



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

CARLA DANIELLE VASCONCELOS DO NASCIMENTO

CONTRIBUIÇÕES DE COMPONENTES VEGETAIS NA QUALIDADE DO SOLO
EM SISTEMA AGROSSILVIPASTORIL NO SEMIÁRIDO

FORTALEZA

2016

CARLA DANIELLE VASCONCELOS DO NASCIMENTO

**CONTRIBUIÇÕES DE COMPONENTES VEGETAIS NA QUALIDADE DO SOLO
EM SISTEMA AGROSSILVIPASTORIL NO SEMIÁRIDO**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Manejo e Conservação do Solo e da Água, da Universidade Federal do Ceará - UFC, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre.

Orientador: Prof. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa.

Coorientador: Prof. Dr. Miguel Cooper.

FORTALEZA

2016

CARLA DANIELLE VASCONCELOS DO NASCIMENTO

**CONTRIBUIÇÕES DE COMPONENTES VEGETAIS NA QUALIDADE DO
SOLO EM SISTEMA AGROSSILVIPASTORIL NO SEMIÁRIDO**

Dissertação submetida à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Manejo e Conservação do Solo e da Água, da Universidade Federal do Ceará - UFC, como parte das exigências para a obtenção do título de Mestre.

Aprovado em: 12/02/2016.

BANCA EXAMINADORA

Profª. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa (orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Miguel Cooper
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ)

Prof. Dr. Raul Shiso Toma
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Ciências e Tecnologia

-
- N194c Nascimento, Carla Danielle Vasconcelos do.
Contribuições de componentes vegetais na qualidade do solo em sistema agrossilvipastoril no semiárido / Carla Danielle Vasconcelos do Nascimento. – 2016.
112 f.: il. color.; enc.; 30 cm.
- Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias
Departamento de Ciências do Solo, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Fortaleza,
2016.
Área de Concentração: Manejo e Conservação do Solo e da Água.
Orientação: Profa. Dra. Mirian Cristina Gomes Costa.
Coorientação: Prof. Dr. Miguel Cooper.
1. Caatinga. 2. Estrutura do solo. 3. Fertilidade do Solo. I. Título.

AGRADECIMENTO

A Deus pela saúde, disposição e fôlego de vida para continuar conquistando meus objetivos.

À minha família, em especial meu pai Antonio Augusto do Nascimento, minha mãe Maria Zenilda Ferreira Vasconcelos e meu irmão Ícaro Vasconcelos do Nascimento.

À Universidade Federal do Ceará, ao Departamento de Ciências do Solo e Programa de Pós-graduação em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

À CAPES, pelo apoio financeiro com auxílio de bolsa e à pesquisa por meio do Projeto Pró-Integração.

À Embrapa Caprinos e Ovinos, em especial ao Henrique Antunes.

À minha orientadora Mirian Cristina Gomes Costa pela orientação e por toda a confiança depositada.

Ao professor Miguel Cooper pela disponibilização do laboratório de Micromorfologia (LABMICRO), pela atenção dispendida durante todos os procedimentos analíticos e pelas sugestões para melhoria do trabalho.

Ao professor Raul Shiso Toma pelo tempo, pelas colaborações e sugestões;

Ao professor Jaedson Cláudio Anunciato Mota pelo suporte e auxílio nas dúvidas;

Aos colegas do departamento que contribuíram diretamente para a realização deste trabalho: Dimitri Matos Silva, Cillas Pollicarto da Silva, Gleiciane da Silva, Ademir Menezes, Crisanto Dias e Josimar de Azevedo.

A todos que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

Meu leal obrigada!

“Cabe ao homem compreender que o solo fértil onde tudo que se planta dá, pode secar. Que o chão que dá frutos e flores pode dar ervas daninhas. Que a caça se dispersa e a terra da fartura pode se transformar na terra da penúria e da destruição. O homem precisa entender que de sua boa convivência com a natureza depende sua subsistência e que a destruição da natureza é sua própria destruição, pois a sua essência é a natureza, a sua origem e o seu fim”

Elizabeth Jhin

RESUMO

O estudo de atributos químicos, físicos, bem como da micromorfologia, poderá fornecer subsídios que possibilitem conhecimento mais detalhado da fertilidade e porosidade do solo, permitindo a compreensão de diferenças químicas e estruturais do solo proporcionadas pelas plantas em sistemas alternativos no semiárido. Com base nisso, aventou-se a hipótese de que componentes vegetais (arbustivo, arbóreo e agrícola) possuem contribuições diferenciais na fertilidade e na estrutura do solo sob sistema agrossilvipastoril no semiárido cearense. Neste trabalho o objetivo foi avaliar as diferenças na fertilidade do solo, na distribuição do espaço poroso, bem como no formato e tamanho dos poros de um LUVISSOLO na área de influência de componentes vegetais – arbustivo (*Leucaena leucocephala*), arbóreo (*Poincianera pyramidalis*) e agrícola (*Zea mays*) e em área de regeneração natural. O trabalho foi conduzido em sistema agrossilvipastoril no Centro de Convivência com o Semiárido, pertencente à Embrapa Caprinos e Ovinos, Sobral, CE. As amostragens para análises químicas foram realizadas por tradagens, nas profundidades de 0-5, 5-18, 18-25 e 25-41 cm, na área de influência das espécies supracitadas. As amostras para análises físicas e micromorfológicas foram realizadas coletando-se amostras de estrutura preservada, em perfis correspondentes às áreas de abrangência das espécies, incluindo área de regeneração natural, abrangendo as profundidades citadas. Os atributos químicos avaliados foram: pH, carbono orgânico total (COT), nitrogênio total (N), fósforo total (P), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), sódio (Na^+), potássio (K^+), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%) e porcentagem de saturação por sódio (PST). Para avaliar a estrutura, foram analisadas: densidade do solo (Ds), resistência à penetração (RP), permeabilidade do solo intrínseca ao ar (K_{ar}), índices de continuidade de poros (K1 e N), curva característica de água no solo, índice S, porosidade total e distribuição dos poros por forma e tamanho. Os dados dos atributos químicos foram analisados considerando delineamento inteiramente casualizado com parcelas subdivididas no espaço com quatro repetições, os dados físicos considerando delineamento inteiramente casualizado em faixas e quatro repetições e a porosidade pelo método de imagens, delineamento inteiramente casualizado. Mediante significância ao teste F, foi usado teste Scott Knott a 5% de probabilidade. O solo na área de influência dos componentes arbustivo e arbóreo exibiram melhorias na fertilidade e estrutura do solo, com menor densidade, menor resistência à penetração, maior permeabilidade do solo intrínseca ao ar e área total de poros, com predomínio de poros complexos e grandes, que funcionam como rotas alternativas para o

crescimento das raízes e favorecem a infiltração de água no solo, contribuindo para a conservação do solo e da água no sistema agrossilvipastoril no semiárido. Concluiu-se que: a superioridade em alguns atributos físicos e químicos na área de influência dos componentes arbustivo e arbóreo reforçam a importância desses componentes na melhoria do solo e sustentabilidade em agroecossistemas semiáridos; com a análise de imagens digitalizadas 2-D foi possível detectar diferenças no solo causadas pelos componentes vegetais, por intermédio de maior detalhamento dos poros quanto à quantidade, ao tamanho e à forma.

Palavras-chave: Caatinga, estrutura do solo, fertilidade do solo.

ABSTRACT

The study of chemical, physical, as well as the micromorphology may provide support to enable more detailed knowledge of fertility and porosity of the soil, allowing the understanding of the chemical and structural differences ground provided by the plants in alternative systems in semiarid. Based on this, the hypothesis has suggested that plant-components have differentials effects in fertility and soil structure under agroforestry system semiarid region of Ceará. In this study the objective was to evaluate the differences in soil fertility, the distribution of pore space, as well as the shape and size of pores of a Aridisol the area of influence of plant components - shrub (*Leucaena leucocephala*), tree (*Poincianera pyramidalis*) and agricultural (*Zea mays*) and natural regeneration area. The work was conducted in agroforestry system in Centro de Convivência com o Semiárido, Embrapa Caprinos e Ovinos, Sobral, CE. Sampling for chemical analyzes were performed at depths of 0-5, 5-18, 18-25 and 25-41 cm, the area of influence of the above species. Samples for physical and micromorphological analyzes were performed by collecting samples preserved structure, corresponding profiles in the areas of coverage of species, including natural regeneration area, covering the depths cited. The evaluated chemical parameters were: pH, total organic carbon (COT), total nitrogen (N), total phosphorous (P), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}), sodium (Na^+), potassium (K^+), sum of bases (SB), cationic exchange capacity (CTC), base saturation (V%), aluminum saturation (m%) and percentage of sodium saturation (PST). To evaluate the structure have been made: the bulk density (DS), penetration resistance (RP), permeability intrinsic soil air (K_{ar}), continuity index of pores (K1 and N), water retention curve in the soil, S index and total porosity and pore distribution by size and shape. It was image analysis study employed in blocks impregnated with polyester resin and ultraviolet contrast. Data from the chemical attributes were analyzed in a completely randomized design with split plot with four replications in space, the physical data considering a completely randomized design in bands and four replications and porosity by the image method, completely randomized design. By the significant F test was used to test Scott Knott 5% probability. The soil in the area of influence of shrubs and trees components exhibited improvements in soil fertility and structure, with lower density, lower resistance to penetration, increased permeability of the intrinsic soil to air and total area of pores, with a predominance of complex pores and large, which act as alternative routes for root growth and favor water infiltration into the soil, contributing to soil and water conservation in agroforestry system in semiarid region. It was concluded that: the superiority in some physical

and chemical attributes in the area of influence of shrubs and trees components reinforce the importance of these components in soil improvement and sustainability in semiarid agroecosystems; with 2-D analysis was scanned images can detect differences in the soil caused by the plant components via pores greater detail as to the amount, size and shape.

Keywords: Caatinga, soil structure, soil fertility.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Localização do Centro de Convivência com o semiárido pertencente à Embrapa Caprinos e Ovinos, Sobral-CE.....	29
Figura 2– Representação do SAF do Centro de Convivência com o semiárido pertencente à Embrapa Caprinos e Ovinos, Sobral-CE.....	30
Figura 3 – Exemplificação de coleta por minitrincheiras para as profundidades de 0-5 cm e 5-18 cm por tradagens para 18-25 cm e 25-41 cm, com aleatorização da espécie na área em sistema agrossilvipastoril pertencente à Embrapa Caprinos e Ovinos, Sobral, CE.....	34
Figura 4 – Esquema da coleta das amostras de estrutura preservada nas profundidades de 0-5 cm, 5-18 cm, 18-25 cm e 25-41 cm em trincheiras alocadas no sistema agrossilvipastoril e área de regeneração natural pertencente à Embrapa Caprinos e Ovinos, Sobral, CE.....	36
Figura 5 – Coleta das amostras de estrutura preservada em anéis volumétricos de 100 cm ³ (a) e detalhe do patamar para a retirada vertical ao plano do terreno (b).....	37
Figura 6 – Representação da marcação do perfil em três profundidades de amostragem e bloco indeformado (7,0 x 5,0 x 12,0 cm) em caixa de papel confeccionada para esse fim.....	41
Figura 7 – Representação do esquema de obtenção de microfotografias para realização da análise de imagens.....	44
Figura 8– Soma de bases e CTC em função das espécies vegetais e das profundidades.....	56
Figura 9 – Teores médios de carbono orgânico total do solo (g kg ⁻¹) nas profundidades de 0-5, 5-18, 18-25 e 25-41 cm.....	59
Figura 10 – Densidade do solo em função das profundidade e componentes vegetais.....	61
Figura 11 – Microporosidade do solo em função das profundidade e componentes vegetais.....	65
Figura 12 – Resistência do solo à penetração, com erros padrão das médias, em função das profundidade e espécies vegetais.....	67
Figura 13 – Permeabilidade do solo ao ar em função das tensões. A) 0-5 B) 5-18 C) 18-25 D) 25-41 cm.....	71
Figura 14 – Relação logarítmica entre K_{ar} e ε_{ar} para solo na área de influência dos componentes do SAF (arbustivo, arbóreo, agrícola) e regeneração natural nos horizontes de 0-5 cm (A), 5-18 cm (B), 18-25 (C) e 25-41 (D).....	75

