, no presente trabalho, as concentrações estiveram próximas para o SAF MII para ambas as camadas (0-0,1 m e 0,1-0,2 m). Para o Ca, os manejos estiveram com concentrações abaixo do verificado em Souza et al. (2017), as quais foram superiores a 6,3 e 8,6 cmol_c dm⁻³ de Ca para 0-0,1 m e 0,1-0,2 m, respectivamente. Já para o Mg, 0-0,1 m: 1,8 cmol_c dm⁻³ e 0,1-0,2 m: 2,4 a 2,6 cmol_c dm⁻³. O SAF SO1 esteve próximo dos valores verificados por Souza et al. (2017), com valor de 1,7 cmol_c dm⁻³ na camada de 0-0,1 m.

Quando analisado o pH do solo, os manejos apresentaram valores menores que o do SAF tipo savana consolidado (Souza et al., 2017), que foram superiores a 6,1 (pH_{CaCl2}), exceto ao consórcio (Tabela 2). Ainda, a área exclusiva de produção de volumoso (consórcio) apresentaram concentrações maiores de P (0-0,1 m e 0,1-0,2 m) e Mg (0-0,1 m) que os intervalos verificados em Souza et al. (2017).

De maneira análoga para os atributos químicos do solo, quando analisado o valor de COT dos diferentes manejos (Tabela 3) e comparado com o intervalo de concentrações verificadas para o módulo agrícola e pastoril de SAF consolidado, tipo savana (COT 0-0,1m: 14-17 g kg⁻¹ e 0,1-0,2 m: 7,4-18 g kg⁻¹) (Souza et al., 2017), observa-se que o consórcio apresentou concentração dentro do intervalo, a mata nativa abaixo e os SAFs (SAF MII, SAF SO1, SAF MI2, SAF SO2) acima para a camada de 0-0,1 m. Porém, na camada de 0,1-0,2 m todos os manejos apresentaram valores de COT dentro do mesmo intervalo verificado em Souza et al. (2017).

Tabela 3. Caracterização do carbono orgânico total, substâncias húmicas, carbono orgânico particulado e carbono orgânico associado a minerais do solo em área de consórcio, de sistemas agroflorestais e de mata nativa

| Uso e Manejo | COT | COFAF | COFAH | HUM | rAH/AF | COP | COM | IMC |
|---------------------------|--------------------------------|-------|-------|------|------------------------------|------|-------|-----|
| | ----- g kg ⁻¹ ----- | | | | ---- g kg ⁻¹ ---- | | | |
| Camada 0 – 0,1 m | | | | | | | | |
| CONSÓRCIO | 15,2 | 3,3 | 1,3 | 10,9 | 0,44 | 1,29 | 13,95 | 108 |
| SAF SO 1 | 19,4 | 6,2 | 1,6 | 11,2 | 0,17 | 1,24 | 18,23 | 110 |
| SAF MI 1 | 21,3 | 8,2 | 2,3 | 10,9 | 0,27 | 1,29 | 20,09 | 114 |
| SAF SO 2 | 20,8 | 7,4 | 0,7 | 11,9 | 0,09 | 1,09 | 19,73 | 96 |
| SAF MI 2 | 19,0 | 6,5 | 1,1 | 10,5 | 0,18 | 1,00 | 18,05 | 88 |
| MATA | 12,9 | 3,0 | 1,3 | 8,6 | 0,94 | 1,10 | 11,80 | 100 |
| Camada 0,1 – 0,2 m | | | | | | | | |
| CONSÓRCIO | 11,3 | 2,0 | 1,7 | 8,4 | 0,82 | 1,31 | 10,02 | 95 |
| SAF SO 1 | 15,8 | 5,2 | 1,0 | 6,3 | 0,13 | 1,26 | 14,51 | 99 |
| SAF MI 1 | 12,6 | 3,0 | 2,8 | 6,8 | 1,09 | 1,08 | 11,51 | 85 |
| SAF SO 2 | 12,8 | 4,1 | 1,2 | 6,6 | 0,31 | 0,97 | 11,86 | 75 |
| SAF MI 2 | 12,0 | 3,4 | 1,4 | 6,6 | 0,49 | 1,12 | 10,89 | 89 |
| MATA | 10,2 | 2,9 | 0,9 | 6,3 | 0,54 | 1,22 | 8,99 | 100 |
| Camada 0,2 – 0,3 m | | | | | | | | |
| CONSÓRCIO | 8,6 | 1,8 | 0,7 | 6,6 | 0,45 | 1,28 | 7,29 | 119 |
| SAF SO 1 | 10,3 | 3,0 | 1,0 | 5,8 | 0,42 | 0,88 | 9,36 | 77 |
| SAF MI 1 | 9,5 | 2,9 | 2,0 | 4,6 | 0,87 | 1,00 | 8,47 | 148 |
| SAF SO 2 | 10,5 | 3,1 | 1,1 | 5,9 | 0,48 | 0,96 | 9,53 | 85 |
| SAF MI 2 | 10,7 | 2,5 | 0,6 | 6,9 | 0,22 | 0,90 | 9,81 | 78 |
| MATA | 9,7 | 2,7 | 0,6 | 6,3 | 0,38 | 1,11 | 8,53 | 100 |
| Camada 0,3 – 0,5 m | | | | | | | | |
| CONSÓRCIO | 6,8 | 0,9 | 0,7 | 5,2 | 0,68 | 1,13 | 5,66 | 101 |
| SAF SO 1 | 8,3 | 2,9 | 0,3 | 5,7 | 0,13 | 0,69 | 7,57 | 57 |
| SAF MI 1 | 8,0 | 2,4 | 1,1 | 4,5 | 0,48 | 0,97 | 7,03 | 83 |
| SAF SO 2 | 11,4 | 3,4 | 0,9 | 6,2 | 0,27 | 0,98 | 10,49 | 80 |
| SAF MI 2 | 11,4 | 3,3 | 0,7 | 5,8 | 0,19 | 0,72 | 8,13 | 61 |
| MATA | 6,3 | 1,4 | 0,2 | 4,7 | 0,16 | 1,10 | 5,13 | 100 |

Fonte: Autor (2020). Médias de quatro repetições para: Carbono orgânico total (COT), ácidos fúlvicos (CO_{FAF}), ácidos húmicos (CO_{FAH}) e huminas (HUM), Relação ácidos húmicos/ ácidos fúlvicos (rAH/AF), Carbono orgânico particulado (COP), Carbono orgânico associado a minerais (COM).

Nesse mesmo SAF do tipo savana referenciado para os atributos químicos do solo (Souza et al., 2017), em avaliação das concentrações das substâncias húmicas (ácidos fúlvicos e ácidos húmicos) (Moraes et al., 2011), e empregando o mesmo raciocínio, o intervalo de valor entre o módulo agrícola e pastoril para ácidos fúlvicos e húmicos, considerando duas camadas (0-0,06 e 0,06-0,12 m) foi de 2,2 - 2,3 e 3,5 - 4,0 g kg⁻¹, respectivamente. Assim, para ácidos fúlvicos na camada de 0-0,1 m (Tabela 3), todos os manejos apresentam valores superiores aos verificados para o SAF tipo savana (Moraes et al., 2011) e, para ácidos húmicos na camada de 0-0,1 m (Tabela 3), observa-se resultado oposto, ou seja, nenhum dos manejos estariam dentro do intervalo (Moraes et al., 2011). Outra análise que poderia ser realizada é a relação ácidos húmicos (AH) e ácidos fúlvicos (AF), que no trabalho de Moraes et al. (2011) foram superiores a 1,0 e, no presente estudo, todos os manejos apresentaram relação menor que 1,0, cujo acréscimo da razão AH/AF tende a promover melhoria na qualidade química do solo. Ainda, pode-se justificar pelo aporte recente de biomassa nos sistemas avaliados. Quanto à concentração de AF, esta é superior a do AH, o que pode indicar que as áreas apresentam C mais solúvel, haja vista que o AF é menos humificado que o AH.

Ademais, entre as frações das substâncias húmicas, a fração humina apresentou as maiores concentrações em todos os manejos (Tabela 3), e para o fracionamento físico, evidenciam-se maiores concentrações do C ligado a minerais em relação ao carbono particulado (Tabela 3).

Para o IMC, somente na camada superficial alguns manejos apresentaram valores superiores a 100, como o consórcio e os SAFs com maior entreenque (área agricultável). Contudo, em subsuperfície destaca-se o consórcio, com valores próximos ou superiores a referência (Tabela 3). Ainda, com relação ao fracionamento físico na camada superficial os maiores valores de COP estiveram associados aos manejos consórcio e SAFs com maior área agricultável, o que pode ser reflexo da deposição dos resíduos vegetais dos cultivos agrícolas/forageiras.

Com relação aos atributos microbiológicos (Tabela 4), os valores apresentados para carbono da biomassa microbiana estão coerentes com levantamento realizado por Balota (2017), que cita que áreas cultivadas apresentam concentrações entre 59 e 618 mg kg⁻¹ e para áreas de mata de 109 a 1147 mg kg⁻¹. Entretanto, as faixas mencionadas foram verificadas para o Estado do Paraná.

Tabela 4. Caracterização do carbono e nitrogênio da biomassa microbiana, respiração basal do solo e quociente metabólico e microbiano do solo em área de consórcio, de sistemas agroflorestais e de mata nativa

| Uso e Manejo | CBMS | NBMS | RBS | qCO ₂ | qMIC |
|--------------|--------------------------|-------|--------------------------------------|---|------|
| |mg kg ⁻¹ | | μg g ⁻¹ dia ⁻¹ | μg C-CO ₂ .g ⁻¹ CBMS.dia ⁻¹ | % |
| CONSÓRCIO | 590,7 | 6,4 | 30,1 | 0,1 | 4,32 |
| SAF SO 1 | 204,8 | 2,4 | 27,9 | 0,2 | 1,35 |
| SAF MI 1 | 196,8 | 2,5 | 24,2 | 0,1 | 0,91 |
| SAF SO 2 | 180,8 | 2,9 | 38,2 | 0,2 | 0,89 |
| SAF MI 2 | 345,2 | 4,0 | 37,2 | 0,1 | 1,79 |
| MATA | 142,8 | 2,5 | 38,3 | 0,3 | 1,12 |

Fonte: Autor (2020). Médias de quatro repetições para: Carbono da biomassa microbiana do solo (CBMS), Nitrogênio da biomassa microbiana do solo (NBMS), Respiração basal do solo (RBS), Quociente metabólico do solo (qCO₂) e Quociente microbiano (qMIC).

O quociente metabólico não tem um valor ideal, pois esta variável é uma medida baseada na relação entre a quantidade de CO₂ liberada por determinada unidade de biomassa microbiana (Balota, 2017). Assim, ambientes mais estáveis ou maduros tendem a apresentar menor qCO₂ e ambientes menos estáveis apresentariam um aumento no qCO₂ (Balota, 2017). Contudo, outro ponto que pode afetar esse quociente é a qualidade da comunidade microbiana, em células “novas” ou “velhas” dos sistemas, que mesmo em ambientes estáveis podem apresentar células “novas”, que metabolicamente são mais ativas, apresentando maior qCO₂ (Balota, 2017).

Com relação ao quociente microbiano, os valores estão coerentes com o verificado em outros trabalhos. Balota (2017) cita que áreas de plantio convencional têm apresentado valores de 0,7 a 3,19% e de plantio direto, de 1,4 a 4,3%.

A análise de componentes principais mostrou que os dois componentes selecionados explicaram 73,99; 72,74; 84,64 e 68,04% da variância total dos dados para as camadas de 0-0,1; 0,1-0,2; 0,2-0,3 e 0,3-0,5 m, respectivamente. Dessa maneira, o terceiro componente principal, mesmo apresentando autovalor maior que um, não foi empregado, pois a variância acumulada apresentou valores próximos ou superiores a 70%. Em relação à correlação entre as variáveis e os componentes principais, foram considerados relevantes os que apresentaram coeficientes de peso próximo ou maior que 0,3.