Figura 15 – Teste de comparação da porosidade total entre: (a) Comparação entre componentes vegetais e área de regeneração natural dentro da mesma profundidade. (b) Comparação entre profundidades dentro do mesmo componente vegetal.....	78
Figura 16 – Distribuição da porosidade segundo a forma e o tamanho dos poros de três profundidades de um LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico na área de influência de <i>L. leucocephala</i> e as imagens binárias correspondentes.....	82
Figura 17 – Distribuição da porosidade segundo a forma (arredondados; alongados; complexos) e o tamanho (pequeno: 0,001-0,01mm ² , médio: 0,01- 0,1mm ² , grande: >0,1mm ² .) de três profundidades de um LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico na área de influência de <i>P. pyramidalis</i> e as imagens binárias correspondentes.....	84
Figura 18 – Distribuição da porosidade segundo a forma e o tamanho dos poros de três profundidades de um LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico na área de influência de <i>Zea mays</i> e as imagens binárias correspondentes.....	86
Figura 19 – Distribuição da porosidade segundo a forma e o tamanho dos poros de três profundidades de um LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico em área de regeneração natural e as imagens binárias correspondentes.....	88
Figura 20 – Curva característica de água no solo na área de influência dos componentes vegetais do SAF (arbustivo, arbóreo, agrícola) e regeneração natural nos horizontes de 0-5 cm (A), 5-18 cm (B) 18-25 cm (C) e 25-41 cm (D).....	89

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Granulometria, fósforo assimilável e carbono orgânico nos quatro perfis de estudo, Sobral-CE.....	32
Tabela 2 – Análises químicas dos quatro perfis de estudo, Sobral-CE.....	33
Tabela 3 – Definição das classes de forma dos poros.....	45
Tabela 4 – Descrição morfológica dos quatro perfis estudados.....	47
Tabela 5 – Consistência dos quatro perfis estudados.....	49
Tabela 6 – Resumo da ANOVA para os atributos químicos: pH, alumínio (Al), sódio (Na), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), porcentagem de saturação por sódio (PST) e nitrogênio (N).....	50
Tabela 7 – Comparação de médias para as variáveis: pH, alumínio (Al), sódio (Na), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), porcentagem de saturação por sódio (PST) e nitrogênio (N) para o fator profundidade.....	51
Tabela 8 – Comparação de médias para as variáveis: pH, alumínio (Al), sódio (Na), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), porcentagem de saturação por sódio (PST) e nitrogênio (N) para o fator profundidade.....	52
Tabela 9 – Resumo da ANOVA para os atributos químicos: cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), fósforo (P).....	53
Tabela 10 – Teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ em função das espécies vegetais e das profundidades.....	54
Tabela 11 – Resumo da ANOVA para fósforo total no solo.....	57
Tabela 12 – Teores de P em função das espécies vegetais e das profundidades do solo.....	58
Tabela 13 – Resumo da ANOVA para carbono orgânico total no solo.....	58
Tabela 14 – Resumo da ANOVA para densidade do solo.....	61
Tabela 15 – Resumo da ANOVA para macro e microporosidade do solo.....	63
Tabela 16 – Comparação de médias entre os componentes vegetais e profundidade (fatores isolados), para macroporosidade do solo.....	64
Tabela 17 – Resumo da ANOVA para resistência do solo à penetração.....	66
Tabela 18 – Resumo da ANOVA para permeabilidade do solo intrínseca ao ar.....	69
Tabela 19 – Comparação de médias para permeabilidade do solo intrínseca ao ar.....	69
Tabela 20 – Resumo da ANOVA para índice de continuidade de poros (K_1).....	73
Tabela 21 – Comparação de médias para índice de continuidade de poros (K_1) para as tensões	

de 2, 6, 10, 33 e 100 KPa.....	74
Tabela 22 – Médias dos parâmetros da regressão do modelo $\log K_{ar} = \log M + N$ e porosidade bloqueada (ϵ_b), no solo na área de influência dos componentes vegetais nas profundidades 0-5, 5-18, 18-25 e 25-41 cm.....	74
Tabela 23 – Resumo da ANOVA para índice S.....	76
Tabela 24 – Comparação de médias entre as profundidades 0-5 cm, 5-18 cm, 18-25 cm e 25-41 cm para índice S.....	77

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	17
2.1 Bioma Caatinga e os impactos das atividades antrópicas	17
2.2 Degradação dos solos do semiárido brasileiro	18
2.3 Sistemas agroflorestais (SAFs): Alternativa de sistema de produção para o semiárido.....	20
2.3.1. Sistemas Agrossilvipastoris no semiárido	21
2.3.2 Espécies vegetais e qualidade do solo em Sistemas Agrossilvipastoris.....	22
2.4 Indicadores de qualidade química.....	24
2.5 Indicadores de qualidade física	25
2.5.1 Densidade do solo	25
2.5.2 Porosidade do solo.....	26
2.5.3 Resistência do solo à penetração	27
2.5.4 Curva característica de água no solo.....	27
2.5.5 Índice S.....	28
3 MATERIAL E MÉTODOS	29
3.1 Localização e caracterização da região e área de estudo	29
3.3 Coleta das amostras para análises químicas	33
3.4 Atributos químicos analisados.....	35
3.4.1 pH.....	35
3.4.2 Carbono orgânico total (COT).....	35
3.4.3 Nitrogênio total.....	35
3.4.4 Acidez potencial (H+Al).....	35
3.4.5 Cálcio (Ca) e magnésio (Mg)	35
3.4.6 Fósforo (P), potássio (K) e sódio (Na)	36
3.4.7 Capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%) e porcentagem de saturação por sódio (PST).....	36
3.6 Coleta das amostras para análises físicas	36
3.7 Atributos físicos analisados.....	37
3.7.1 Densidade de partículas	37
3.7.2 Densidade do solo	38
3.7.3 Porosidade.....	38
3.7.4 Curva característica de água no solo.....	38

3.7.5 Resistência à penetração (RP).....	39
3.7.6 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar	39
3.7.7 Índice de continuidade de poros	40
3.8 Coleta das amostras para análises micromorfológicas.....	41
3.9 Procedimentos laboratoriais para micromorfologia	42
3.9.1 Secagem das amostras.....	42
3.9.2 Impregnação	42
3.9.3 Corte e montagem dos blocos impregnados.....	43
3.10 Porosidade do solo pelo método de análise de imagens	43
3.11 Análise estatística	46
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1 Descrição morfológica	47
4.2 Atributos químicos.....	50
4.2.1 pH, alumínio (Al ³⁺), sódio (Na ⁺), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), porcentagem de saturação por sódio (PST) e nitrogênio (N)	50
4.2.2 Cálcio (Ca ²⁺), magnésio (Mg ²⁺), potássio (K ⁺), soma de bases (SB) e capacidade de troca catiônica (CTC)	53
4.2.3 Fósforo total (P).....	57
4.2.4 Carbono orgânico total	58
4.3 Atributos físicos do solo.....	60
4.3.1 Densidade do solo	60
4.3.2 Macro e microporosidade.....	63
4.3.3 Resistência do solo à penetração	66
4.3.4 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar	68
4.3.5 Índices de continuidade de poros.....	72
4.3.6 Índice S.....	76
4.3.7 Porosidade do solo pelo método da análise de imagens	77
4.3.8 Porosidade segundo forma e tamanho dos poros	81
4.3.9 Curva característica de água no solo.....	89
5 CONCLUSÕES.....	92
REFERÊNCIAS	93
ANEXOS	105

1 INTRODUÇÃO

A ausência de práticas conservacionistas tem ocasionado degradação, afetando atributos físicos, químicos e biológicos dos solos na região semiárida nordestina. Neste sentido, estudos devem destacar o uso de sistemas de manejo que gerem aumento da qualidade do solo, como os sistemas agroflorestais (SAFs). Esses sistemas consistem no cultivo de árvores e culturas, além da criação de animais em uma combinação que promove sistemas de uso da terra que são estrutural e funcionalmente mais complexos, com maior eficiência de captação e utilização de recursos do que o uso convencional das terras.

Dentre os sistemas agroflorestais, destaca-se o sistema agrossilvipastoril que envolve, espacial e temporalmente, culturas de interesse agrícola, animais, árvores e arbustos. Essa diversidade de componentes contribui para melhorias em atributos do solo, enfatizando-se a contribuição dos componentes vegetais pela sua atividade radicular, deposição de matéria orgânica e proteção do solo. Admitindo-se que há contribuições diferenciadas, torna-se importante o estudo de cada componente vegetal e seu impacto em atributos do solo, visando obter subsídios para exploração sustentável do bioma Caatinga, bem como a elaboração de estratégias de recuperação de áreas degradadas e em processo de degradação.

Para avaliar os atributos do solo e verificar suas alterações mediante crescimento e desenvolvimento das plantas, é necessário o uso de indicadores de qualidade do solo, dentre os quais destacam-se os atributos químicos (N, P, K, Ca, Mg, CTC, V%), físicos (densidade do solo, resistência à penetração, permeabilidade intrínseca do solo ao ar, curva característica de água no solo) e a análise micromorfométrica dos poros. Esta última quantifica o espaço poroso, distribuição dos poros, forma e tamanho dos poros, permitindo avaliar as modificações estruturais do solo.

Com base no exposto, aventou-se a hipótese de que componentes vegetais (arbustivo, arbóreo e agrícola) possuem efeitos diferenciais na fertilidade e estrutura do solo sob sistema agrossilvipastoril no semiárido cearense: 1) O cultivo do componente agrícola proporciona aumento de densidade, redução de porosidade e de permeabilidade do solo ao ar em comparação com os componentes arbóreo e arbustivo; 2) Há benefícios na fertilidade do solo do componente agrícola devido a adição de resíduos de poda do componente arbustivo e de esterco; 3) O solo do componente arbustivo apresenta redução de fertilidade devido à retirada de biomassa para adubação verde no componente agrícola; 4) O componente arbóreo proporciona maior teor de matéria orgânica no solo, maior porosidade, maior permeabilidade do solo ao ar e maior continuidade de poros no solo.

Objetivou-se avaliar a diferença em atributos químicos, físicos e morfológicos do solo, bem como distribuição do espaço poroso, formato e tamanho dos poros de um LUVISSOLO na área de influência de componentes vegetais – arbustivo (*Leucaena leucocephala*), arbóreo (*Poincianera pyramidalis*), agrícola (*Zea mays*) sob sistema agrossilvipastoril e em área de regeneração natural na região no semiárido.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Bioma Caatinga e os impactos das atividades antrópicas

A Caatinga, o bioma predominante no semiárido brasileiro, cobre cerca de 80% de sua área geográfica, o equivalente a cerca de 800 mil km². Conhecida também como sertão, agreste, cariri, seridó, carrasco – denominações populares para as diferentes formações vegetais do bioma –, abrange os estados da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará, Piauí e norte de Minas Gerais. Originado do tupi-guarani, o termo é tradicionalmente interpretado como mata (caa) branca (tinga) (ARAÚJO FILHO, 2013).

Exclusivamente brasileiro, o bioma Caatinga ocupa cerca de 11% do país, sendo o principal ecossistema/bioma da região nordeste. Trata-se do bioma semiárido mais biodiverso do mundo (BRASIL, 2014).

As Caatingas podem ser caracterizadas como florestas arbóreas ou arbustivas, compreendendo principalmente árvores e arbustos baixos muitos dos quais apresentam espinhos, microfilia e algumas características xerofíticas. A natureza semiárida da Caatinga resulta principalmente da predominância de massas de ar estáveis empurradas para o sudeste pelos ventos Alísios, que têm sua origem na ação do anticlone do Atlântico sul (PRADO, 2003).

Conforme Araújo Filho (2002), p.45:

As regiões semiáridas são caracterizadas por terem altas temperaturas, reduzida pluviosidade, solos pouco intemperizados e pequena produção de fitomassa. Somando-se a essas condições edafoclimáticas, observa-se, no semiárido brasileiro, a adoção de sistemas agrícolas totalmente extrativistas. Na pecuária, o que sobressai é o superpastoreio. A agricultura é desenvolvida à custa de um desmatamento indiscriminado, queimadas e períodos de pousio inadequados. Há ainda intensa extração de lenha e madeira para atender à demanda familiar, de cerâmicas e padarias, contribuindo enormemente para a redução da vegetação da Caatinga.

Existentes pressões humanas são ameaças à persistência das espécies no bioma, e a situação pode ser agravada com cenários de mudanças climáticas previstas (ou seja, mais seco e quente), podendo tornar a Caatinga um deserto (SALAZAR *et al.*, 2007), com consequências preocupantes para a biodiversidade e para as populações que habitam a região.

A combinação de pressão antrópica e aridez levou à extrema degradação de grandes extensões de Caatinga, dando origem aos chamados núcleos de desertificação. Assim, meios de preservação da biodiversidade e do desenvolvimento de estratégias sustentáveis na Caatinga são urgentes (SILVA *et al.*, 2014).

Devido a fatores naturais associados a atividade antrópica, essas regiões se tornam extremamente frágeis, tanto do ponto de vista ambiental como socioeconômico (SHARMA *et al.*, 2005). Como consequência, grandes áreas da região do semiárido brasileiro foram degradadas e, em alguns casos, afetadas por um estágio avançado de desertificação (SOUSA *et al.*, 2012).

Cerca de 27 milhões de pessoas vivem atualmente na área original da Caatinga, sendo que 80% de seus ecossistemas originais já foram alterados, principalmente por meio de desmatamentos e queimadas em um processo de ocupação que começou nos tempos do Brasil colônia. Grande parte da população que reside em área de Caatinga é carente e precisa dos recursos da sua biodiversidade para sobreviver. Por outro lado, estes mesmos recursos, se conservados e explorados de forma sustentável, podem impulsionar o desenvolvimento da região (BRASIL, 2014).

A utilização racional dos recursos naturais de determinada região pressupõe o conhecimento de sua real capacidade de suporte, bem como da vulnerabilidade e manejo adequado desses recursos, a fim de mantê-los sempre produtivos (CEARÁ, 2010). Diante desse quadro, opções racionais de uso e recuperação dessas áreas devem ser estudadas, visando aperfeiçoar alternativa viável para os diferentes ecossistemas do semiárido brasileiro.

2.2 Degradação dos solos do semiárido brasileiro

A degradação do solo resulta de processos naturais que podem ser induzidos ou catalisados pelo homem. O processo de degradação dos solos produz a deterioração da cobertura vegetal, recursos hídricos e ecológicos. Por meio de uma série de processos físicos, químicos e hidrológicos essa deterioração provoca a destruição tanto do potencial biológico das terras quanto da capacidade das mesmas em sustentar a população a ela ligada (ACCIOLY, 2014).

A região semiárida nordestina possui solos pouco desenvolvidos, mineralmente ricos, pedregosos, pouco espessos e com reduzida capacidade de retenção da água, fator limitante à produção nessa região. Predominam solos pouco a moderadamente desenvolvidos, principalmente das classes dos Luvisolos, Planossolos e Neossolos Litólicos (OLIVEIRA, 2009), solos nos quais o binômio algodão-pecuária, juntamente com a exploração da vegetação para produção de lenha, madeira e carvão, foram os principais agentes de degradação (SÁ *et al.*, 1994).

A zona semiárida do Estado do Ceará, corresponde a 86,8% de seu território e insere-se na porção do semiárido nordestino com as maiores limitações de solo. Considera-se que o Ceará, em termos geológicos, é formado predominantemente por rochas do embasamento cristalino, acarretando, assim, sérias limitações na disponibilidade de água subterrânea, já que o armazenamento d'água no embasamento cristalino é restrito. Outro fator a considerar é a predominância de solos rasos que, por suas características físicas, químicas, morfológicas e mineralógicas, são bastante susceptíveis à erosão (CEARÁ, 2010).

Esses solos estão sofrendo processo intenso de desertificação devido à substituição da vegetação natural por culturas, de modo que o preparo de áreas agrícolas envolve, principalmente, as queimadas. O desmatamento e as culturas irrigadas estão levando à salinização dos solos, aumentando ainda mais a evaporação da água neles contida e acelerando o processo de desertificação (GARDA, 1996).

Outro problema associado à degradação de solos é a redução no conteúdo de matéria orgânica, com efeito negativo principalmente sobre a CTC, disponibilidade de nutrientes, estabilidade de agregados e atividade microbiana (BAYER; MIELNICZUK, 1999).

Nesse contexto, as áreas semiáridas do Brasil representam um desafio para o aumento da produtividade e a melhoria dos recursos naturais devido às suas características de incertezas nas precipitações, fertilidade dos seus solos e pressões populacionais em ambiente tipicamente frágil (ACCIOLY, 2014).

Embora a degradação do solo em regiões semiáridas do Brasil seja reconhecida como um grande problema, os esforços de pesquisa ainda precisam avaliar aspectos biológicos, físicos e químicos como um todo. A estimativa da degradação do solo deve considerar a integração complexa de fatores, funcionalmente dinâmicos, com objetivo de caracterizar o estado atual do solo, prever os caminhos de sua transformação e propor procedimentos adequados para recuperação, bem como monitorar e avaliar os impactos antropogênicos (NORTCLIFF, 2002).

As alterações provocadas pelos diferentes usos do solo na região semiárida, que apresenta características de solos e clima peculiares, devem ser estudadas para a proposição de modelos sustentáveis maximizando a produção e evitando degradação dos recursos naturais (CORRÊA *et al.*, 2009).

2.3 Sistemas agroflorestais (SAFs): Alternativa de sistema de produção para o semiárido

Tendo em vista que a degradação dos solos afeta a sustentabilidade do agroecossistema inteiro, as práticas de conservação do solo surgem como importantes ferramentas no planejamento agroambiental. Dentro desse contexto, os sistemas agroflorestais (SAFs) podem ser uma alternativa viável para os diferentes ecossistemas do trópico semiárido brasileiro (AGUIAR *et al.*, 2006).

Sistemas agroflorestais consistem no cultivo de árvores, culturas e, por vezes, animais em uma combinação que interage e cria sistemas de uso da terra que são estrutural e funcionalmente mais complexos, com maior eficiência de captação e utilização de recursos (nutrientes, luz e água) do que a gestão tradicional das terras (SILVA, 2011). Esses sistemas requerem poucos insumos externos, têm uma alta taxa de reciclagem e uma boa integração de árvores, culturas e animais, tornando-os bons candidatos para a realização de objetivos que referem-se à subsistência sustentável e às mudanças climáticas (KOOHAFKAN, 2012).

Por existirem diferentes modelos de SAFs, esses podem ser agrupados considerando três componentes básicos do sistema: espécies lenhosas perenes (geralmente árvores) espécies herbáceas ou culturas e animais. Assim, podem ser descritos três tipos básicos de sistemas agroflorestais: sistemas silviagrícolas (árvores e culturas), sistemas silvipastoris (árvores, pastagens e animais) e sistemas agrossilvipastoris (árvores, culturas, pastagens e animais) (NAIR, 1991; OLIVEIRA NETO *et al.*, 2010).

De acordo com Araújo Filho (2013), p. 152:

Os diferentes modelos de SAF podem ser implantados nas mais diversas situações, tanto em áreas que ainda mantêm elevado potencial produtivo, como naquelas em estado de degradação. Nesse sentido, os sistemas agroflorestais proporcionam excelentes alternativas para recuperação ecológica e econômica de ecossistemas degradados. Isso porque a tecnologia do SAF se fundamenta no incremento e na conservação do aporte de matéria orgânica, viabiliza a proteção do solo contra a erosão, incrementa a atividade biológica do solo, além de proporcionar condições para o restabelecimento da circulação de nutrientes.

Os SAFs adaptam-se muito bem ao esquema de produção da agricultura familiar por potencializarem o uso da mão-de-obra disponível na propriedade, assim como a diversificação e integração dos policultivos que são extremamente benéficos às condições socioculturais dos produtores familiares. Esses sistemas também constituem alternativa para minimizar a degradação ambiental, uma vez que há melhor utilização dos recursos naturais disponíveis (nutrientes, água e luz) e o componente arbóreo geralmente contribui para proteção

e melhoria das condições de solo, com aumento da ciclagem de nutrientes e diminuição da erosão (MONTAGNINI *et al.*, 1992).

Agroflorestas têm potencial para melhorar a fertilidade do solo. Isso baseia-se principalmente no aumento da matéria orgânica do solo e fixação biológica de nitrogênio por leguminosas arbóreas. As árvores também facilitam ciclagem de nutrientes mais do que os sistemas de monocultivo e enriquecem o solo com nutrientes e matéria orgânica (LEHMANN *et al.*, 1998) melhorando, dessa forma, as propriedades estruturais do solo.

Diante destes diversos benefícios, tem-se procurado comprovar a contribuição dos SAFs na conservação por meio de indicadores de qualidade do solo (BROWN *et al.*, 2006). Ketema e Yimer (2014) constataram melhorias nas propriedades do solo sob sistema agroflorestal quando comparado com sistema convencional, sendo justificado pela maior entrada de matéria orgânica e menor revolvimento do solo.

2.3.1. Sistemas Agrossilvipastoris no semiárido

O modelo de integração lavoura-pecuária-floresta, conhecido como sistema agrossilvipastoril, constitui prática agroflorestal planejada para obter benefícios das interações biológicas entre os componentes do sistema. Além disso, o modelo pode possibilitar aumento de renda na propriedade pela exploração econômica de mais de um produto comercializável (PACIULLO *et al.*, 2011).

Para o semiárido brasileiro, o sistema de produção que poderá ser silvipastoril ou agrossilvipastoril, deve ter por objetivos: fixação da agricultura, adequação do manejo pastoril, racionalização da extração madeireira e forte integração dessas três atividades (ARAÚJO FILHO, 2013).

Os sistemas de produção agrossilvipastoris, que integram a exploração de lenhosas perenes com culturas e pastagem, vêm sendo propostos como alternativas ecologicamente sustentáveis de exploração das regiões tropicais (ALTIERI, 1995).

Os modelos de sistema agrossilvipastoril incluem:

Roçado ecológico – Consórcio de leguminosas forrageiras plantadas em aleias, culturas e animais. Funciona em uma sequência temporal, ou seja, na época das chuvas é usado para cultivos alimentares, adubo verde e feno, enquanto que na época seca é submetido ao pastejo controlado. Seus produtos mais importantes são grãos, feno e mel; os serviços prestados ao

agroecossistema consistem na proteção do solo, deposição de matéria orgânica e manutenção da fertilidade do solo.

Quintais produtivos com animais – Semelhante aos quintais produtivos dos sistemas agrossilviculturais, mas associados com animais, tais como cabras leiteiras, galinhas e patos (ARAÚJO FILHO, 2013).

Os sistemas agrossilvipastoris desenvolvidos para a região semiárida ajudam na fixação da agricultura com a eliminação das queimadas e do desmatamento e com o aporte de matéria orgânica; promovem a adequação do manejo pastoril por meio do ajuste da taxa de lotação; melhoram o manejo da vegetação nativa; e causam a racionalização da extração de madeira, por meio do corte seletivo, manejo das rebrotações e a redistribuição dos nutrientes no agroecossistema (CARVALHO, 2003)

O sistema agrossilvipastoril apresenta-se como um dos mais compatíveis e viáveis para o ambiente ecológico, econômico e cultural do semiárido. Assim, esse modelo de exploração, focado em pequenos animais e adotado por agricultores familiares, parece ser o caminho com maiores possibilidades de sucesso (CEARÁ, 2010a).

Apesar das muitas vantagens, a adoção dos sistemas agroflorestais na região Nordeste ainda é limitada, sendo necessários mais estudos, visando obter subsídios para a utilização de recursos de modo que haja conservação do agroecossistema.