Tabela 5. Coeficientes de pesos (autovetores), autovalores e variância explicada por cada componente principal (CP1 e CP2) de atributos químicos e biológicos do solo em área de consórcio, de sistemas agroflorestais e de mata nativa

| Atributos | 0-0,1 m | | 0,1-0,2 m | | 0,2-0,3 m | | 0,3-0,5 m | |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| | CP1 | CP2 | CP1 | CP2 | CP1 | CP2 | CP1 | CP2 |
| CBMS | -0,21 | -0,26 | - | - | - | - | - | - |
| NBMS | -0,18 | -0,30 | - | - | - | - | - | - |
| RBS | 0,26 | -0,21 | - | - | - | - | - | - |
| qCO ₂ | 0,24 | 0,07 | - | - | - | - | - | - |
| qMIC | -0,21 | -0,28 | - | - | - | - | - | - |
| COT | 0,01 | 0,30 | 0,16 | 0,37 | 0,29 | -0,09 | 0,28 | 0,05 |
| FAF | -0,02 | 0,32 | 0,20 | 0,38 | 0,24 | -0,26 | 0,33 | 0,03 |
| FAH | -0,02 | 0,10 | 0,01 | 0,35 | 0,23 | 0,29 | 0,11 | 0,38 |
| HUM | -0,02 | -0,12 | -0,26 | 0,19 | -0,25 | -0,07 | 0,17 | -0,18 |
| rAH/AF | 0,02 | 0,13 | -0,12 | 0,35 | 0,16 | 0,39 | -0,20 | 0,30 |
| COP | -0,30 | 0,07 | -0,26 | -0,17 | 0,13 | 0,41 | -0,20 | 0,39 |
| COM | -0,02 | 0,27 | 0,09 | -0,39 | 0,30 | 0,11 | 0,29 | 0,01 |
| IMC | -0,24 | 0,17 | -0,14 | -0,17 | 0,06 | 0,43 | -0,23 | 0,35 |
| pH | -0,30 | -0,10 | -0,32 | -0,04 | -0,23 | 0,31 | -0,31 | 0,01 |
| P | -0,27 | -0,20 | -0,35 | -0,02 | -0,26 | 0,24 | -0,23 | -0,20 |
| K | -0,24 | 0,16 | -0,03 | 0,02 | 0,22 | 0,30 | 0,14 | 0,13 |
| Ca | -0,26 | 0,21 | -0,34 | -0,13 | -0,28 | 0,13 | -0,32 | 0,11 |
| Mg | -0,30 | 0,03 | -0,25 | -0,27 | -0,22 | 0,09 | -0,06 | -0,51 |
| Hal | 0,05 | 0,36 | 0,25 | -0,27 | 0,22 | 0,05 | 0,20 | -0,12 |
| SB | -0,27 | 0,20 | -0,34 | -0,14 | -0,28 | 0,13 | -0,31 | -0,17 |
| T | -0,26 | 0,22 | -0,33 | -0,16 | -0,27 | 0,14 | -0,30 | -0,20 |
| V | -0,28 | -0,12 | -0,29 | -0,06 | -0,32 | -0,04 | -0,23 | 0,18 |
| Autovalores | 9,55 | 6,72 | 7,94 | 4,41 | 9,84 | 4,54 | 8,05 | 3,51 |
| Variância total (%) | 43,43 | 30,55 | 46,74 | 25,99 | 7,90,32 | 26,74 | 47,36 | 20,67 |
| Variância acumulada (%) | 43,43 | 74,99 | 46,74 | 72,74 | 57,90 | 84,64 | 47,35 | 68,04 |

Fonte: Autor (2020). Carbono da biomassa microbiana do solo – (CBMS), Nitrogênio da biomassa microbiana do solo – (NBMS), Respiração basal do solo – (RBS), Quociente metabólico do solo – (qCO₂), Quociente microbiano do solo – (qMIC), Carbono orgânico total – (COT), ácidos fúlvicos – (COFAF), ácidos húmicos – (COFAH) e huminas – (HUM), relação ácidos húmicos/fúlvicos – (rAHF), Carbono orgânico particulado – (COP), Carbono orgânico mineralizável – (COM), pH – Potencial hidrogeniônico (CaCl₂); P – Fósforo (Mehlich-1), K – Potássio; Ca – Cálcio; Mg – Magnésio; H+Al – Acidez potencial; SB – Soma de bases; T – capacidade de troca catiônica a pH 7; V – saturação por bases.

Analisando os componentes principais na camada superficial (0-0,1 m), a área de consórcio correlacionou-se positivamente ao nitrogênio da biomassa microbiana, quociente microbiano, pH, magnésio e saturação por bases (valores negativos para os escores de CP1 e CP2) (Figura 2A). Os sistemas agroflorestais com 66% da área com agricultura, independentemente de ser milho ou sorgo (SAF MI1 ou SAF SO1), estiveram associados às maiores concentrações de acidez potencial, carbono orgânico total e fração de ácidos fúlvicos (Figura 2A).

Na camada de 0,1-0,2 m, o consórcio correlacionou-se positivamente a maiores concentrações de pH, P, Ca, SB, T e V (Figura 2B); o SAF SO1 correlacionou-se positivamente ao carbono orgânico total, carbono associado a minerais e ácidos fúlvicos; e os demais manejos (SAF MI1, SAF SO2, SAF MI2 e mata) estiveram atrelados à fração ácidos húmicos e a relação ácidos húmicos e ácidos fúlvicos (Figura 2B).

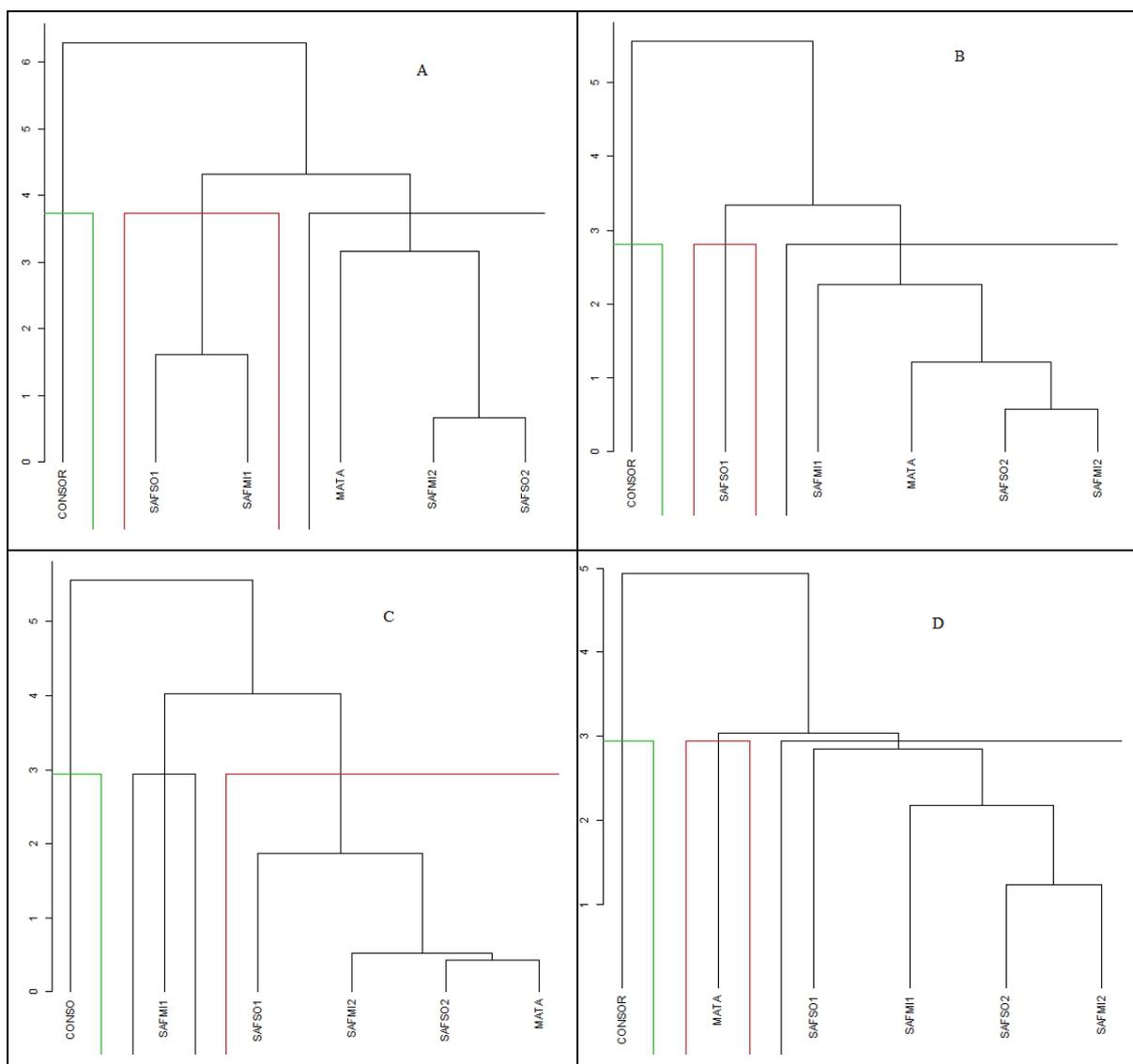
Para a camada de 0,2-0,3 m, novamente o consórcio esteve associado positivamente aos atributos químicos, com destaque para pH, Ca, SB e V (Figura 2C); o SAF MI1 esteve correlacionado positivamente a frações de ácidos húmicos, relação ácidos húmicos e ácidos fúlvicos, carbono particulado, índice de manejo de carbono e K (Figura 2C). Na camada de 0,3-0,5 m, o consórcio esteve positivamente correlacionado com os atributos químicos do solo (pH, Ca, Mg, SB e T) e com a relação ácidos húmicos e ácidos fúlvicos e o IMC (Figura 2D), os sistemas agroflorestais estiveram associados ao COT, FAF, FAH e COM (Figura 2D).

A análise de agrupamento evidencia a dissimilaridade entre os sistemas de uso do solo a partir da análise conjunta das variáveis de solo (Figura 3). Analisando-se o dendrograma para a camada de 0-0,1 m, houve a formação de três grupos, sendo um da área do consórcio, outro com os dois sistemas agroflorestais com 66% da área cultivada (SAF MI1 e SAF SO1) e o último grupo foi formado para mata e os SAFs com 33% da área empregada para cultivos agrícolas e forrageiras (SAF MI2 e SAF SO2) (Figura 3A).

Na camada de 0,1-0,2 m também houve a formação de três grupos, sendo um grupo do consórcio, outro do SAF com 66% da área ocupada com cultivo de sorgo (SAF SO1) e o terceiro grupo é formado pelos demais SAFs e a mata nativa de Caatinga (Figura 3B). A camada de 0,2-0,3 m apresentou resultado similar à camada de solo anterior, ou seja, sendo que o SAF, com 66% da área ocupada com cultivo de sorgo, é substituído pelo milho (SAF MI1) (Figura 3C). A camada de 0,3-0,5 m apresentou um grupo formado pela área de consórcio, outro grupo a área de mata nativa e o terceiro grupo formado por todos os SAFs (Figura 3D).

Esse resultado sugere que a área de consórcio apresenta atributos de solo distintos das áreas de SAFs e mata para todas as camadas avaliadas. Entretanto, para a camada superficial, verificam-se alterações dos atributos dos SAFs conduzidos com maior área de cultivo (66%) (SAF MI1 e SAF SO1) em relação aos SAFs com 33% de área destinada para agricultura (SAF MI2 e SAF SO2), os quais apresentam similaridade com a área de mata.