2.3.2 Espécies vegetais e qualidade do solo em Sistemas Agrossilvipastoris

A arborização característica dos SAFs tem efeito marcante no clima, na conservação dos mananciais e na manutenção da qualidade da água pela retenção dos sedimentos. No primeiro caso, a presença das árvores ameniza a temperatura, purifica o ar e aumenta a taxa de vapor de água na atmosfera, com efeitos benéficos sobre a ocorrência de chuvas (ARAÚJO FILHO, 2013).

Em sistema agrossilvipastoril há influência do componente arbóreo sobre a maioria das características do pasto, conforme seu distanciamento ao renque de árvores (PACIULLO *et al.*, 2011). Árvores têm, muitas vezes, sistemas radiculares profundos e produzem mais resíduos do que os outros tipos de cobertura, aumentando o teor de matéria orgânica do solo e melhorando a retenção de água. Isso também aumenta a porosidade do solo e facilita a infiltração de água (ILSTEDT *et al.*, 2007).

Árvores ajudam a recuperar nutrientes, conservar a umidade do solo e melhorar a matéria orgânica do solo (DUGUMA, 2011). De acordo com Nguyen (2013), o uso de árvores multifuncionais e abordagens integradas podem melhorar a rentabilidade dos sistemas agroflorestais. Assim, um desafio científico crescente relaciona-se com os métodos e ferramentas para avaliar as árvores úteis em vários contextos humanos e ecológicos.

A presença de árvores, juntamente com perturbação mínima do solo, melhora a maioria das propriedades do solo como os teores de matéria orgânica, agregação, infiltração de água e diminuição da densidade (ROMANECKAS *et al.*, 2009).

Já as gramíneas perenes, por apresentarem maior densidade de raízes e melhor distribuição do sistema radicular no solo, favorecem as ligações dos pontos de contato entre partículas minerais e agregados, contribuindo para sua formação e estabilidade; além disso, podem ser usadas como plantas recuperadoras da estrutura do solo em áreas degradadas (SILVA; MIELNICZUK, 1997).

As gramíneas contribuem nos processos de formação e estabilização de agregados do solo, devido à alta densidade de suas raízes que causa a aproximação de partículas pela constante absorção de água do solo, como também às recorrentes renovações do sistema radicular e à uniforme distribuição dos exsudados orgânicos ao solo que estimulam a atividade microbiana, cujos subprodutos também atuam na estabilização dos agregados (WOHLENBERG, 2004).

Na literatura são encontrados exemplos dos efeitos de espécies arbóreas, arbustivas e gramíneas em atributos do solo. A incorporação da biomassa de *Gliricidia sepium* e de *Leucaena leucocephala* em solos dos tabuleiros costeiros promoveu melhorias em características químicas (Ca, Mg e pH) e físicas (densidade e macroporosidade), principalmente em menores profundidades (BARRETO; FERNANDES, 2001). Radomski e Ribaski (2012), estudando a fertilidade do solo em diferentes posições em relação ao renque de árvores em sistema silvipastoril, verificaram que não houve diferença na fertilidade do solo em função das distâncias avaliadas, apenas uma tendência a maiores valores de C, P, K, Ca e Mg na camada de 0-2,5 cm nos pontos mais próximos às arvores, favorecendo a capacidade de troca de cátions (valor T) e a saturação por bases (V%), em relação à área sem arborização.

Pezzoni *et al.* (2012), estudando a influência de árvores de *Pterodon emarginatus* nos atributos do solo em sistema silvipastoril, confirmam a contribuição da serrapilheira com volume de material orgânico três vezes maior na área de abrangência das árvores do que a trinta metros de distância. Os autores observaram que o acúmulo de serrapilheira sob as árvores pode favorecer os atributos químicos e físicos do solo, interferindo no desenvolvimento da gramínea.

2.4 Indicadores de qualidade química

Em sistemas agroflorestais, os resíduos vegetais são aportados no solo como restos de culturas, poda residual de árvores e serapilheira. Esses resíduos vegetais são fontes de nutrientes e matéria orgânica e, quando se decompõem, podem contribuir para a manutenção da fertilidade do solo (ZENG *et al.*, 2010). A aplicação de esterco e o cultivo em aleias nas áreas de agricultura constituem boa alternativa para melhoria da fertilidade do solo, corroborando com acréscimo da produção, sobretudo, para agricultores familiares (SOUZA *et al.*, 2014).

Para avaliar os benefícios proporcionados pelas espécies vegetais na fertilidade do solo sob sistema agrossilvipastoril, é necessário o uso de indicadores de qualidade química. Dentre os principais indicadores químicos da qualidade do solo, destacam-se: pH, carbono (CO) orgânico, CTC efetiva, nitrogênio (N) do solo e demais nutrientes disponíveis às plantas (potássio - K, fósforo - P, cálcio - Ca e magnésio - Mg).

O pH exerce influência sobre a absorção dos nutrientes pela planta (GOMES; FILIZOLA, 2006). Em termos de qualidade química do solo, o aumento do pH pode favorecer processos de mineralização da matéria orgânica, nitrificação e fixação biológica do nitrogênio (MENGEL *et al.*, 2001). Contudo, pH alcalino pode interferir no desenvolvimento das culturas devido à redução na disponibilidade de micronutrientes (HE *et al.*, 2005)

Quanto ao carbono orgânico total (COT), quando seus teores são baixos podem haver prejuízos à produtividade das culturas em razão de seu efeito na estrutura, na disponibilidade de água para as plantas e devido ao seu poder de tamponamento frente a presença de compostos muitas vezes tóxicos às plantas (GOMES; FILIZOLA, 2006). Na região semiárida, alguns autores (TIESSSEN *et al.*, 1992, 1998; FRAGA; SALCEDO, 2004) observaram que a substituição da vegetação nativa da Caatinga por culturas agrícolas ocasionou decréscimo de 40 a 50 % nos teores de C do solo. Em estudo realizado por Baah-Acheamfour *et al.* (2014), foi constatado que o uso de componente florestal proporcionou maior carbono orgânico total no solo do que componente agrícola.

A CTC é um indicador de qualidade química do solo pelo fato de indicar a quantidade de cátions retidos na superfície das argilas (GOMES; FILIZOLA, 2006).

Para o componente arbóreo, autores mencionam a contribuição de tecidos subterrâneos para a manutenção dos nutrientes no solo e conseqüentemente, para sua fertilidade (CARRANCA *et al.*, 2015). Também há contribuição do componente arbóreo na ciclagem de nutrientes pela fixação biológica de N, em casos de leguminosas simbiotes. Foram constatados

aumento nos teores de nitrogênio em sistema agroflorestal no semiárido, sendo atribuído ao aporte de matéria orgânica e maior permanência desse material no solo (IWATA *et al.*, 2012).

O P é um elemento limitante da prática da agricultura, devido aos baixos teores encontrados nos Estados nordestinos de modo geral (SAMPAIO *et al.*, 1995). As concentrações de P em solos da Paraíba e Pernambuco extraídas por Mehlich 1 em amostras de solo apresentaram elevada variação (1 a 202 mg kg⁻¹) (SILVEIRA *et al.*, 2006), sendo o conteúdo de P no solo afetado principalmente por fatores como material de origem, clima, organismos e processos biogeoquímicos no solo, e a sua distribuição tem grande heterogeneidade espacial (LANE *et al.*, 2011).

2.5 Indicadores de qualidade física

Os atributos físicos do solo são bons indicadores de sua qualidade e permitem o monitoramento de áreas que sofreram algum tipo de interferência, determinando o melhor uso que provoca menor degradação (ARSHAD *et al.*, 1996). A estrutura pode ser avaliada por meio da densidade do solo, porosidade, resistência à penetração e infiltração da água no solo. Esses atributos indicam o efeito do manejo, sendo de fácil mensuração, com respostas rápidas e de razoável precisão (CAMPOS *et al.*, 1995).

2.5.1 Densidade do solo

A densidade do solo é a razão entre a massa de uma amostra de solo seca a 105-110 °C e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros (KIEHL, 1979). O conhecimento da densidade pode constituir importante indicativo das condições de manejo de determinado solo (FERREIRA, 2010). A densidade do solo tem sido usada como medida da qualidade do solo devido às suas relações intrínsecas com outros atributos, como porosidade, umidade do solo, condutividade hidráulica, entre outros.

Densidade é frequentemente considerada como um parâmetro útil da estrutura do solo, e é usada como um indicador de compactação do solo porque está diretamente relacionada à porosidade total. (HAMBLIN, 1987). De acordo com Klein (2008), os valores de densidade dos solos agrícolas variam de 0,9 a 1,8 g cm⁻³, dependendo da textura e do teor de matéria orgânica do solo. Utilizando o conteúdo de argila como referência, Reinert, Reichert e Silva (2001) propuseram valores críticos de densidade do solo, sendo de 1,45 g cm⁻³ para solos com

mais de 55% de argila, $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ para solos com teor de argila entre 20 e 55% de argila e $1,65 \text{ g cm}^{-3}$ para solos com menos de 20% de argila.

Além da estrutura, a densidade do solo pode estar relacionada com a textura (ARAÚJO *et al.*, 2004), pois são observados maiores valores para solos arenosos (entre $1,35$ e $1,85 \text{ kg dm}^{-3}$), enquanto nos solos argilosos essa se apresenta na faixa de $0,95$ a $1,25 \text{ kg dm}^{-3}$ (ARAÚJO *et al.*, 2004; TORMENA; ROLOFF; SÁ, 1998).

2.5.2 Porosidade do solo

A porosidade do solo é definida como o total de vazios do solo que podem ser ocupados pela água e pelo ar, dependente do seu estado físico, pois é função do arranjo ou geometria das partículas primárias e da sua composição granulométrica (KIEHL, 1979).

A formação de poros no solo pode ser oriunda de fatores abióticos (ciclos de congelamento e descongelamento, umedecimento e secagem) e bióticos (crescimento de raízes, escavação por minhocas, etc.) (KAY; VANDENBYGAART, 2002). A porosidade do solo é importante para caracterizar o armazenamento de água no mesmo e, sobretudo, o movimento desta, além do desenvolvimento de raízes das plantas. Como as partículas variam em tamanho, forma, regularidade e tendência de expansão pela água, a geometria das partículas do solo determina a quantidade de poros existentes (FERREIRA, 2010).

Richards (1965) separou o diâmetro igual a $0,05 \text{ mm}$ como limite adequado para separação entre macro ($\geq 50 \mu\text{m}$) e microporos ($< 50 \mu\text{m}$). A principal função dos macroporos, conforme Libardi (2012), é permitir o processo de aeração do solo e condução de água durante a infiltração; já a dos microporos é promover a retenção e a armazenagem de água. A macroporosidade mínima de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ é ideal para que ocorra a adequada difusão de oxigênio no solo, para o bom desenvolvimento das plantas (GRABLE; SIEMER, 1968).

A relação entre macro e microporos é responsável em parte pela capacidade do solo em reter água e disponibilizá-la às plantas. A quantidade de macroporos influencia o crescimento das raízes e a absorção de água e nutrientes por estas. Solos com reduzida macroporosidade induzem ao crescimento lateral das raízes, que diminui seus diâmetros a fim de penetrarem nos poros menores. Por outro lado, em solos excessivamente porosos pode haver menor contato solo/raiz, reduzindo a absorção de água e nutrientes pelas raízes, provocando também seu menor desenvolvimento (BEUTLER; CENTURION, 2003).

2.5.3 Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração é um fator de impedimento mecânico que o solo oferece ao desenvolvimento de raízes de plantas, afetando diretamente a produtividade das culturas (SILVA *et al.*, 2008). Esta é influenciada diretamente pela densidade do solo, proporcionando um indicativo do estado de compactação do solo, sendo variável com o conteúdo de umidade, textura e estrutura do solo (IMHOFF; SILVA; TORMENA, 2000).

A resistência do solo à penetração é um parâmetro útil na avaliação da qualidade física do solo, pois permite identificar áreas com resistência mecânica potencialmente limitante ao crescimento das raízes e estabelecer a umidade e a densidade do solo críticas para o desenvolvimento das plantas (IMHOFF; SILVA; TORMENA, 2000).

O valor de 2 MPa tem sido frequentemente considerado como crítico, sendo utilizado no conceito do intervalo hídrico ótimo (SILVA; KAY; PERFECT, 1994; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998). No entanto, há indicações de culturas que se desenvolvem normalmente até valores superiores a 3,0 MPa (BEUTLER; CENTURION, 2003), assim como há plantas que já sofrem limitações em valores de 1,4 MPa (FOLONI; CALONEGO; LIMA, 2003).

2.5.4 Curva característica de água no solo

A curva característica de água no solo pode ser considerada um indicador que pode ser usado na avaliação da qualidade do solo, por estar relacionada com as funções de retenção e transporte de água (DORAN; PARKIN, 1994). É essencial em estudos de qualidade do solo com vistas a orientar as práticas de uso e o manejo sustentável dos sistemas de produção agrícola. A curva característica de água no solo, portanto, é uma das principais propriedades físicas do solo e expressa a relação entre a energia com que a água está retida e o teor de água no solo (SILVA *et al.*, 2010).

A retenção de água no solo ocorre por dois processos: forças capilares e de adsorção, as quais, juntas, são chamadas forças mátricas que dão origem ao potencial mátrico do solo (LIBARDI, 2012). A partir da curva de retenção é possível quantificar o conteúdo de água que um solo pode reter dentro de determinados limites de potenciais estabelecidos. A água armazenada depende de características intrínsecas de cada solo, resultando da ação conjunta dos atributos do solo, como estrutura, textura, mineralogia e matéria orgânica (BEUTLER *et al.*, 2002).

2.5.5 Índice S

De acordo com Dexter (2004), o valor da inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão da curva característica de água do solo, é indicador de qualidade do solo. Este valor é denominado como índice S. Valores de S maiores do que 0,035 foram estabelecidos como favoráveis ao crescimento das raízes, e abaixo desse valor, como restritivos. Dessa forma, valores $> 0,035$ sugerem adequada distribuição de tamanho de poros e qualidade física do solo, independente do tipo deste, em clima temperado. Assim, fatores que modificam a distribuição do diâmetro dos poros, como o uso e manejo do solo, podem ser avaliados e comparados por esse índice.

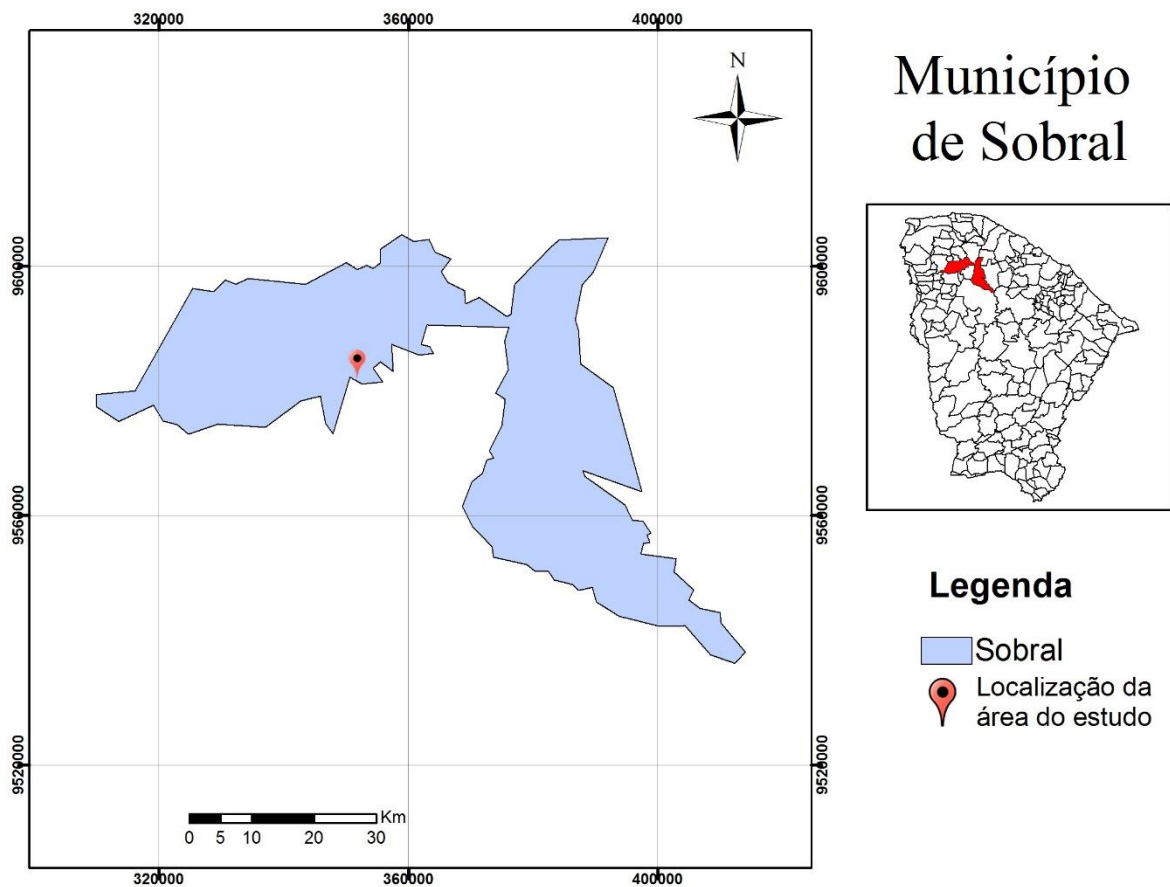
A premissa fundamental do índice S é que a qualidade física ou estrutural do solo é determinada basicamente pelos poros oriundos da estrutura do solo, ao invés de poros decorrentes da textura (REYNOLDS *et al.*, 2009). De acordo com Dexter; Czyz (2007), índices S tendem a se situar dentro do intervalo 0,007-0,14 em solos agrícolas. Contudo, convém salientar que o estabelecimento de valores fixos para a classificação de um mecanismo tão complexo, como a qualidade física do solo, tem sido uma crítica constante a este indicador (JONG VAN LIER, 2014).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da região e área de estudo

O estudo foi realizado no Centro de convivência com o semiárido, pertencente à Embrapa Caprinos e Ovinos, situada no Município de Sobral, CE (Figura 1). O município encontra-se na região semiárida cearense e está a 3° 41' S e 40° 20' W, com altitude de 69 m. O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é do tipo BShw' (CARVALHO, 2004). A vegetação predominante na região é a Caatinga, com a presença de árvores em sua maioria semidecíduas, com um extrato herbáceo de crescimento anual (CAMPANHA, 2011).

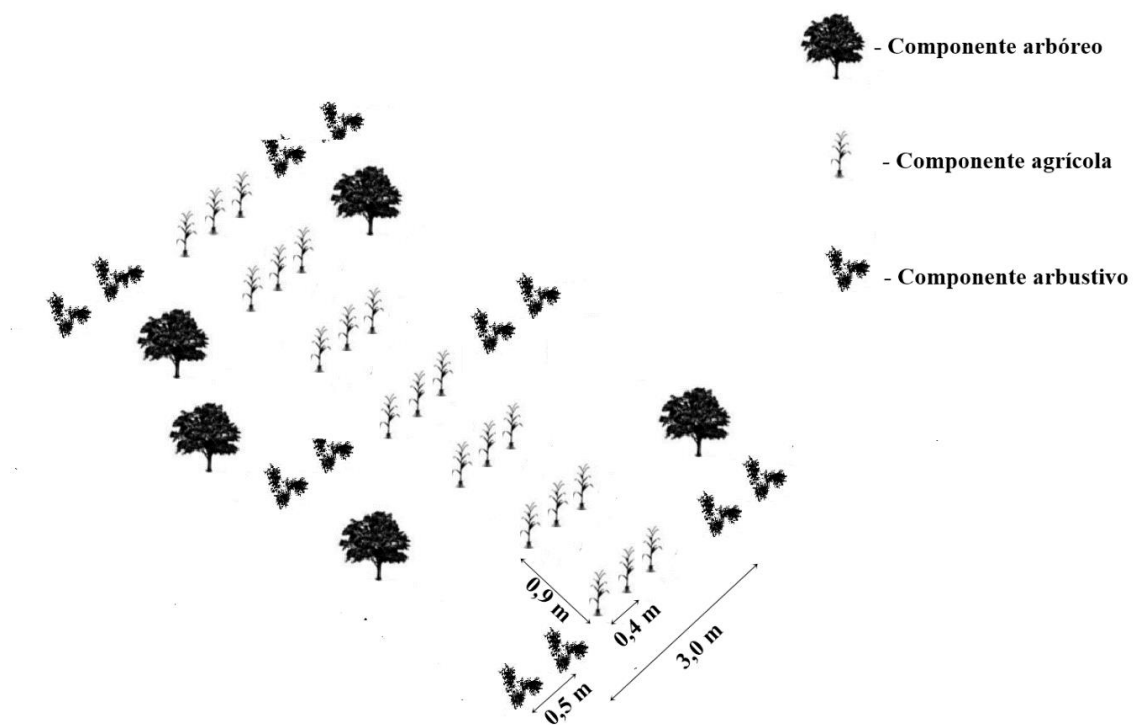
Figura 1 – Localização do Centro de Convivência com o semiárido pertencente à Embrapa Caprinos e Ovinos, Sobral-CE.



Fonte: Crisanto Dias Teixeira Filho (2016).

A área do sistema agrossilvipastoril (Figura 2) ocupa oito hectares e o sistema foi implantado em 1997. Na implantação do SAF, foi preservada uma cobertura vegetal arbórea nativa de 22%. O plantio de milho (*Zea mays*) e feijão caupi (*Vigna unguiculata*) foi feito anualmente, desde a implantação do SAF, em faixas de 3,0 m de largura, separadas por fileiras de leguminosas (*Leucaena leucocephala*), até 2006 e, a partir de 2007, foi cultivado somente milho. *Leucaena leucocephala* (leucena) do sistema agrossilvipastoril é utilizada como banco de proteína no período seco.

Figura 2– Representação do SAF do Centro de Convivência com o semiárido pertencente à Embrapa Caprinos e Ovinos, Sobral-CE.



Fonte: Autor.

Em 2014, houve cobertura com material verde na área do plantio de milho com *Leucaena leucocephala*, ou seja, foi realizada poda das leguminosas estabelecidas em linhas duplas, deixando a biomassa da poda sobre a superfície do solo.

Poincianera pyramidalis (catingueira) arbórea nativa não rebaixada, tem consumo insignificante quando verde, contudo as plantas são bem consumidas por ovinos e caprinos quando secas e estão em quantidade significativa dentro sistema agrossilvipastoril.

A área de regeneração natural selecionada para o estudo constitui-se de local com a mesma classe de solo do SAF, que está em pousio há cerca de 8 anos, contudo já foi submetida

a queimadas e recebe animais no inverno e verão. Nessa área há predomínio de vegetação arbóreo-arbustiva.

Dentro do sistema agrossilvipastoril, foi avaliado o solo na área de influência das espécies: *Zea mays* (componente agrícola) – caracteriza importante cultura alimentar em SAFs no semiárido; *Leucaena leucocephala* (leucena) – componente arbóreo-arbustivo, exótica e com potencial favorável para ser introduzida em SAFs no semiárido por ser leguminosa e por apresentar importância forrageira; *Poincianera pyramidalis* (catingueira) – componente arbóreo nativo do semiárido, apresenta importante contribuição para circulação de nutrientes em um sistema agroflorestal, considerando-se não só o elevado teor de nitrogênio em suas folhas e a rapidez com que se degradam após sua queda ao solo, como também por ser uma leguminosa simbiote (ARAÚJO FILHO, 2013). Também foi avaliado solo de área de regeneração natural, a qual já foi submetida a queimadas e que os animais entram para pastejo. Essa área situa-se próxima ao SAF, e foi escolhida de modo que tivesse similaridade entre os solos.

3.2 Caracterização química, análise granulométrica e descrição morfológica

Foram realizadas análise granulométrica, teor de fósforo assimilável, carbono orgânico (Tabela 1) bem como análises do complexo sortivo nos solos (Tabela 2) conforme Embrapa (2011) para caracterização e classificação dos solos conforme Embrapa (2013).

A descrição morfológica foi realizada conforme critérios estabelecidos em Santos *et al.* (2013).