Figura 3. Dendrograma de dissimilaridade entre atributos do solo em área de consórcio, mata nativa e sistemas agroflorestais, para a camada de 0-0,1 m (A), 0,1-0,2 (B), 0,2-0,3 (C) e 0,3-0,5 m (D)



Fonte: Autor (2020). Área de consórcio – (CONSOR), Sistema agroflorestal com Milheto cultivado em 66% da área total (SAF MI 1) Sistema agroflorestal com Sorgo cultivado em 66% da área total (SAF SO 1), Sistema agroflorestal com Milheto cultivado em 33% da área total (SAF MI 2), Sistema agroflorestal com Sorgo cultivado em 33% da área total (SAF MI 2) e Mata Nativa (MATA).

As informações dos componentes principais (Figura 2) associadas aos dendrogramas (Figura 3) permitem diferenciar o consórcio dos demais manejos por apresentar maiores valores para os atributos químicos do solo e especificamente na camada superficial (0-0,1 m) para NBM e qMIC. Ainda, em camadas abaixo da superficial, destaca-se, também, pela fertilidade do solo em relação aos SAFs e mata nativa; os SAFs com maiores áreas agricultáveis diferenciam-se dos demais SAFs (SAF SO2 e SAF MI2) e mata.

Com relação aos teores de C e suas frações nas camadas 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m para SAF SO1 (COT, COM e FAF) e SAF MI1 (AH, rAH/AF, COP e IMC), respectivamente, e na última camada (0,3-0,5) observa-se que os SAFs (SAF SO1, SAF MI1, SAF SO2 e SAF MI2) diferenciaram-se da área de mata por apresentarem maiores teores de C e de suas frações (COT, FAF, FAH e COM).

Como a área de consórcio apresentou, de maneira geral, maiores concentrações para os atributos químicos (pH, P e V) e biológicos (CBM, NBM e qCO_2) do solo, sendo que estes indicadores os diferenciaram dos demais manejos, conforme a análise de componentes principais, principalmente na camada superficial.

A área de consórcio destinada apenas para produção de volumoso (para silagem), não sendo pastejada ou manejada com uso de fogo, fornece um excedente de massa vegetal que fica sob o solo. Assim, toda a cobertura vegetal advinda do rebrote pós-corte e restos de cultura e palhadas foram incorporadas durante o preparo do solo. A aplicação do esterco caprino e ovino pode ter contribuído com melhoria dos atributos químicos (Freitas et al., 2012; Souto et al., 2013), os quais auxiliam como suprimentos de nutrientes, liberados de forma gradativa para o solo (Souto et al., 2013). Aproximadamente 80% das pastagens no Brasil apresentam algum grau de degradação, refletindo em menor cobertura do solo, deixando-o susceptível à erosão e lixiviação dos nutrientes.

Desse modo, sistemas de manejo do solo/pastagem, que geram excedentes de material vegetal para deixá-los como cobertura do solo, vêm sendo adotados em diversos sistemas com Integração-Lavoura-Pecuária-Floresta-ILPF, Sistema de plantio direto-SPD, Sistema Santa Fé, entre outros (Cordeiro et al., 2015).

O aumento do pH melhorou a disponibilidade do P no solo nas camadas 0-0,1 e 0,1-0,2 m, sendo que a liberação do fósforo é otimizada em pH mais elevado, em razão da presença de ânions hidroxilas que realizam hidrólise dos compostos P-Al e P-Fe (Silva and Raij, 1999). Da mesma forma, o aumento do pH contribuiu para elevação das quantidades de bases trocáveis (K, Ca e Mg) e, conseqüentemente, a soma (SB) saturação (V%) por bases (Ronquim, 2010). Assim, com relação ao cátion básico potássio, este esteve correlacionado positivamente às áreas de SAF MI1 (0,2-0,3 m), as quais apresentaram as maiores concentrações em termos absolutos em todas as camadas (Tabela 2). Outra justificativa para a superioridade do K neste sistema, é que os materiais provenientes da abertura da área foram triturados e posteriormente incorporados (nos SAFs com maior área agricultável). Com isso, considerando que este macronutriente é facilmente lixiviado da estrutura vegetal, poderia ter contribuído para a superioridade verificada nessa área.

O declínio ou acúmulo de C, nas frações da MOS, permitem a mensuração do grau de preservação dos ecossistemas e o impacto causado pela agricultura (Reddy et al., 2017).

Nesse sentido, verifica-se o efeito positivo dos SAFs que se diferenciaram da área de consórcio por apresentar maiores valores de C, o que pode ser justificado também pela presença do componente arbóreo.

Uma outra característica a ser abordada é a fotodegradação da forragem em função da maior área sem cobertura florestal, apontada como importante mecanismo de decomposição de materiais vegetais em ambientes semiáridos e áridos (Austin and Vivanco, 2006).

De maneira geral, todas as camadas da mata nativa apresentaram menores valores de pH, P, K, Ca e Mg (Figura 2), o que pode ser justificado pela ausência de movimentação do solo e adubação que foram realizadas nas áreas de SAFs e consórcio.

As concentrações de Ca e Mg apresentaram superioridades, principalmente, na camada superficial (0-0,1 m), para os manejos consórcio, o que pode ser justificado pela aplicação de esterco orgânico. De maneira geral, os SAFs apresentaram maiores quantidades de C e suas frações em relação às áreas de consórcio e mata.

Assim, pode-se sintetizar que o fracionamento químico do carbono foi eficiente em diferenciar possíveis ganhos pela introdução do sistema agroflorestal, a partir de uma área de mata nativa, independentemente da dimensão da faixa com agricultura em detrimento das áreas de mata nativa e consórcio.

Em sistemas agroflorestais, a diversificação da vegetação e ausência/redução de perturbações no solo promovem o acréscimo de matéria orgânica e, conseqüentemente, carbono orgânico.

Em estudos conduzidos por Batista (2017) avaliando dois sistemas agroflorestais de diferentes idades de implantação e área de agricultura convencional no semiárido, observou-se que os valores de COT foram superiores em SAFs, mesmo recém implantados, quando comparados ao cultivo tradicional, indicando que esse sistema de uso e manejo tem o potencial de estocar uma maior quantidade de carbono no solo já no início de sua implantação.

O maior valor de substâncias húmicas observadas nas áreas sob sistemas agroflorestais, provavelmente é devido ao aporte de material vegetal diversificado, oriundo do cultivo consorciado de culturas entre gramíneas e leguminosa, somadas aos restos adicionados ao solo e ao material orgânico presente nas faixas de vegetação nativa (Cunha et al., 2011; Baldotto e Baldotto, 2014).

Uma relação que merece destaque são as concentrações de COM e COT, bastantes positivas nas profundidades avaliadas indicando que, nas condições edafoclimáticas estudadas, que o acúmulo de COT depende do incremento de COM, sendo portanto possível inferir que a estabilização da MOS é fundamental para o aumento dos teores de COT (Lima et al., 2016).

A área sob consórcio esteve associada a maiores concentrações de nitrogênio microbiano (NBMS) e quociente microbiano (qMIC) em relação aos demais manejos (Figura 2A). Microrganismos endêmicos das regiões secas podem apresentar alta atividade com baixa umidade (Manzoni et al., 2012), corroborando com os resultados apresentados aqui, tendo em vista que a coleta do solo foi feita em época chuvosa.

Maiores relações C/N, celulose/N e lignina/N e polifenóis (tanino) das serapilheiras de espécies da Caatinga e a deficiência generalizada desse nutriente em solos da região semiárida reduzem a atividade microbiana (Aita e Giacomin, 2003), dificultando a decomposição da serapilheira (Freire et al., 2010). Quando esta relação C/N é baixa, a decomposição da serapilheira será mais rápida. O cultivo em consórcio de plantas forrageiras, sobretudo leguminosas, melhora a ciclagem de nutrientes, aumentando os teores de N no solo, potencializando a decomposição da serapilheira (Freitas et al., 2013). Isso ajuda a explicar as variações entre os sistemas, sabendo-se que o material incorporado no SAF é semelhante ao apresentado na mata nativa.

CONCLUSÕES

A área de consórcio para produção de volumoso apresenta maiores concentrações para os atributos químicos e biológicos do solo na camada superficial.

Os sistemas agroflorestais com renques de mata nativa apresentam maiores concentrações para carbono orgânico e suas frações que a área de consórcio e mata nativa de Caatinga.

Os sistemas agroflorestais com menor área agricultável (33% da área) apresentam características semelhantes para fracionamento do C, atributos químicos e biológicos do solo da mata nativa de Caatinga.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alef K. Soil Respiration. *Methods in Soil Microbiology and Biochemistry*. San Diego: 1995. p. 214-5.
- Alves MS da S. Uso de indicadores biológicos para avaliação da qualidade do solo sob cultivo de culturas agroenergéticas em Pedro Afonso, Tocantins. Universidade Federal do Tocantins; 2014.
- Araújo Filho JA de, Silva NL da, França FMC, Campanha MM, Sousa Neto JM de. Sistema de produção agrossilvipastoril no semiárido do Ceará Cartilhas Temáticas Tecnologias e Práticas Hidroambientais para Convivência com o Semiárido. Fortaleza: 2010
- Asmar Junior J. Utilização dos atributos químicos como indicadores da qualidade do solo na bacia hidrográfica do rio das Almas na região de Goianésia , Estado de Goiás. UniEvangélica; 2019.
- Austin AT, Vivanco L. Plant litter decomposition in a semi-arid ecosystem controlled by photodegradation. *Nature*. 2006;442:555-8. <https://doi.org/10.1038/nature05038>
- Azevedo W dos SL, Perez-Marin AM, Ferreira TC. Opuntia sp., Fertilidade e sazonalidade climática podem influenciar a microbiologia do solo em área de SAF? *J Biol*. 2019;15:373-86
- Baldotto MA, Baldotto LEB. Ácidos Húmicos. *Rev Ceres*. 2014;61:856-81. <https://doi.org/10.1590/0034-737X201461000011>
- Batista MC. Estoque de carbono e frações da matéria orgânica em áreas sob sistemas agroflorestais e agricultura no agreste paraibano. Universidade Federal da Paraíba; 2017.
- Benites VM, Madar B, Machado PLOD a. Extração e Fracionamento Quantitativo de Substâncias Húmicas do Solo: um Procedimento Simplificado de Baixo Custo. *Comun Técnico*. 2003;16:1-7
- Cordeiro LAM, Vilela L, Kluthcouski J, Marchão RL. Integração lavoura-pecuária-floresta : o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: Coleção 500 Perguntas, 500 Respostas; 2015
- Corrêa MF, Navroski R, Gomes AD, Gazzolla Neto A, Nadal AP, Flores JHN, Vergara R de O, Gadotti GI, Schuch LOB. Spatial Variability of Chemical and Agronomic Attributes of Soil Trigo Spatial Variability of Chemical and Agronomic Attributes of Soil in. *Sci Agrar Parana*. 2017;16:500-9. <https://doi.org/10.18188/1983-1471/sap.v16n4p500-509>
- Don A, Schumacher J, Freibauer A. Impact of tropical land-use change on soil organic