Tabela 1 – Granulometria, argila dispersa, grau de flocculação, relação silte/argila, fósforo assimilável e carbono orgânico nos quatro perfis de estudo, Sobral-CE.

Simb. Hor	Prof. cm	Areia	-----g kg ⁻¹ -----			Arg. Disp.	Grau de Floc. %	Silte/ Argila	P assi. mg kg ⁻¹	C org. g kg ⁻¹
			Silte	Argila	Arg. Disp.					
PERFIL 1: Componente arbustivo – LUVISSOLO Crômico Órtico típico										
A1	0-5	736,5	224,9	38,6	24,4	36,79	5,83	116,76	13,01	
A2	5-18	738,5	210,1	51,4	37,4	27,24	4,09	86,74	4,99	
Bt1	18-26	600,0	191,4	208,6	139,2	33,27	0,92	23,35	3,47	
Bt2	26-41	540,0	170,4	289,6	144,8	50,00	0,59	20,02	3,22	
Bt3	41-57	561,0	148,8	290,2	159,6	45,00	0,51	22,40	2,34	
BC1	57-67	565,5	177,3	257,2	138,0	46,35	0,69	21,92	2,21	
BC2	67-90	577,0	194,2	228,8	135,6	40,73	0,85	18,11	1,33	
PERFIL 2: Componente arbóreo – LUVISSOLO Crômico Órtico típico										
A1	0-5	753,0	171,2	75,8	26,6	64,91	2,26	44,23	13,33	
A2	5-18	746,5	180,9	72,6	41,0	43,53	2,49	10,01	5,12	
Bt1	18-25	699,0	186,4	114,6	61,4	46,42	1,63	4,48	3,73	
Bt2	25-41	622,0	126,6	251,4	145,4	42,16	0,50	4,86	3,35	
Bt3	41-57	595,0	93,6	311,4	160,2	48,55	0,30	4,67	2,91	
BC1	57-67	625,5	136,1	238,4	125,6	47,32	0,57	3,53	2,21	
BC2	67-90+	650,0	131,0	219,0	114,8	47,58	0,60	4,96	1,52	
PERFIL 3: Componente agrícola – LUVISSOLO Crômico Órtico típico										
A1	0-7	715,5	211,1	73,4	28,2	61,58	2,88	33,46	10,42	
A2	7-17	672,6	210,0	117,4	70,8	39,69	1,79	7,34	5,24	
A3	17-25	676,5	235,3	88,2	57,6	34,69	2,67	10,87	6,63	
Bt1	25-41	501,0	198,0	301,0	169,8	43,59	0,66	2,86	3,47	
Bt2	41-65	593,5	222,7	183,8	126,8	31,01	1,21	5,72	4,61	
BC	65-85+	652,7	210,7	136,6	102,5	24,96	1,54	2,52	2,48	
PERFIL 4: Regeneração natural – LUVISSOLO Crômico Órtico típico										
A1	0-5	726,2	221,9	51,8	34,6	33,20	4,28	404,70	22,17	
A2	5-15	609,4	250,0	51,8	34,6	32,43	1,78	5,72	5,12	
Bt1	15-25	461,6	287,9	140,6	95,0	38,90	1,15	3,24	4,11	
Bt2	25-40	483,1	391,9	250,4	153,0	20,00	3,14	2,10	3,09	
BC1	40-60	620,4	330,0	125,0	100,0	19,35	6,65	3,34	2,08	
BC2	60-75	710,4	258,8	49,6	40,0	20,78	8,40	16,49	1,07	
BC3	75-85+	839,0	138,2	30,8	24,4	18,86	6,06	15,54	0,82	

Arg. Disp.: argila dispersa; Grau de floc.: grau de flocculação; P. assim.: fósforo assimilável; C-org: carbono orgânico total.

Fonte: Autor.

Na Tabela 2 estão contidos os resultados dos atributos químicos dos quatro perfis do estudo.

Tabela 2 – Atributos químicos dos quatro perfis de estudo, Sobral-CE.

Hor.	pH Água 1:2,5	Complexo Sortivo							CTC	V	m	PST
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al ³⁺	H ⁺				
		-----cmol _c kg ⁻¹ -----							-----%			
PERFIL 1: Componente arbustivo – LUVISSOLO Crômico Órtico típico												
A1	6,82	7,0	1,9	0,56	0,08	9,54	0,1	2,2	11,84	80,58	1,08	0,68
A2	6,86	3,8	1,2	0,41	0,04	5,45	0,1	0,9	6,45	84,49	1,88	0,6
Bt1	6,11	3,4	2,7	0,51	0,06	6,67	0,1	1,0	7,77	85,85	1,58	0,8
Bt2	5,44	3,4	3,8	0,24	0,14	7,58	0,2	3,0	10,78	70,32	2,60	1,3
Bt3	5,44	3,8	4,9	0,09	0,23	9,02	0,4	2,1	11,52	78,30	4,24	1,97
BC1	5,44	3,7	5,5	0,08	0,33	9,61	0,3	1,6	11,51	83,49	3,08	2,83
BC2	5,67	3,8	5,5	0,10	0,46	9,86	0,2	1,9	11,96	82,44	2,06	3,84
PERFIL 2: Componente arbóreo – LUVISSOLO Crômico Órtico típico												
A1	6,80	6,8	1,8	1,08	0,06	9,74	0,1	1,6	11,44	85,14	1,02	0,55
A2	6,67	4,0	1,0	0,45	0,04	5,5	0,1	0,8	6,4	85,93	1,79	0,69
Bt1	6,44	3,3	1,3	0,38	0,05	5,04	0,1	1,2	6,34	79,48	1,95	0,86
Bt2	5,48	3,2	2,4	0,22	0,14	5,96	0,4	2,7	9,06	65,79	6,29	1,59
Bt3	5,45	2,9	3,7	0,07	0,31	6,98	0,3	2,1	9,38	74,41	4,12	3,31
BC1	6,17	3,0	5,7	0,08	0,80	9,59	0,2	1,6	11,39	84,19	2,04	7,05
BC2	6,50	3,2	6,0	0,09	0,91	10,2	0,2	1,0	11,4	89,48	1,92	8,02
PERFIL 3: Componente agrícola – LUVISSOLO Crômico Órtico típico												
A1	6,48	5,9	1,5	0,53	0,11	8,03	0,1	2,0	10,13	79,27	1,23	1,05
A2	6,86	4,7	1,9	0,26	0,11	6,97	0,1	0,8	7,87	88,57	1,41	1,41
A3	6,70	5,3	2,3	0,28	0,14	8,02	0,1	1,5	9,62	83,36	1,23	1,45
Bt1	6,38	5,1	4,1	0,33	0,13	9,66	0,1	1,7	11,46	84,29	1,02	1,14
Bt2	6,24	5,1	3,0	0,23	0,12	8,45	0,1	1,7	10,25	82,44	1,17	1,13
BC	6,14	5,0	3,8	0,21	0,18	9,19	0,1	1,7	10,99	83,62	1,63	1,63
PERFIL 4: Regeneração natural – LUVISSOLO Crômico Órtico típico												
A1	6,50	6,0	3,5	0,24	0,05	9,79	0,1	1,7	11,59	84,48	1,01	0,44
A2	5,65	5,5	1,7	0,16	0,07	7,43	0,2	2,9	10,53	70,55	2,62	0,67
Bt1	5,36	7,9	3,6	0,12	0,20	11,82	0,3	3,3	15,42	76,65	2,48	1,28
Bt2	5,57	11,4	4,5	0,08	0,16	16,14	0,5	3,0	19,64	82,18	3,00	0,80
BC1	5,43	10,1	4,7	0,07	0,16	15,04	0,7	3,4	19,14	78,58	4,45	0,86
BC2	5,68	9,0	4,7	0,07	0,20	13,98	0,5	1,4	15,88	88,03	3,45	1,29
BC3	6,00	6,3	3,0	0,07	0,19	9,56	0,3	1,3	11,16	85,66	3,04	1,70

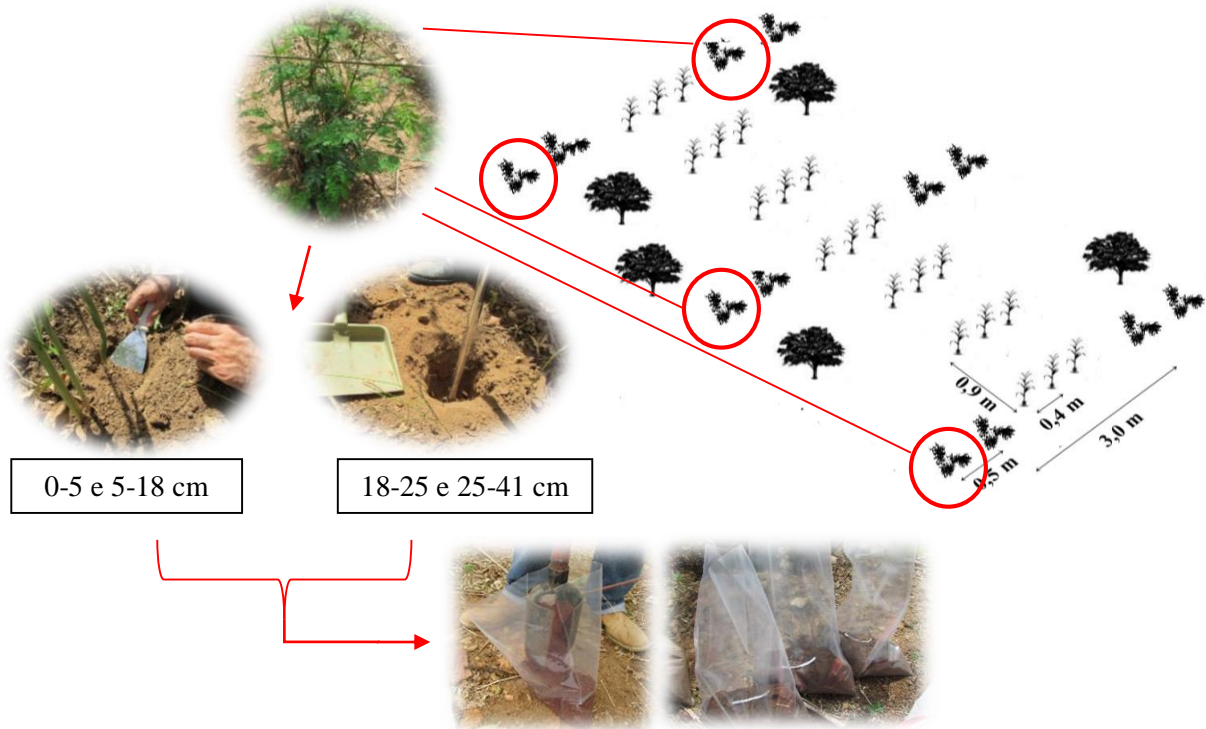
Fonte: Autor.

3.3 Coleta das amostras para análises químicas

Com o intuito de verificar se há diferenças na química do solo na área de influência dos componentes vegetais em distintas profundidades, realizou-se análises químicas do solo coletado na proximidade desses componentes, cujas amostragens foram por intermédio de minitrincheiras para as profundidades de 0-5 cm, 5-18 cm, e por tradagens nas profundidades de 18-25 cm e 25-41 cm (Figura 3). As profundidades de coleta foram determinadas de acordo

com a separação dos horizontes feitas na descrição morfológica do item 3.2. As espécies representantes dos componentes em estudo foram estabelecidas de modo aleatório na área.

Figura 3 – Exemplificação de coleta por minitrincheiras para as profundidades de 0-5 cm e 5-18 cm por tradagens para 18-25 cm e 25-41 cm, com aleatorização da espécie na área em sistema agrossilvipastoril pertencente à Embrapa Caprinos e Ovinos, Sobral, CE.



Fonte: Autor.

O primeiro fator de estudo foi constituído por três componentes vegetais do SAF (*Leucaena leucocephala* – componente arbustivo; *Poincianera pyramidalis* – componente arbóreo e *Zea mays* – componente agrícola) e área de regeneração natural. O segundo fator de estudo foi constituído pelas quatro profundidades de amostragem (0-5 cm, 5-18 cm, 18-25 cm e 25-41 cm). Foram adotadas quatro repetições, totalizando 64 amostras. Essas amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e encaminhadas para o Laboratório de Manejo do Solo da Universidade Federal do Ceará, onde foram realizadas as análises e procedimentos descritos a seguir.

3.4 Atributos químicos analisados

3.4.1 pH

Foi medido em H₂O (1:2,5) por potenciometria (EMBRAPA, 2011).

3.4.2 Carbono orgânico total (COT)

Os teores de carbono orgânico total (COT) foram determinados conforme método descrito por Yeomans e Bremner (1988), que consiste na oxidação da matéria orgânica via úmida com dicromato de potássio, em presença de H₂SO₄ e aquecimento externo, e titulação do excesso de dicromato com sulfato ferroso amoniacal.

3.4.3 Nitrogênio total

Os teores de N total foram determinados pelo método semimicro Kjeldahl, que consiste em digestão sulfúrica e destilação do digerido em meio alcalino utilizando destilador de nitrogênio semiautomático com destilação de amônia e arraste de vapor.

3.4.4 Acidez potencial (H+Al)

Foi extraída com acetato de cálcio tamponado a pH 7,0 e determinada por titulometria; alumínio (Al) trocável extraído com solução KCl 1M e determinado por titulometria (EMBRAPA, 2011);

3.4.5 Cálcio (Ca) e magnésio (Mg)

Foram extraídos com solução de KCl 1M e determinados por espectrometria de absorção atômica (EMBRAPA, 2011).

3.4.6 Fósforo (P), potássio (K) e sódio (Na)

Foram extraídos com solução Mehlich 1 ($0,05 \text{ mol L}^{-1} \text{ HCl} + 0,0125 \text{ mol L}^{-1} \text{ H}_2\text{SO}_4$) (MEHLICH, 1953). A determinação do P se deu por colorimetria, enquanto que as determinações do K e Na por fotometria de chama (EMBRAPA, 2011).

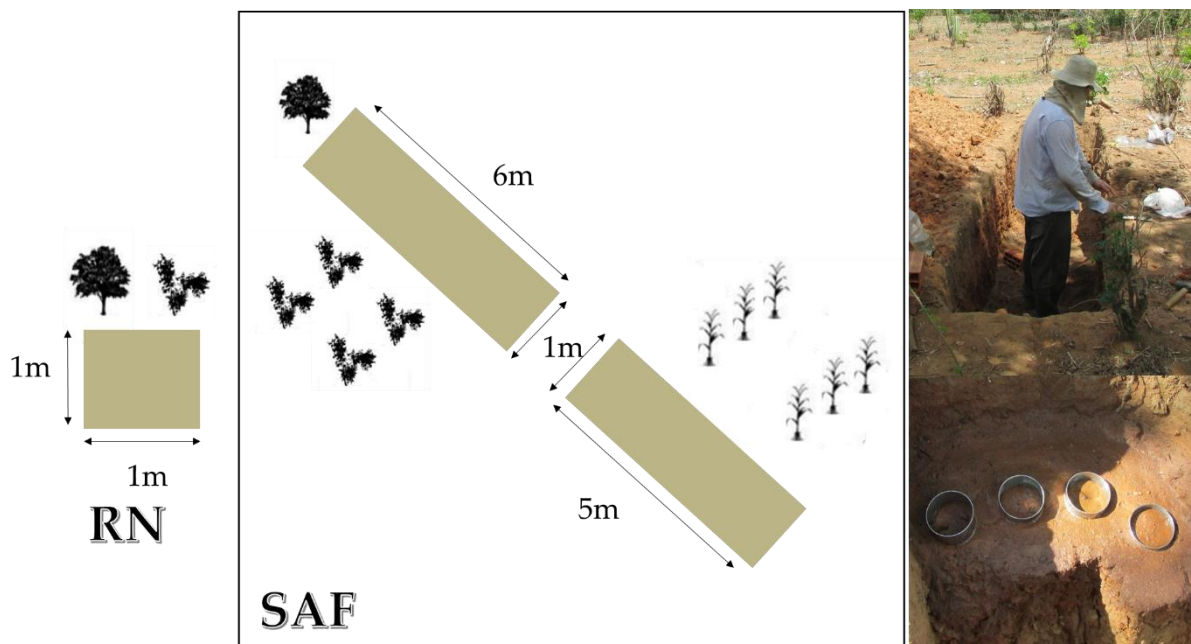
3.4.7 Capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%) e porcentagem de saturação por sódio (PST)

Foram calculados com base nas descrições de Embrapa (2011).

3.6 Coleta das amostras para análises físicas

As amostras de solo para análises físicas foram coletadas em trincheiras alocadas perpendicularmente às linhas de cultivo, de modo que houve um perfil para cada área de influência das espécies avaliadas. Também foi alocada trincheira de 1m x 1m em área de regeneração natural com a mesma classe de solo do SAF (Figura 4).

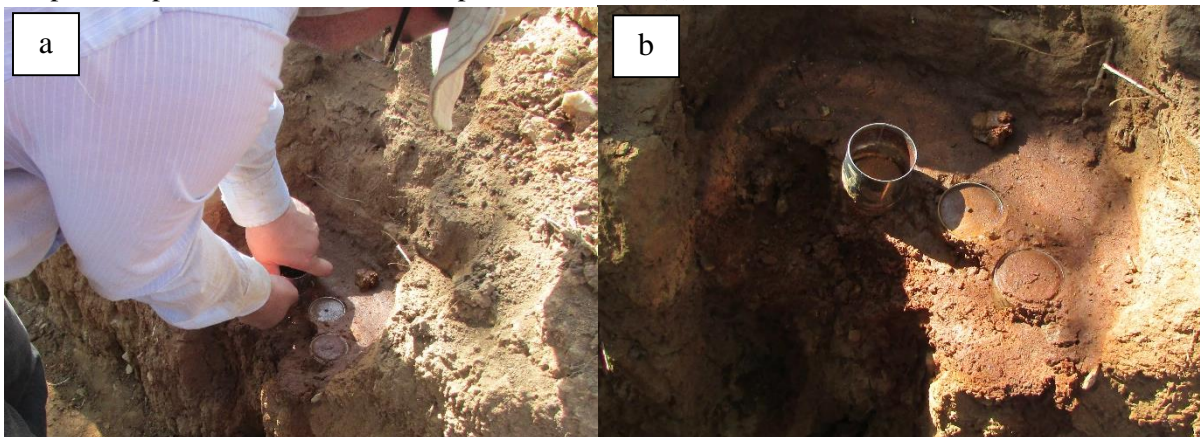
Figura 4 – Esquema da coleta das amostras de estrutura preservada nas profundidades de 0-5 cm, 5-18 cm, 18-25 cm e 25-41 cm em trincheiras alocadas no sistema agrossilvipastoril e área de regeneração natural pertencente à Embrapa Caprinos e Ovinos, Sobral, CE.



Fonte: Autor.

Os fatores de tratamento foram os mesmos descritos para as análises químicas. Amostras com estrutura preservada foram retiradas nas profundidades de 0-5 cm, 5-18 cm, 18-25 cm e 25-41 cm, com quatro repetições. Essas amostras foram coletadas em anéis volumétricos de 100 cm³, de forma vertical ao plano do terreno (Figura 5). Após coleta, as amostras foram embaladas, acondicionadas em bandeja e encaminhadas para o Laboratório de Física do Solo da Universidade Federal do Ceará, para a realização das análises.

Figura 5 –Coleta das amostras de estrutura preservada em anéis volumétricos de 100 cm³ (a) e detalhe do patamar para a retirada vertical ao plano do terreno (b).



Fonte: Autor.

3.7 Atributos físicos analisados

3.7.1 Densidade de partículas

A densidade das partículas foi determinada para posterior cálculo da porosidade. A determinação foi seguindo a metodologia que utiliza balão volumétrico, que consiste na determinação do volume de álcool etílico gasto para aferir um balão de 50 mL contendo 20 g de terra fina seca em estufa em seu interior (BLAKE; HARTGE, 1986a).

3.7.2 Densidade do solo

Foi determinada pelo método do anel volumétrico, a partir de amostras com estrutura preservada, coletadas em cilindros de volume conhecido, e secas a 105°C até massa constante (BLAKE; HARTGE, 1986b).

3.7.3 Porosidade

Foi obtida a partir da densidade do solo e de partículas, de acordo com a equação 1

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \right), \quad (1)$$

sendo α a porosidade ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), ρ_p e ρ_s as densidades de partículas e do solo (kg m^{-3}), respectivamente. A determinação da microporosidade (poros com diâmetro $< 50 \mu\text{m}$) foi realizada mediante a aplicação de tensão de 6 kPa no funil Haines, até que a água que ocupa os poros com diâmetro igual ou superior a 50 μm seja drenada (DANIELSON; SUTHERLAND, 1986). A macroporosidade foi obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

3.7.4 Curva característica de água no solo

As curvas características de água no solo foram determinadas nos diferentes horizontes (0-5 cm, 5-18 cm, 18-25 cm e 25-41 cm) em amostras com estrutura preservada, coletadas com anéis volumétricos de aço inox com 5 cm de altura e diâmetro.

As amostras foram colocadas em badeira e saturadas elevando-se gradualmente uma lâmina de água até atingir cerca de 2/3 da altura da amostra. Em seguida, foram submetidas a diferentes potenciais mátricos. Para obtenção da umidade gravimétrica foi utilizado o funil de Haines para os pontos de baixos potenciais (-0, -2, -4, -6, -8 e -10 kPa). Para os demais potenciais (-33, -100, -300, -1.500 kPa) foram usadas câmaras de pressão de Richards, com placas porosas. O ajuste foi feito pelo modelo de van Genuchten (1980) a partir da equação 2:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\phi_m|)^n]^m}, \quad (2)$$

Sendo: θ o conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_s o conteúdo de água na saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); θ_r o conteúdo de água residual ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$); ψ o potencial mátrico (kPa); e α , m e n são considerados parâmetros de ajuste do modelo relacionados ao formato da curva.

Foi utilizado o software SWRC, versão 2.0, fixando-se as variáveis θ_s e θ_r com os valores de umidade do solo medidos em laboratório na saturação e na tensão de 1500 kPa, respectivamente. Os parâmetros α , m e n foram ajustados pelo método iterativo de Newton-Raphson, sem dependência do parâmetro m com o n (DOURADO NETO *et al.*, 2000).

3.7.5 Resistência à penetração (RP)

Foi determinada nas amostras com estrutura preservada com teor de água correspondente a uma tensão de 10kPa (SILVA; KAY; PERFECT, 1994), utilizando-se um penetrômetro eletrônico com receptor e interface acoplados a um microcomputador, para registro das leituras por meio de um software próprio do equipamento, conforme Tormena, Silva e Libardi (1998).

Em cada amostra foi determinada a RP, adotando-se a velocidade de penetração de 1 cm min^{-1} (BRANDFORM, 1986). Os valores adquiridos em Kgf foram transformados em MPa. As determinações foram realizadas no centro de cada amostra, entre 1 e 4 cm de profundidade em cada anel. O procedimento compreendeu três repetições por amostra, sendo 180 leituras por repetições, totalizando 540 leituras em cada amostra.

3.7.6 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar

Foi determinada segundo o princípio do método da pressão decrescente (KIRKHAM, 1946; NEVES *et al.*, 2007; SILVA *et al.*, 2009; SILVEIRA *et al.*, 2011). Pelo anel volumétrico contendo amostra de solo com estrutura preservada, equilibrada nas tensões de 2, 6, 10, 33 e 300 kPa, se fez passar uma quantidade de ar correspondente à pressão de 1 kPa

no reservatório. Durante o procedimento foi mensurado eletronicamente o decaimento da pressão no tempo, até atingir o equilíbrio com a pressão atmosférica. Foi utilizado o software PermeAr v.1.0 (SILVEIRA *et al.*, 2011). O coeficiente de permeabilidade ao ar (K_{ar}) foi determinado a partir da equação 3:

$$K_{ar} = \frac{L\eta V}{AP_{atm}} \times |S|, \quad (3)$$

Sendo: K_{ar} o coeficiente de permeabilidade ao ar (m^2), V o volume de ar que passa pelo cilindro (m^3), η a viscosidade dinâmica do ar (Pa.s), L a altura do anel volumétrico (m), A a secção transversal da amostra de solo (m^2), P_{atm} a pressão atmosférica local (Pa) e S o coeficiente angular da regressão linear da pressão (ln da pressão) em função do tempo.