- carbon stocks - a meta-analysis. *Glob Chang Biol.* 2010;17:1658-70.
<https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2010.02336.x>
- Duarte JS de S, Caracristi I. Clima e qualidade de vida na cidade de Sobral: Buscando a dimensão cotidiana dos estudos climáticos. *Rev Da Casa Da Geogr Sobral.* 2005;6:2
- Freire J de L, Dubeux Júnior JCB, Lira M de A, Ferreira RLC, Santos MV dos F, Freitas EV de. Deposição e composição química de serrapilheira em um bosque de sabiá. *Rev Bras Zootec.* 2010;39:1650-8. <https://doi.org/10.1590/S1516-35982010000800005>
- Freire NCF, Moura DC, Silva JB da, Moura ASS de M, Pacheco JIM de, Penha A da. Atlas of the caatingas. The only biome exclusively Brazilian. 2018
- Freitas ECS de, Neto SN de O, Fonseca DM da, Santos MV, Leite HG, Machado VD. Deposição de serrapilheira e de nutrientes no solo em sistema agrossilvipastoril com eucalipto e acácia. *Rev Arvore.* 2013;37:409-17. <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000300004>
- Freitas M, Araújo C, Silva D. Decomposição e liberação de nutrientes de esterco em função da profundidade e do tempo de incorporação. *Rev Semiárido Visu.* 2012;2:150-61
- IPECE. PERFIL BÁSICO MUNICIPAL. 2006
- Lazzaretti G, Matsuoka M, Ivana B, Paveglio SS, ShalleMBERGER, Juliana Barden Somavilla L. Impacto de diferentes sistemas agrícolas e florestal na qualidade química e biológica do solo de uma propriedade rural. *J Chem Inf Model.* 2019;53:1689-99.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Leite CLF, Mendonça SE, Machado APLO, Matos SE. Total C and N storage and organic C pools of a Red-Yellow Podzolic under conventional and no tillage at the Atlantic Forest Zone, south-eastern Brazil. *Soil Res.* 2003;41:717-30
- Lima CEP, Fontenelle MR, Madeira NR, da Silva J, Guedes ÍMR, Silva LRB, Soares DC. Compartimentos de carbono orgânico em Latossolo cultivado com hortaliças sob diferentes manejos. *Pesqui Agropecu Bras.* 2016;51:378-87. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000400011>
- Manzoni S, Schimel JP, Porporato A. Responses of soil microbial communities to water stress: Results from a meta-analysis. *Ecology.* 2012;93:930-8. <https://doi.org/10.1890/11-0026.1>
- Medeiros A de S, Malta Ferreira Maia S, dos Santos TC, de Araújo Gomes TC. Soil carbon losses in conventional farming systems due to land-use change in the Brazilian semi-arid region. *Agric Ecosyst Environ.* 2020;287:106690.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106690>

- Miranda PHC de. Atributos biológicos como indicadores de qualidade do solo em diferentes coberturas do solo na agricultura familiar. UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA; 2019. . <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Moraes GM de, Silva Xavier FA da, Sá Mendonça E de, Araújo Filho JA de, Oliveira TS de. Chemical and structural characterization of soil humic substances under agroforestry and conventional systems. *Rev Bras Cienc Do Solo*. 2011;35:1597-608. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832011000500014>
- Mota LH da S de O, Valladares GS. Vulnerabilidade à degradação dos solos da Bacia do Acaraú, Ceará. *Rev Ciência Agronômica*. 2011;42:39-50
- Pereira Filho JM, Silva AM de A, César MF. Manejo da caatinga para produção de caprinos e ovinos. *Rev Bras Saúde e Prod Anim*. 2013;14:77-90. <https://doi.org/10.1590/S1519-99402013000100010>
- Pompeu RCF, Souza HA de, Farias JL de S, Bezerra JWT, Fernandes FÉP, Pereira PL, Riella J. Produção de biomassa, composição química e atributos químicos do solo do consórcio milho-leguminosas forrageiras na comunidade Boqueirão, Sobral, CE. *Bol Pesqui e Desenvolv / Embrapa Caprinos e Ovinos*. 2019:20
- de Queiroz Cunha E, Stone LF, Moreira JAA, de Brito Ferreira EP, Didonet AD, Leandro WM. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. i - atributos físicos do solo. *Rev Bras Cienc Do Solo*. 2011;35:589-602. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832011000200028>
- R Team C. R: A language and environment for statistical computing. 2017
- Reddy DD, Blaise D, Kumrawat B, Singh AK. Evaluation of Integrated Nutrient Management Interventions for Cotton (*Gossypium hirsutum*) on a Vertisol in Central India. *Commun Soil Sci Plant Anal*. 2017;48:469-75. <https://doi.org/10.1080/00103624.2017.1282508>
- Ronquim CC. Conceitos de fertilidade do solo e manejo adequado para as regiões tropicais. *Embrapa Monit Por Satélite Bol Pesqui e Desenvolv*. 2010:26
- Salomão PEA. A importância do sistema de plantio direto na palha para reestruturação do solo e restauração da matéria orgânica. *J Chem Inf Model*. 2019;53:1689-99. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Sampaio EVSB, Salcedo IH, Silva FBR. Fertilidade de Solos do Semi-Árido do Nordeste. *Fertilizantes: insumo básico para agricultura e combate à fome*. Petrolina: Embrapa/SBCS; 1995. p. 51-71.
- Silva C da Si, Raj B Van. Disponibilidade de Fósforo em solos avaliada por diferentes

extratores. *Rev Agropecuária Bras.* 1999;34:267-88

Silva EE da, Azevedo PHS De, De-Polli H. Determinação da respiração basal (RBS) e quociente metabólico do solo (qCO₂). *Comun Técnico EMBRAPA.* 2007;99:1-4

Silva RL, De Maria IC. Erosão em sistema plantio direto : Influência do comprimento de rampa e da direção de semeadura 1 Erosion in no-tillage system : Influence of ramp length and seeding direction. *Rev Bras Eng Agrícola e Ambient.* 2011;15:554-61.

<https://doi.org/10.1590/S1415-43662011000600003>

Souto PC, Souto JS, Nascimento JAM do. Liberação de nutrientes de esterco em luvisolo no semiárido- do paraibano. *Rev Caatinga.* 2013;26:69-78

Souza BI de, Artigas RC, Lima ERV de. Caatinga e Desertificação. *Mercator.*

2015;14:131-50. <https://doi.org/10.4215/RM2015.1401.0009>

Swift RS. Organic Matter Characterization. *Soil Sci Am Soc Agron.* 1996;03:1011

Teixeira PC, Donagemma GK, Ademir F, Teixeira WG. Manual de métodos de análises. 3. ed. Brasília, DF: 2017

CAPÍTULO II

ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO DE SISTEMAS INTEGRADOS EM CAMBISSOLO NO SEMIÁRIDO

RESUMO: Os sistemas integrados de produção agropecuária possuem potencial para incrementar a matéria orgânica do solo, com reflexos nas concentrações de carbono e de nitrogênio no solo. Assim, o objetivo desse trabalho mensurar os estoques de carbono e nitrogênio na conversão de mata nativa de vegetação de Caatinga em sistemas agroflorestais em Cambissolo em região Semiárida. O estudo foi realizado em Sobral, CE, em Cambissolo Háplico. Os manejos avaliados foram: (1) Área de consórcio para produção de volumoso, cultivada com milho e capim massai; (2) mata nativa (Caatinga); (3) SAF1: sistema agroflorestal com renques de espécies florestais lenhosas nativas ocupando 33% da área e parcela agrícola ocupando 66% da área e (4) SAF2: sistema agroflorestal apresentando proporções inversas do SAF1. Todos os sistemas agroflorestais foram consorciados com sorgo ou milho, feijão guandu e capim massai e o renque era composto por fragmentos de Caatinga nativa. Amostras de solo foram coletadas nas camadas 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40, 0,4-0,6 e 0,6-1,0 m para análise de carbono (C), nitrogênio (N), densidade e cálculos de estoque de C e N, além da relação C/N do solo. De posse dos dados, empregou-se a análise de componentes principais e análise de agrupamento. A área de Consórcio proporciona maiores concentrações e estoques de C na camada superficial (0-0,1 m), sendo que, a partir desta camada, os sistemas agroflorestais apresentaram maiores concentrações e estoques de C até 1,0 m. A menor relação C/N esteve associada à área de consórcio, justificada pelas maiores concentrações e estoques de N. Para o estoque de C acumulado até 1,0 m de profundidade destaca-se o SAF2. Os sistemas agroflorestais apresentam-se como alternativas de incremento de C em áreas de conversão de mata nativa de vegetação de Caatinga.

Palavras-chave: Qualidade do solo, matéria orgânica, ILPF

ABSTRACT: The integrated systems of agricultural production have potential to increase the organic matter of the soil, with reflexes on the carbon and nitrogen concentrations in the soil. The objective of this work was to measure the carbon and nitrogen stocks in the conversion of native forest of Caatinga vegetation into agroforestry systems in Inceptisol in a semi-arid region. The study was conducted in Sobral, CE, in Inceptisol. The managements evaluated were: (1) Consortium area for volume production, cultivated with corn and massai grass; (2) native forest (Caatinga); (3) SAF1: agroforestry system with native woody forest species branches occupying 33% of the area and agricultural plot occupying 66% of the area and (4) SAF2: agroforestry system presenting inverse proportions of SAF1. All agroforestry systems were intercropped with sorghum or millet, guandu bean, and massai grass, and the reedbed was composed of fragments of native Caatinga. Soil samples were collected in the layers 0-0.10; 0.10-0.20; 0.20-0.40, 0.4-0.6 and 0.6-1.0 m for analysis of carbon (C), nitrogen (N), density and C and N stock calculations, in addition to the soil C/N ratio. In possession of the data, principal component analysis and cluster analysis were employed. The Consortium area provided higher concentrations and stocks of C in the superficial layer (0-0.1 m), and from this layer on, the agroforestry systems presented higher concentrations and stocks of C up to 1.0 m. The lowest C/N ratio was associated with the area of intercropping, justified by the highest concentrations and stocks of N. For the accumulated C stock up to 1.0 m depth, SAF2 stands out. The agroforestry systems are presented as alternatives of increment of C in areas of conversion of native forest of Caatinga vegetation.

Keyword: Soil quality, organic matter, CLFI

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

| | |
|-----------------|--------------------------------------|
| ACP | Análise de componentes principais |
| C/N | Relação carbono/ nitrogênio |
| CO ₂ | Dióxido de carbono |
| COP | Carbono orgânico particulado |
| COT | Carbono orgânico total |
| Ds | Densidade |
| EstC | Estoque de Carbono |
| EstN | Estoque de Nitrogênio |
| ILPF | Integração lavoura-Pecuária-Floresta |
| MO | Matéria orgânica |
| MO | Matéria orgânica do solo |
| NT | Nitrogênio total |
| SAF | Sistema agroflorestal |
| TFSA | Terra fina seca ao ar |
| UVA | Universidade Estadual Vale do Acaraú |

INTRODUÇÃO

As regiões áridas e semiáridas cobrem mais de 30% da superfície terrestre. Em estudos com sistemas eficientes em sequestrar carbono nessas condições são de extrema importância, pois proporcionam maior armazenamento de C no solo, minimizando as concentrações de dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. Uma das alternativas é o cultivo de árvores, que é amplamente discutido dentro da estrutura do Protocolo de Kyoto por seu potencial de mitigador na emissão de CO₂ (Shi et al., 2019).

As mudanças no uso do solo, provenientes da remoção das florestas para fins agrícolas, podem impactar significativamente nas emissões de gases do efeito estufa e na redução dos estoques de carbono do solo (Santana et al., 2019). Isso ocorre em função da quantidade e qualidade e da matéria orgânica que é diretamente proporcional à disponibilização de nutrientes, manutenção da microbiota e às características físicas do solo (Oliveira et al., 2019).

A perda de carbono orgânico do solo varia de 3 a 9% em pastagens degradadas em regiões tropicais. No semiárido brasileiro essa redução é de 12 a 27% em virtude de manejo inadequado e condições edafoclimáticas (Medeiros et al., 2021). Sistemas integrados em regiões semiáridas possuem maiores estoques de C orgânico, quando comparadas aos outros sistemas de uso do solo (Sacramento et al., 2013).

A exploração agrícola dos solos do bioma Caatinga é caracterizada por práticas de corte e queima da vegetação e quando a finalidade é o pastejo, comumente ocorre o superpastejo, reduzindo a fertilidade natural do solo. Outro agravante do superpastejo é a redução da ciclagem de nutrientes, visto que no período seco os animais consomem parte da serrapilheira, impedindo o acúmulo de matéria orgânica (MO) e acelerando o processo de degradação. Essas condições diminuem a capacidade do solo em disponibilizar nutrientes a pastagem, reduzindo o aporte de material orgânico no solo e aumentando os processos de degradação e compactação, levando o agricultor a abrir novas áreas (Araújo Filho, 2013; Schulz et al., 2016).

Assim, muitas áreas do bioma Caatinga estão severamente degradadas ou mesmo desertificadas, devido ao desmatamento como resultado de atividades antrópicas (Sá e Angelotti, 2009). Como os solos de Caatinga geralmente possuem baixos teores de carbono, a produtividade agrícola sustentável e de segurança alimentar dependem de medidas eficientes de conservação do solo (Schulz et al., 2016). Dessa forma, práticas

conservacionistas de manejo podem aumentar o conteúdo de matéria orgânica do solo, auxiliando positivamente nos aportes de carbono e nitrogênio no solo (Wells et al., 2019), agindo também na redução dos níveis de CO₂ atmosféricos (Gao et al., 2017).

Posto isto, os sistemas integrados de produção agropecuária possuem características que possibilitam o aumento da entrada de biomassa com diferentes características no solo, pois esses sistemas são compostos por florestais lenhosas perenes associadas com espécies vegetais herbáceas, arbustivas, lavouras e forrageiras manejadas em uma mesma área, segundo arranjos espaciais e temporais, com alta diversidade de espécies e interações entre esses componentes (Miccolis et al., 2019), o que permite maximização de uso do solo, em função da produção simultânea de alimentos, forragens e madeira, aumentando o rendimento por área (Korwar et al., 2014).

A mineralização do carbono orgânico do solo é diretamente ligada aos microrganismos do solo que são bastante sensíveis à mudança de umidade. Estudos simulando condições intensas de seca e chuvas usando modelagem demonstraram uma maior sensibilidade nos microrganismos em períodos de seca do que em períodos chuvosos (Liang et al., 2021). A elevação de C e N no solo, aumento da umidade e diminuição da temperatura do solo promovem um ambiente favorável ao desenvolvimento dos microrganismos do solo, que elevam as taxas de mineralização da matéria orgânica. (Oliveira et al., 2014; Martins et al., 2018).

Com base nessas considerações, objetivou-se com esse trabalho mensurar os estoques de carbono e nitrogênio na conversão de mata nativa de vegetação de Caatinga em sistemas integrados de produção agropecuária em Cambissolo em região Semiárida.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi realizado em sistema agroflorestral da Embrapa Caprinos e Ovinos, no município de Sobral, CE (3° 44' 53.642" S, 40° 21' 46.231" W). O clima da região é quente e semiárido, BSh segundo a classificação climática Köppen com 7-8 meses de deficiência hídrica (Duarte e Caracristi, 2005). A região tem uma temperatura média anual entre 26-28 °C, regime pluviométrico médio de 821,6 mm/ano (Funceme, 2019) e altitude média de 81 m. O solo da área em estudo é classificado como CAMBISSOLO HÁPLICO Ta Eutrófico típico, A moderado, textura média, com sua classificação textural de fraco-arenoso a fraco-argilo-arenoso.

Histórico das áreas de estudo

Descrição dos manejos das áreas avaliadas:

01 - *Consórcio*: Área de consórcio aberta entre 2016 e 2017, que se destina exclusivamente ao cultivo de forragem (milho ou sorgo) consorciado com capim massai, cuja finalidade é de produção de silagem e colhida mecanicamente. Os materiais resultantes das rebrotas não foram pastejados, sendo deixados como cobertura do solo e incorporados com arado e grade no ano seguinte. O solo foi preparado com aração e gradagem e cultivado no seu primeiro ano (2017) com sorgo forrageiro (espaçamento de 0,9 m entre linhas e 15 sementes por metro linear), com 2 kg ha⁻¹ de sementes de capim massai semeadas a lanço nas entrelinhas de plantio. As adubações realizadas foram: 200 kg ha⁻¹ de NPK (8-28-16) (na fundação) e 50 kg N ha⁻¹ com ureia na cobertura e orgânica com esterco caprino e ovino (7 Mg ha⁻¹). No ano seguinte (2018), a área foi cultivada com milho no espaçamento de 0,9 x 0,2 m, consorciado com capim massai (*Megathyrus maximus* cv. Massai) (2 kg ha⁻¹), semeado a lanço nas entrelinhas e foi aplicado 300 kg ha⁻¹ de NPK (8-28-16) no plantio e na cobertura foi usado 50 kg ha⁻¹ de N (ureia) e 20 kg ha⁻¹ de K₂O (KCl).

02 - *Mata nativa (Caatinga)*: Área de mata nativa do bioma Caatinga, com presença de espécies arbustivas e arbóreas hiperxerófilas, caracterizada por plantas adaptadas à escassez de água (7 a 8 meses), caducifólias, de menor porte e alguns indivíduos apresentam espinhos. Não há histórico de cultivo ou extração de madeira na área desde a década de 1980, sendo utilizada ocasionalmente para pastejo animal moderado. As espécies florestais mais frequentes: pau branco (*Auxemma oncocalyx*), marmeleiro (*Croton sonderianus*), jurema preta (*Mimosa tenuiflora*), sabiá (*Mimosa caesalpinifolia*), juazeiro (*Ziziphus joazeiro*), umburana (*Amburana cearenses*) e catingueira (*Caesalpinia pyramidalis*).

03 - *SAF 1*: Sistema agroflorestal raleado em faixas, aberto no final do ano de 2017, composto por faixas de vegetação florestal lenhosas nativas (renque) com 10 m de largura e uma faixa agricultável, com supressão total da vegetação, (entrerenque) com 20 m de largura e comprimento variando entre 220 a 240 m. Após a retirada da madeira de interesse comercial, o restante do material (equivalente a 19 Mg ha⁻¹ de material vegetal) foi triturado e incorporado pela aração e gradagem do solo. A faixa agricultável do SAF foi preparada com aração e gradagem, com cultivo de sorgo/milheto + guandu + massai, recebendo adubação de plantio com 150 kg ha⁻¹ de NPK (8-28-16) e adubação de cobertura com 100 kg ha⁻¹ de N (ureia) e 20 kg ha⁻¹ de K₂O (KCl), seguida por colheita mecânica da forragem consorciada.

04 - *SAF 2*: Sistema agroflorestal raleado em faixas, aberto no final do ano de 2017, composto por faixas de vegetação florestal lenhosas nativas (renque) com 20 m de largura e uma faixa agricultável, com supressão total da vegetação, (entrerenque) com 10 m de largura e comprimento variando entre 220 a 240 m. Após a retirada da madeira de interesse comercial, o restante do material (equivalente a 9 Mg ha⁻¹ de material vegetal) foi triturado e incorporado pela aração e gradagem do solo. A faixa agricultável do SAF foi preparada com aração e gradagem, com cultivo de sorgo/milheto + guandu + massai, recebendo adubação de plantio com 150 kg ha⁻¹ de NPK (8-28-16) e adubação de cobertura com 100 kg ha⁻¹ de N (ureia) e 20 kg ha⁻¹ de K₂O (KCl), seguida por colheita mecânica da forragem consorciada.

Não foi realizado uso de fogo ou calagem em nenhum dos manejos.

Amostragem e análises do solo

As amostras de solo foram realizadas em cada manejo (Consórcio, Mata de Caatinga, SAF 1 e SAF 2) nas seguintes camadas: 0-0,10; 0,10-0,20; 0,20-0,40; 0,40-0,60; 0,60-1,0 m, com 4 repetições, sendo que cada repetição foi composta por quatro amostras simples para as determinações do carbono orgânico total, nitrogênio total e estoques de carbono e nitrogênio. Para os SAFs, os valores foram adotados em função das médias dos valores encontrados nos renques e entrerenques.

A coleta de solo para determinação dos teores de carbono e nitrogênios foi realizada ao redor de cada trincheira (Figura 1), em todas as direções cardeais e marcados quatro pontos equidistantes para coleta de amostras deformadas, as quais foram combinadas em uma amostra composta para cada profundidade amostrada.

Para amostragem de densidade (Ds) foram abertas trincheiras com dimensões 0,8 x 2,0 m e com 1,3 m de profundidade. As amostras indeformadas foram coletadas em suas

paredes internas, totalizando 4 repetições para cada camada analisada, com anel volumétrico de 100 cm³ (Figura 1).

Determinações dos teores de carbono e nitrogênio e estoque de carbono no solo

Os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) foram determinados em amostras de solo de terra fina seca ao ar (TFSA), peneiradas (2 mm) (Figura 1E) e maceradas em grau de porcelana até passar por uma peneira de malha 70 mesh (0,210mm). As concentrações de carbono e nitrogênio foram determinadas por combustão a seco, usando um analisador elementar Leco CN628 (Leco Corp., St. Joseph, MI, EUA). Ainda foi realizado o cálculo da relação C/N.

A determinação da densidade foi realizada pelo método do anel volumétrico conforme Teixeira et al. (2017). Foram utilizados anéis volumétricos de aço inox com volume de 100 cm³. A densidade do solo em cada amostra foi calculada pela relação entre a massa de solo seco presente em cada anel volumétrico e o volume do anel expresso em g cm⁻³, de acordo com a fórmula abaixo (equação 1):

$$\text{Equação 1: } D_s = \frac{M_a}{v}$$

Onde: D_s – densidade do solo, em kg dm⁻³ (equivalente a g cm⁻³); M_a – massa da amostra de solo seco a 105 °C até peso constante, em g; v – volume do cilindro, em cm³.

Os estoques foram calculados com base nas concentrações de C e N e no volume e densidade de cada camada do solo, corrigindo pela espessura da área de referência, segundo Keller et al. (1993).

Os estoques foram calculados pela equação 2:

$$\text{Equação 2: } Est\ C = \frac{C_s * D_s * \left(\frac{D_{ref}}{D_s} * e\right)}{10}$$

Onde: Est C = estoque de carbono orgânico em determinada profundidade (Mg ha⁻¹); C_s = teor de C orgânico total na profundidade amostrada (g kg⁻¹); D_s = densidade do solo para profundidade amostrada na área de referência (kg dm⁻³); e = espessura da camada considerada (cm).

Para cálculo do estoque de nitrogênio foi utilizada a mesma metodologia.

Os estoques foram calculados pela equação 3:

$$\text{Equação 3: } Est\ N = \frac{N_s * D_s * \left(\frac{D_{ref}}{D_s} * e\right)}{10}$$

Onde: Est N = estoque de nitrogênio orgânico em determinada profundidade (Mg ha^{-1}); N_s = teor de N orgânico total na profundidade amostrada (g kg^{-1}); D_s = densidade do solo para profundidade amostrada na área de referência (kg dm^{-3}); e = espessura da camada.

Análise e sistematização de dados

De posse dos dados, procedeu-se à análise multivariada, realizando análise de componentes principais (ACP) (Jolliffe, 1986) e agrupamento, utilizando a distância euclidiana pelo método Ward (Ward, 1963).

Para análise de componentes principais, baseou-se na representação gráfica (Biplot) relativa aos eixos dos componentes, considerando o parâmetro Cos^2 , indicador da qualidade de representação e, simultaneamente, as contribuições (%) das variáveis (Abdi e Williams, 2010). Com o método Ward, buscou-se criar grupos com mínima variância interna, minimizando o quadrado da distância euclidiana às médias dos grupos (Ward, 1963).

As análises foram realizadas pelo Software R de computação estatística (R Team, 2020) utilizando os pacotes “FactoMineR” (Lê et al., 2008), “factoextra” (Kassambara e Mundt, 2020) e “dendextend” (Galili, 2015). Para o cálculo de estoque acumulado (C e N), considerou-se o somatório dos estoques em cada camada, procedendo-se ao teste de médias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise de componentes principais realizada para as camadas avaliadas explicou mais de 92% da variabilidade dos quatro manejos (Tabela 1).

Na camada superficial (0-0,1 m), a CP1 explicou 69,28% da variabilidade associada às variáveis, e o CP2 23,12% (Figura 1A). Observou-se que os atributos NT, EstN se correlacionaram de forma elevada e positiva e a relação C/N de maneira elevada e negativa com CP1, ainda os atributos COT e EstC se correlacionaram positivamente com a CP2. Na camada de 0,1-0,2 m, a CP1 explicou 78,90% da variabilidade associada às variáveis, e o CP2 15,93% (Figura 1B), sendo que os atributos COT, EstC e relação C/N correlacionaram-se de forma elevada e positiva, porém o NT e o EstN apresentaram elevada e negativa correlação com a CP1. O atributo Ds correlacionou-se de forma elevada e positiva com a CP2.

Na camada de 0,2-0,4 m, a CP1 explicou 69,42% da variabilidade associada às variáveis e o CP2 29,72% (Figura 1C), sendo que os atributos COT, Ds, EstC e relação C/N correlacionaram-se de forma elevada e positiva com CP1. Porém, as variáveis NT e EstN apresentaram elevada e positiva correlação com CP2. Na camada de 0,4-0,6 m, a CP1 explicou 74,16% da variabilidade associada às variáveis e o CP2 22,99% (Figura 1D), cujos atributos COT, NT, EstC e EstN correlacionaram-se de forma elevada e positiva com a CP1. Entretanto, a relação C/N correlacionou-se com valores elevados e positivos com a CP2.

Na camada de 0,6-1,0 m, a CP1 explicou 70,07% da variabilidade associada às variáveis e o CP2 28,72% (Figura 1E). Os parâmetros Ds e relação C/N correlacionaram-se de forma elevada e positiva com a CP1, porém as variáveis COT, NT, EstC e EstN apresentaram correlação elevada e positiva com a CP2.

Tabela 1. Correlação, qualidade de representação (Cos2) e contribuição (%) entre variáveis originais e componentes principais e relação, teor e estoque de C e N, e densidade do solo sob influência de manejo Consórcio, mata de Caatinga e sistemas agroflorestais para as camadas avaliadas.

| Atributos | 0-0,1 m | | | | 0,1-0,2 m | | | | 0,2-0,4 m | | | | 0,4-0,6 m | | | | 0,6-1,0 m | | | |
|-------------------------|------------|--------|------|--------------|------------|--------|------|--------------|------------|--------|------|--------------|------------|--------|------|--------------|------------|--------|------|--------------|
| | Correlação | | Cos2 | Contrib. (%) |
| | CP1 | CP2 | | | CP1 | CP2 | | | CP1 | CP2 | | | CP1 | CP2 | | | CP1 | CP2 | | |
| COT | 0.74 | 0.67** | 0.99 | 17,9 | 0.89** | 0.42 | 0.97 | 16,9 | 0.89** | 0.44 | 0.99 | 16,6 | 0.99** | 0.043 | 0.99 | 17 | 0.80 | 0.60** | 0.99 | 16,8 |
| NT | 0.94** | -0.29 | 0.97 | 17,6 | -0.95** | 0.24 | 0.96 | 16,7 | -0.61 | 0.79** | 0.99 | 16,8 | 0.95** | -0.30 | 0.99 | 17,1 | -0.72 | 0.69** | 0.99 | 16,7 |
| Ds | 0.78 | -0.03 | 0.61 | 11 | -0.65 | 0.67** | 0.87 | 15,4 | 0.92** | 0.35 | 0.97 | 16,3 | 0.80 | 0.49 | 0.88 | 15,1 | 0.98** | 0.18 | 0.99 | 16,8 |
| EstC | 0.68 | 0.73** | 0.99 | 17,8 | 0.88** | 0.44 | 0.97 | 16,9 | 0.89** | 0.44 | 0.99 | 16,6 | 0.99** | 0.04 | 0.99 | 16,9 | 0.79 | 0.60** | 0.99 | 16,8 |
| EstN | 0.95** | -0.29 | 0.98 | 17,6 | -0.94** | 0.25 | 0.96 | 16,7 | -0.61 | 0.79** | 0.99 | 16,8 | 0.95* | -0.30 | 0.99 | 17,1 | -0.72 | 0.68** | 0.99 | 16,7 |
| C/N | -0.87** | 0.50 | 0.99 | 17,8 | 0.97** | 0.15 | 0.97 | 17,1 | 0.99** | -0.15 | 0.99 | 16,7 | 0.10 | 0.97** | 0.96 | 16,5 | 0.95** | -0.15 | 0.94 | 15,9 |
| Autovalores | 3,34 | 1,39 | - | - | 4,73 | 0,96 | - | - | 4,17 | 69,42 | - | - | 4,45 | 74,16 | - | - | 4,2 | 1,72 | - | - |
| Variância acumulada (%) | 69,28 | 92,4 | - | - | 78,9 | 94,83 | - | - | 1,78 | 99,14 | - | - | 1,38 | 97,15 | - | - | 70,07 | 98,79 | - | - |

** Significativo a 1%

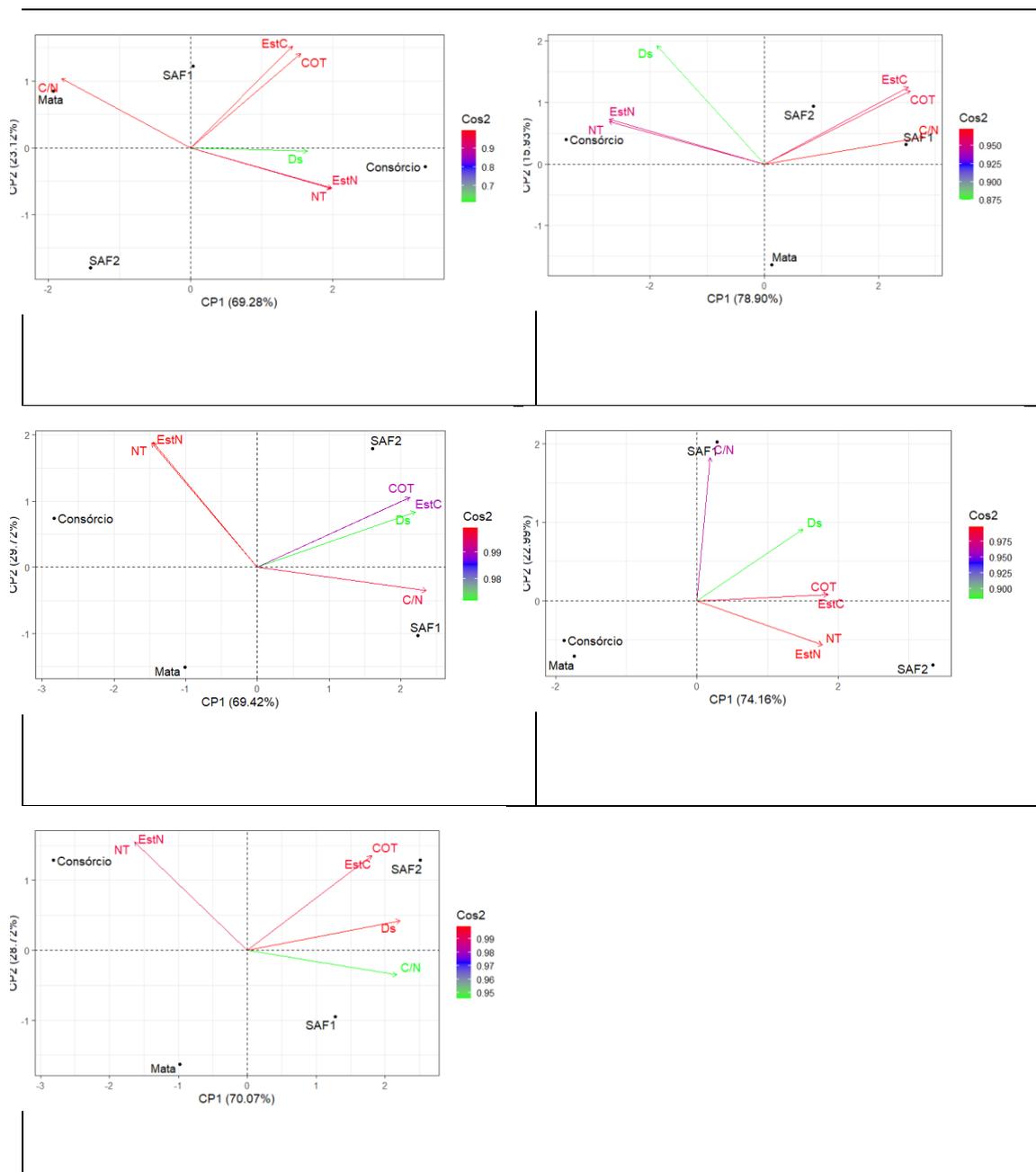


Figura 1. Biplot entre a relação, teor e estoque de carbono e nitrogênio e a densidade do solo sob influência de manejo Consórcio, mata de Caatinga e sistemas agroflorestais para os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2), para a camada de 0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B), 0,2-0,4 m (C), 0,4-0,6 m (D) e 0,6-1,0 m (E).

Os atributos que apresentaram maior correlação com a CP1 e a CP2 nas camadas estudadas, resultaram maiores valores do parâmetro de qualidade de representação (Cos2) e de contribuição (%) (Tabela 1). Os altos valores de Cos2 estão associadas a uma escala de cores. Quanto mais quente a cor (vermelho) maior a importância dessas variáveis. Nas três primeiras camadas, os atributos com maior contribuição foram COT, NT, EstC, EstN e relação C/N. Na camada de 0,4-0,6 m, citam-se os mesmos atributos, exceto relação C/N, e na camada de 0,6-1,0 m e inclui-se a Ds ao COT, NT, EstC e EstN.

A análise de agrupamento evidencia a dissimilaridade entre os diferentes manejos, sendo que na camada superficial (0-0,1 m) houve a formação de dois grupos (Figura 2A): um formado somente pela área agrícola consórcio e outro grupo composto pelos demais manejos (Mata de Caatinga e SAFs 1 e 2). Nas demais camadas 0,1-0,2 m (Figura 2B), 0,2-0,4 m (Figura 2C), 0,4-0,6 m (Figura 2D) e 0,6-1,0 m (Figura 2E) formaram-se dois grupos: um pelo SAF1 e SAF2 e outro pelo consórcio e mata.

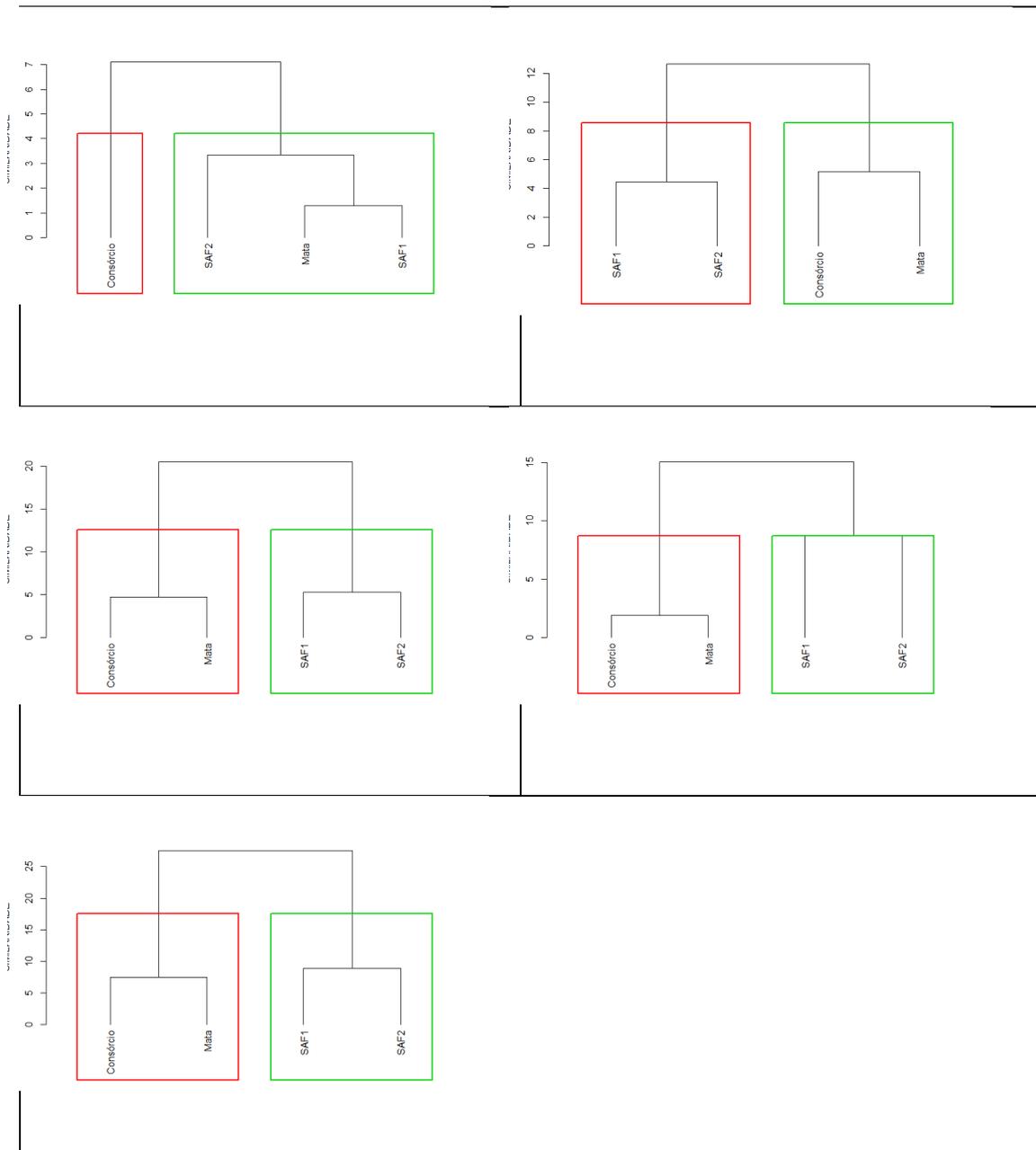


Figura 2. Dendrograma de dissimilaridade entre relação, teor e estoque de C e N, e a densidade do solo sob influência de manejo Consórcio, mata de Caatinga e sistemas agroflorestais na camada de 0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B), 0,2-0,4 m (C), 0,4-0,6 m (D) e 0,6-1,0 m (E).

Com os resultados do dendrograma por camada é possível verificar quais as principais diferenças entre os grupos, considerando os valores observados em cada manejo (Tabela 2). Assim, na camada superficial (0-0,1 m), a qual diferiu o consórcio dos demais manejos, ressaltam-se os maiores valores de C e N, além de menor relação C/N.

Tabela 2. Valores médios para relação teor e estoque de C e N e densidade do solo sob influência de manejo Consórcio, mata de Caatinga e sistemas agroflorestais para as camadas avaliadas

| Manejo | COT | NT | Ds | EstC | EstN | C/N |
|---------------------|----------------------------|------|---------------------|-----------------------------|------|-----|
| | --- g kg ⁻¹ --- | | kg dm ⁻³ | --- Mg ha ⁻¹ --- | | |
| 0-0,1 m | | | | | | |
| Consórcio | 16,5 | 1,25 | 1,56 | 23,3 | 1,77 | 13 |
| Mata | 16,0 | 0,79 | 1,41 | 22,8 | 1,13 | 20 |
| SAF1 | 16,3 | 0,87 | 1,56 | 23,1 | 1,23 | 19 |
| SAF2 | 15,4 | 0,91 | 1,49 | 21,8 | 1,28 | 17 |
| G1 (Consórcio) | 16,5 | 1,25 | 1,56 | 23,3 | 1,77 | 13 |
| G2 (Mata+SAF1+SAF2) | 15,9 | 0,85 | 1,49 | 22,6 | 1,22 | 19 |
| 0,1-0,2 m | | | | | | |
| Consórcio | 8,1 | 0,78 | 1,60 | 11,9 | 1,12 | 10 |
| Mata | 9,3 | 0,61 | 1,46 | 13,5 | 0,89 | 15 |
| SAF1 | 11,4 | 0,52 | 1,52 | 16,7 | 0,77 | 22 |
| SAF2 | 11,5 | 0,65 | 1,52 | 16,9 | 0,96 | 18 |
| G1 (Consórcio+Mata) | 8,7 | 0,69 | 1,53 | 12,7 | 1,01 | 13 |
| G2 (SAF1+SAF2) | 11,4 | 0,59 | 1,53 | 16,8 | 0,87 | 20 |
| 0,2-0,4 m | | | | | | |
| Consórcio | 5,47 | 0,57 | 1,53 | 16,7 | 1,77 | 9 |
| Mata | 5,87 | 0,42 | 1,53 | 18,0 | 1,31 | 13 |
| SAF1 | 7,99 | 0,37 | 1,58 | 24,5 | 1,16 | 21 |
| SAF2 | 9,33 | 0,52 | 1,59 | 28,6 | 1,59 | 18 |
| G1 (Consórcio+Mata) | 5,67 | 0,5 | 1,54 | 17,4 | 1,54 | 12 |
| G2 (SAF1+SAF2) | 8,65 | 0,45 | 1,59 | 26,6 | 1,38 | 20 |
| 0,4-0,6 m | | | | | | |
| Consórcio | 3,38 | 0,19 | 1,61 | 10,6 | 0,62 | 17 |
| Mata | 3,91 | 0,21 | 1,57 | 12,3 | 0,68 | 18 |
| SAF1 | 5,35 | 0,23 | 1,66 | 16,8 | 0,73 | 23 |
| SAF2 | 7,42 | 0,42 | 1,66 | 23,4 | 1,32 | 18 |
| G1 (Consórcio+Mata) | 3,64 | 0,20 | 1,59 | 11,4 | 0,65 | 18 |
| G2 (SAF1+SAF2) | 6,38 | 0,33 | 1,66 | 20,1 | 1,03 | 20 |
| 0,6-1,0 m | | | | | | |
| Consórcio | 1,95 | 0,39 | 1,60 | 12,7 | 2,58 | 5 |
| Mata | 1,50 | 0,13 | 1,62 | 9,7 | 0,83 | 12 |
| SAF1 | 2,37 | 0,09 | 1,66 | 15,5 | 0,64 | 24 |
| SAF2 | 3,72 | 0,16 | 1,69 | 24,2 | 1,08 | 22 |
| G1 (Consórcio+Mata) | 1,72 | 0,26 | 1,62 | 11,2 | 1,70 | 8 |
| G2 (SAF1+SAF2) | 3,05 | 0,13 | 1,68 | 19,8 | 0,86 | 23 |

A partir da camada 0,1-0,2 m, o grupo formado pelos SAFs 1 e 2 destacam-se por apresentarem maiores concentrações de C e, conseqüentemente, maiores valores de estoque C e relação C/N, porém apresentam menores concentrações e estoque de N (Tabela 2).

Com relação aos estoques de C e de N acumulados (0-1,0 m), verificam-se resultados distintos (Figura 3). Para estoque de C acumulado houve superioridade do SAF2 em relação aos demais manejos (Figura 3A). Ainda, o SAF1 apesar de apresentar menor estoque acumulado que o outro sistema agroflorestal foi superior ao consórcio e mata. Para o estoque de N acumulado, houve superioridade para o consórcio em relação à Mata e SAFs (1 e 2), mas o SAF2 apresentou maior estoque de N acumulado que o SAF1 e a Mata (Figura 3B).

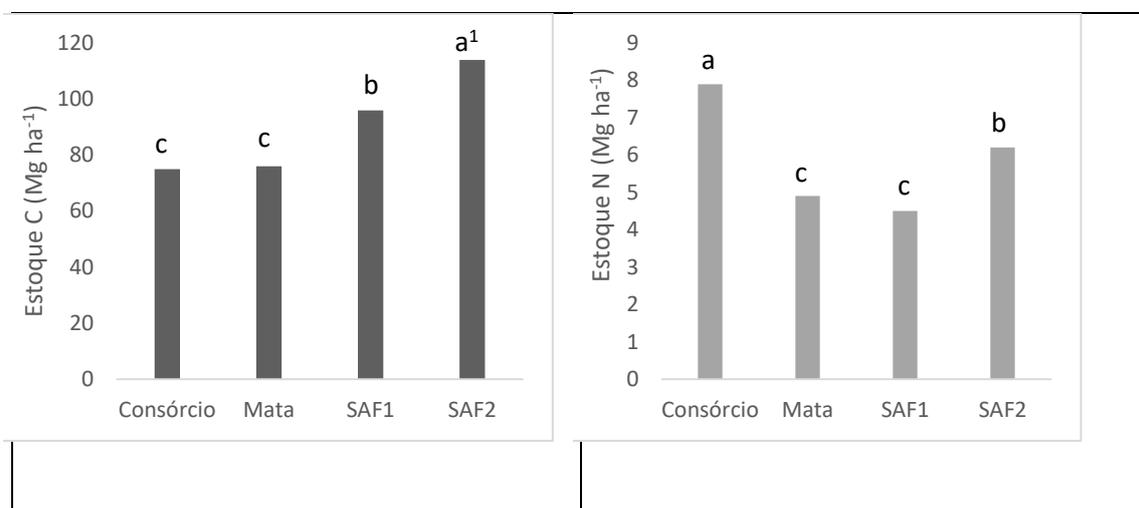


Figura 3. Estoque de C (A) e de N (B) acumulado até 1,0 m sob influência de manejo Consórcio, mata de Caatinga e sistemas agroflorestais. ¹Médias seguidas de mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Na camada superficial (0-0,1 m) o consórcio esteve associado às maiores concentrações e estoques de C e N, cuja justificativa está na produção de palhada da área (cultivo consorciado com gramínea forrageira), o que proporciona o incremento de massa seca, principalmente, em superfície.

O consórcio de milho ou sorgo com gramínea forrageira promove alterações dos atributos químicos do solo, resultado do elevado acúmulo de resíduos vegetais sobre sua superfície, os quais, no processo de decomposição da massa vegetal residual, proporcionam aporte de nutrientes ao solo, causando estímulo à atividade biológica que resulta em alterações na sua fertilidade (Costa et al., 2015).

Os resultados apresentados mostram que a partir da camada de 0,1-0,2 m os SAFs (1 e 2) estiveram associados aos maiores valores de C (teor e estoque), uma justificativa é a heterogeneidade de componentes presentes no sistema agroflorestral, como a presença de árvores nos renques, e as gramíneas e leguminosas cultivadas nos entrerenques, o que corrobora a formação dos dois grupos (SAFs x Consórcio + Mata) para as camadas subsuperfícies.

Ainda, os maiores valores de estoque C acumulados nas áreas de SAF2 e SAF1 podem ser justificados pelo incremento do C em profundidade, oriundo das raízes das árvores presentes na área que foi recentemente aberta assim como as raízes das culturas agrícolas cultivadas. A mudança do uso da terra resultou em ganhos para o C do solo até 1,0 m e que podem ser justificados pela codependência verificada nos resultados de componentes principais (Tabela 1 e Figura 1).

A adoção de sistemas agroflorestais, independentemente de sua área cultivada, promoveu maior acúmulo de carbono no solo em sistemas de produção agropecuários em região Semiárida, pois o componente florestal exerce forte influência no microclima, contribuindo para menores temperaturas, aumento da umidade residual, influenciando positivamente na dinâmica de nutrientes. Os reservatórios de C e N variam de acordo com as taxas de deposição de resíduos vegetais e animais e com as perdas decorrentes do consumo da serapilheira pelos animais, da erosão e da oxidação por microrganismos do solo (Sacramento et al., 2013).

As raízes do componente florestal impactam no acúmulo de carbono em profundidade, o que corrobora as afirmativas anteriores, ou seja, o SAF2 que proporciona maior área de renque em relação ao entrerenque melhora a qualidade do solo. Os exsudados das raízes são uma fonte essencial de C e nutrientes nos solos e são altamente variáveis dentro de um sistema; tal contribuições em sistemas agroflorestais são frequentemente derivadas do componente árvore (Isaac e Borden, 2019).

Ainda para estoque de C acumulado no SAF2 e no SAF1, apresentaram incrementos em relação à área de mata de 50% e 26%, respectivamente. A área agrícola de consórcio proporcionou diminuição no estoque de C acumulado de 2%, ou seja, sistemas agroflorestais são alternativas para aumento célere de C, porém o consórcio não incrementa carbono, mas mantém. É necessário também observar que a diferença de estoque de C entre SAF2 e mata (50%), em parte, advém da entrada de biomassa da floresta que foi suprimida, haja vista a área experimental encontrar-se nos seus primeiros anos agrícolas. Como relatado por Oliveira et al. (2019), ao observarem a conversão de uma mata secundária em SAF,

constataram que 12 anos depois os estoques de C do SAF eram aproximadamente 20% menores que a mata secundária.

Após a supressão da vegetação nativa à pastagem (nativa e plantada), reduzem-se os estoques de C na ordem de 12% a 27% na região Semiárida, que dependendo do tempo de uso e camada de solo, geralmente representam perdas mais severas do que em outras regiões do país. Ainda, as maiores perdas ocorrem durante os primeiros cinco anos após a conversão da vegetação nativa (Medeiros et al., 2021).

De maneira geral, a conversão da mata de Caatinga em área agrícola e pastagens reduz os estoques de C e N no solo. Entretanto, quando há implantação de culturas de alta produção de biomassa, podem promover aumento de C e N no solo (Barros et al., 2015).

Assim, o uso de sistemas integrados de produção agropecuária torna-se alternativa importante para a agropecuária do Semiárido ou recuperação de áreas degradadas, frente a outras estratégias de recuperação, como o pousio. Uma vez que uma década de pousio reduziu perda de carbono orgânico, escoamento superficial e erosão de áreas degradadas, porém não promoveram mudanças significativas na perda de nutrientes (Almeida et al., 2017).

Os menores estoques de N na Mata e SAFs 1 e 2 em relação ao consórcio são explicados pela alta relação C/N da serrapilheira das plantas da Caatinga que, segundo Primo et al. (2018), é de 34,2. A biomassa com relação C/N (>30) pode imobilizar o nitrogênio ou causar uma lenta liberação deste elemento no solo (Moreira e Siqueira, 2006) que, associados à presença natural de taninos, polifenóis e lignina, dificultam a mineralização da matéria orgânica pelos microrganismos do solo, reduzindo o aporte de N no solo (Aita e Giacomini, 2003).

O cultivo do feijão guandu nos SAFs (1 e 2) não incrementou N no solo dentro do perfil avaliado (0-1,0 m), o que pode ser explicado pela competição da leguminosa com a gramíneas (massai e sorgo/milheto) no consórcio.

A complexa composição de sistemas agroflorestais, combinando espécie leguminosa, gramínea e componente arbóreo, promove aumentos qualitativos e quantitativos nas diferentes frações da matéria orgânica do solo e dos estoques de carbono, essencial para a manutenção da qualidade do solo, o que é importante para o Semiárido brasileiro, o qual apresenta baixíssimos teores de carbono natural (Iwata et al., 2012). Essa condição aliada ao aproveitamento de resíduos com diferentes propriedades orgânicas e estruturais permite um balanceamento dos compartimentos da matéria orgânica lábeis e recalcitrantes, garantindo, assim, o aumento da complexidade e manutenção do carbono no solo (Iwata et al., 2021).

CONCLUSÕES

A conversão de mata de Caatinga em Sistemas Agroflorestais mostra-se uma alternativa viável para aumentar os estoques de carbono no solo.

A área de consócio destaca-se por apresentar maior estoque de carbono na camada superficial (0-0,1 m) e maior estoque de nitrogênio em todo o perfil (0-1,0 m).

Sistemas integrados de produção agropecuária no bioma Caatinga são alternativas sustentáveis para o uso do solo no Semiárido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abdi H, Williams LJ. Principal component analysis. *Wiley Interdiscip Rev Comput Stat.* 2010;2:433-59. <https://doi.org/10.1002/wics.101>
- Aita C, Giacomini SJ. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. *Rev Bras Cienc Do Solo.* 2003;27:601-12. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832003000400004>
- Almeida CL de, Araújo JC de, Costa MCG, Almeida AMM de, Andrade EM de. Fallow reduces soil losses and increases carbon stock in Caatinga. *Floresta e Ambient.* 2017;24:1-10. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.017516>
- Alves S da S. Dinâmica da macrofaunafauna na serapilheira em áreas com plantio de *Eucalyptus* spp. e Caatinga, em Olho d'água das flores, Semiárido de Alagoas. Universidade Federal de Alagoas; 2018.
- Araújo Filho JA de. Manejo pastoril sustentável da caatinga. 2013. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Barros JD de S, Chaves LHG, Pereira WE. Carbon and nitrogen stocks under different management systems in the Paraíba Serto. *African J Agric Res.* 2015;10:130-6. <https://doi.org/10.5897/ajar2014.8706>
- Costa NR, Andreotti M, Mascarenhas Lopes KS, Yokobatake KL, Ferreira JP, Pariz CM, Dos Batista Bonini CS, Longhini EVZ. Atributos do solo e acúmulo de carbono na integração lavoura-pecuária em sistema plantio direto. *Rev Bras Cienc Do Solo.* 2015;39. <https://doi.org/10.1590/01000683rbc20140269>
- Davies GM, Gray A. Don't let spurious accusations of pseudoreplication limit our ability to learn from natural experiments (and other messy kinds of ecological monitoring). *Ecol Evol.* 2015;5:5295-304. <https://doi.org/10.1002/ece3.1782>
- Duarte JS de S, Caracristi I. Clima e qualidade de vida na cidade de sobral: Buscando a dimensão cotidiana dos estudos climáticos. *Rev Da Casa Da Geogr Sobral.* 2005;6:2
- Funceme. Chuva máxima do ano por município; 2019 [cited 2021 Jul 10]. Available from: <http://funceme.br/app-calendario/ano/municipios/maxima/2019>.
- Galili T. Dendextend: An R package for visualizing, adjusting and comparing trees of

- hierarchical clustering. *Bioinformatics*. 2015;31:3718-20.
<https://doi.org/10.1093/bioinformatics/btv428>
- Gao L, Becker E, Liang G, Houssou AA, Wu H, Wu X, Cai D, Degré A. Effect of different tillage systems on aggregate structure and inner distribution of organic carbon. *Geoderma*. 2017;288:97-104. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.11.005>
- Isaac ME, Borden KA. Nutrient acquisition strategies in agroforestry systems. *Plant Soil*. 2019;444:1-19. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04232-5>
- Iwata B de F, Leite LFC, Araújo ASF, Nunes LAPL, Gehring C, Campos LP. Sistemas agroflorestais e seus efeitos sobre os atributos químicos em Argissolo Vermelho-Amarelo do Cerrado piauiense. *Rev Bras Eng Agric e Ambient*. 2012;16:730-8.
<https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000700005>
- Iwata BDF, Brandão MLSM, Braz RDS, Leite LFC, Costa MCG. Total and particulate contents and vertical stratification of organic carbon in agroforestry system in Caatinga. *Rev Caatinga*. 2021;34:443-51. <https://doi.org/10.1590/1983-21252021v34n220rc>
- Jolliffe IT. *Principal components analysis*. 2. ed. New York: 1986. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-044894-7.01358-0>
- Kassambara A, Mundt F. *Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses*. 2020
- Keller M, Veldkaamp E, Weitz AM, Reiners WA. Effect of pasture age on soil trace-gas emissions from a deforested area of Costa Rica. *Nature*. 1993;365:244–246.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1038/365244a0>
- Korwar GR, Prasad JVNS, Rao GR, Venkatesh G, Pratibha G, Venkateswarlu B. *Agroforestry as a Strategy for Livelihood Security in the Rainfed Areas: Experience and Expectations*. 2014. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1662-9_5
- Lê S, Josse J, Husson F. *FactoMineR: An R Package for Multivariate Analysis*. *J Stat Softw*. 2008;25:1–18. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2008.06.007>
- Liang J, Wang G, Singh S, Jagadamma S, Gu L, Schadt CW, Wood JD, Hanson PJ, Mayes MA. Intensified Soil Moisture Extremes Decrease Soil Organic Carbon Decomposition: A Mechanistic Modeling Analysis. 2021. .
<https://doi.org/doi.org/10.25581/ornlfsa.023/1804106>

- Martins JR, Fernandes LA, Oliveira ALG, Sampaio RA, Frazão LA. Soil Microbial Attributes Under Agroforestry Systems in the Cerrado of Minas Gerais. *Floresta e Ambient.* 2018;25:1-9. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.047616>
- Medeiros A de S, Maia SMF, Santos TC Dos, Gomes TC de A. Losses and gains of soil organic carbon in grasslands in the Brazilian semi-arid region. *Sci Agric.* 2021;78:1-8. <https://doi.org/10.1590/1678-992x-2019-0076>
- Miccolis A, Peneireiro FM, Vieira DLM, Marques HR, Hoffmann MRM. Restoration through agroforestry: options for reconciling livelihoods with conservation in the Cerrado and Caatinga biomes in Brazil. *Exp Agric.* 2019;55:208-25. <https://doi.org/10.1017/S0014479717000138>
- Moreira FMS, Siqueira JO. *Microbiologia e Bioquímica do Solo*. Lavras: 2006
- Oliveira C V., Vicente LC, Gama-Rodrigues EF, Gama-Rodrigues AC, Marques JRB, Barreto-Garcia PAB. Carbon and nitrogen stock of Acrisols and Nitisols in South Bahia, Brazil. *Geoderma Reg.* 2019;16:e00218. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00218>
- Primo AA, Melo MD, Pereira GDAC, Silva LA, Fernandes FÉP, Souza HA de. Potencial fertilizante da serapilheira de espécies lenhosas da Caatinga na recuperação de um solo degradado. *Ceres.* 2018;65:74-84
- R Team C. R: A language and environment for statistical computing. 2020
- Sá lêdo B, Angelotti F. Degradação ambiental e desertificação no semiárido. Mudanças climáticas e desertificação no Semi-árido brasileiro. Petrolina-PE: Embrapa Informação Agropecuária; 2009. p. 53-76.
- Sacramento JAAS do, Araújo AC de M, Escobar MEO, Xavier FA da S, Cavalcante ACR, Oliveira TS de. Soil carbon and nitrogen stocks in traditional agricultural and agroforestry systems in the semiarid region of Brazil. *Rev Bras Cienc Do Solo.* 2013;37:784-95. <https://doi.org/10.1590/s0100-06832013000300025>
- Santana M da S, Sampaio EV de SB, Giongo V, Menezes RSC, Jesus KN de, Albuquerque ERGM de, Nascimento DM do, Pareyn FGC, Cunha TJF, Sampaio RMB, Primo DC. Carbon and nitrogen stocks of soils under different land uses in Pernambuco state, Brazil. *Geoderma Reg.* 2019;16:e00205. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2019.e00205>
- Schulz K, Voigt K, Beusch C, Almeida-Cortez JS, Kowarik I, Walz A, Cierjacks A. Grazing

deteriorates the soil carbon stocks of Caatinga forest ecosystems in Brazil. *For Ecol Manage.* 2016;367:62-70. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.02.011>

Shi W-Y, Zhu X-C, Zhang F-B, Wang K-B, Deng L, Ma M-G. Soil Carbon Biogeochemistry in Arid and Semiarid Forests. *Applied Geochemistry with Case Studies on Geological Formations, Exploration Techniques and Environmental.* 2019. . <https://doi.org/DOI:10.5772/intechopen.87951>

Teixeira PC, Donagemma GK, Ademir F, Teixeira WG. *Manual de metodos de análises.* 3. ed. Brasília, DF: 2017

Ward JHJ. Hierarchical grouping to optimize an objective function. *J Am Stat Assoc.* 1963;58:236-44. <https://doi.org/10.1198/016214503000000468>

Wells T, Hancock GR, Martinez C, Dever C, Kunkel V, Gibson A. Differences in soil organic carbon and soil erosion for native pasture and minimum till agricultural management systems. *Sci Total Environ.* 2019;666:618-30. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.02.097>