3.7.7 Índice de continuidade de poros

Neste procedimento os valores obtidos da permeabilidade intrínseca do solo ao ar foram relacionados aos valores de porosidade de aeração (ε_{ar}) por meio da equação Kozeny-Carman, (4) de um modo análogo ao de Ahuja *et al.* (1984),

$$K_{ar} = M\varepsilon_{ar}^N, \quad (4)$$

em que: M (intercepto) e N (inclinação) são constantes empíricas. O expoente N , segundo os autores, é considerado como um índice de continuidade de poros, uma vez que N reflete o aumento de K_{ar} com incremento de ε_{ar} (porosidade de aeração) ou um decréscimo na tortuosidade de poros, e incremento de área superficial com o acréscimo na fração de poros disponíveis para o fluxo de ar. A porosidade de aeração ε_{ar} foi calculada pela diferença entre a porosidade total e o conteúdo volumétrico de água em cada potencial mátrico estabelecido. A equação (4), ajustada para forma logarítmica, resulta em

$$\log K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar}. \quad (5)$$

A partir da regressão linear da relação de $\log \varepsilon_{ar}$ versus $\log K_{ar}$, os valores de M e N foram, então, estimados. O intercepto da reta linear com a abscissa no gráfico que relaciona a permeabilidade ao ar com a porosidade de aeração no eixo $\log \varepsilon_{ar}$ pode ser utilizado como medida da porosidade obstruída; ε_b , corresponde ao valor de ε_{ar} abaixo da qual o fluxo de ar

através do solo cessa devido à descontinuidade na rede de poros de aeração. Partindo da equação (5), ε_b é expressa como sendo

$$\varepsilon_b = 10^{(-\log M)/N} \quad (6)$$

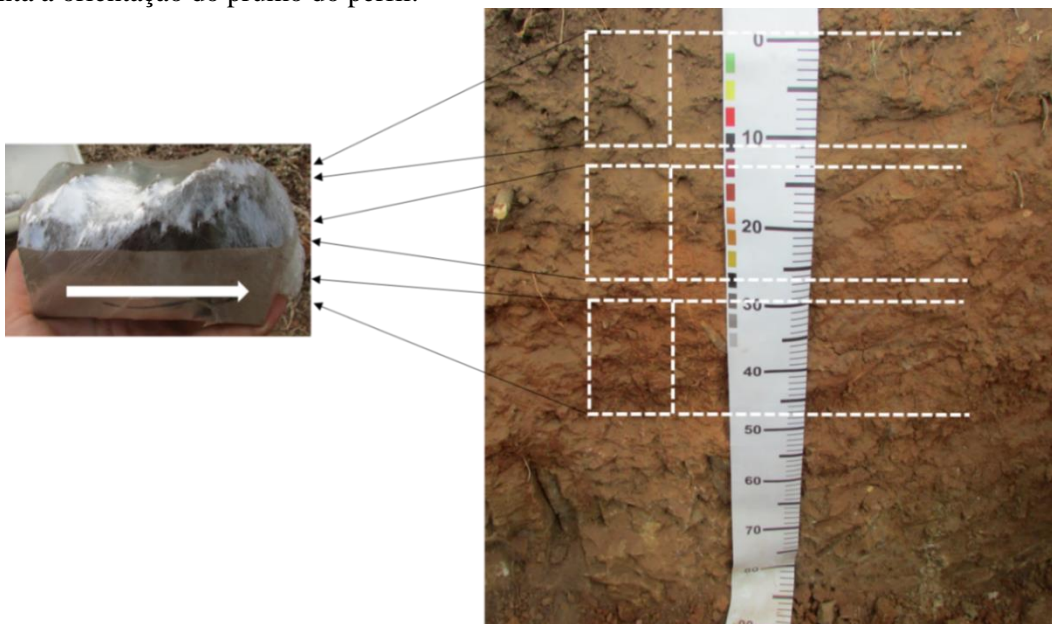
O índice de continuidade de poros (K_1), sugerido por Groenevelt, Kay e Grant, (1984) também foi avaliado. Este índice foi determinado a partir da razão entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar e a porosidade de aeração, isto é,

$$K_1 = \frac{K_{ar}}{\varepsilon_{ar}} \quad (7)$$

3.8 Coleta das amostras para análises micromorfológicas

As amostras para a análise micromorfológica foram retiradas em quatro perfis e três profundidades, coletando-se amostras com estrutura preservada, que consiste em um bloco de solo vertical de 0,07 x 0,05 x 0,12 m, orientado à superfície e acomodado em caixas de papel cartão (Figura 6).

Figura 6 – Representação da marcação do perfil em três profundidades de amostragem e bloco indeformado (7,0 x 5,0 x 12,0 cm) em caixa de papel confeccionada para esse fim. A seta no bloco representa a orientação do prumo do perfil.



Fonte: Autor.

Os perfis de estudo foram escolhidos nas áreas de influência dos componentes vegetais do sistema agrossilvipastoril, a saber: arbustivo (*Leucaena leucocephala*), arbóreo (*Poincianera pyramidalis*) e agrícola (*Zea mays*). Também foi considerado perfil na área de regeneração natural nas proximidades do SAF. Em cada perfil foi retirada uma amostra de estrutura preservada (monólito) nas profundidades de 0-12cm; 14-26 cm e 30-42 cm, totalizando 3 monólitos por perfil. Essas profundidades foram selecionadas porque englobam os horizontes do estudo em que foram coletadas também amostras para análises físicas e químicas. Após coleta, as amostras foram embaladas, acondicionadas em isopor e encaminhadas ao Laboratório de Micromorfologia da ESALQ/USP (LABMICRO).

As repetições para análises estatísticas foram cada micrografia retirada nos blocos polidos, sendo o número de repetições distintas para cada bloco, constituindo um delineamento inteiramente casualizados desbalanceado.

3.9 Procedimentos laboratoriais para micromorfologia

De posse das amostras no Laboratório de Micromorfologia da ESALQ/USP, foram realizados procedimentos de secagem, impregnação, corte e montagem de blocos impregnados, bem como confecção de lâminas delgadas. Tais procedimentos são descritos a seguir.

3.9.1 Secagem das amostras

As resinas que são utilizadas para impregnação de amostras de solos têm taxa de polimerização (endurecimento) afetada pela presença da água, mesmo que essa esteja presente em pequenas quantidades (CASTRO *et al.*, 2003). Daí a importância do processo de secagem na confecção de blocos e lâminas. Em laboratório, os monólitos foram secos ao ar até massa constante e realocadas para a estufa a 40 °C com circulação forçada de ar durante 48 horas.

3.9.2 Impregnação

Os monólitos foram introduzidos em recipientes de plástico e inseridos em dessecador conectado a bomba de vácuo para facilitar a penetração da solução de impregnação.

A solução é uma mistura de resina poliéster e monômero de estireno que, de acordo com Murphy (1986), possui como vantagens: ausência de perdas por volatilização durante a polimerização; pouca contração; inércia química; aceitação de ampla gama de pigmentos; dureza e resistência a impactos; aderência a praticamente qualquer superfície; e maior resistência à água.

Acrescentou-se à solução de impregnação o pigmento fluorescente Tinopal OB, que permite a distinção dos poros quando iluminados com luz ultravioleta (MURPHY *et al.*, 1977). Adicionou-se também 10 gotas L⁻¹ de solução de catalizador Butanox M50 para controle do endurecimento.

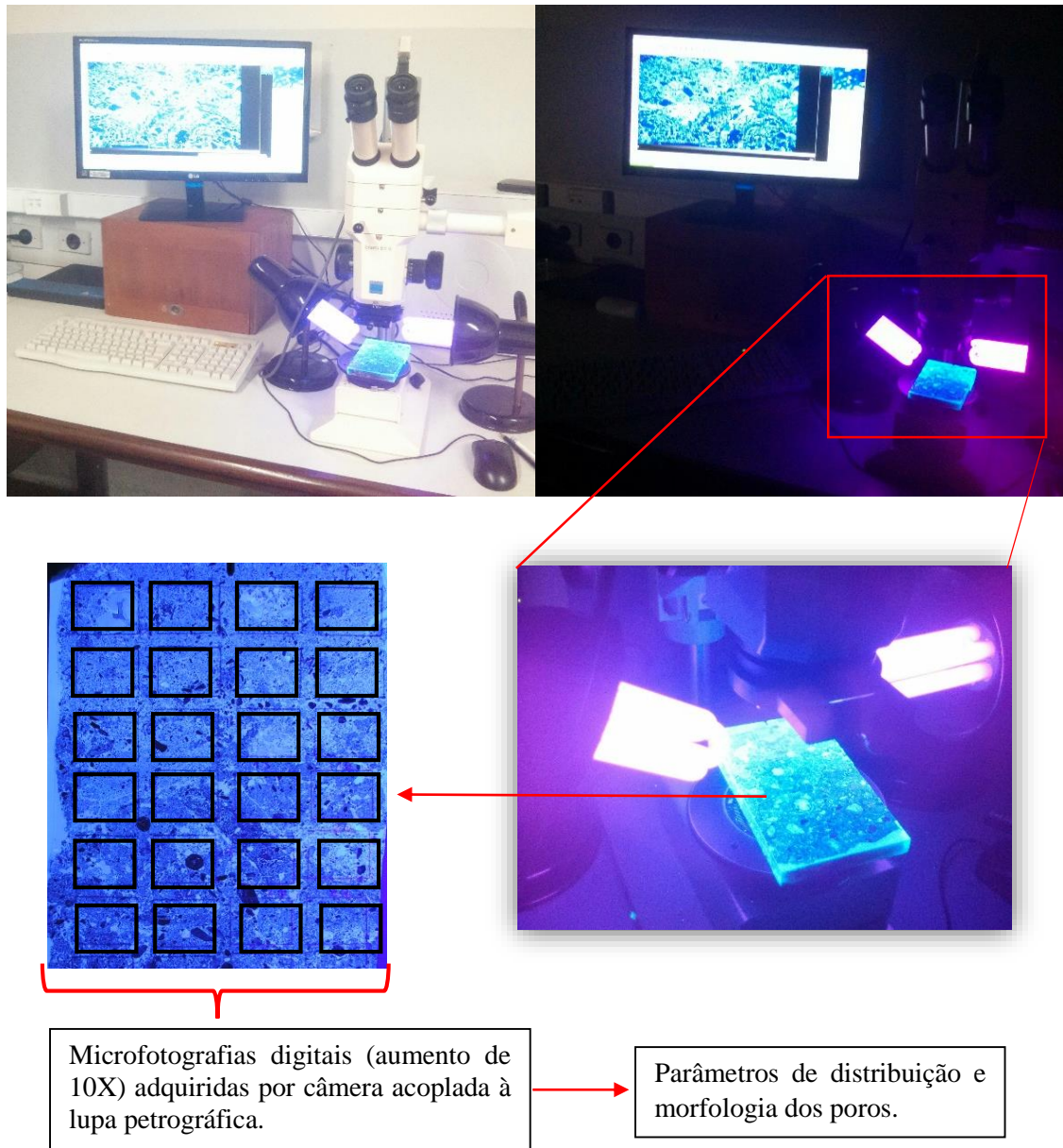
3.9.3 Corte e montagem dos blocos impregnados

Depois de totalmente secos, os blocos foram cortados com serra de diamante, lixados e polidos em disco rotatório com pó carborundum.

3.10 Porosidade do solo pelo método de análise de imagens

A porosidade do solo foi quantificada pelo método da análise de imagens. Os blocos de solo foram iluminados com luz ultravioleta e fotografados com o auxílio de uma câmera digital (Sony®, modelo DFW-X700), em sistema “charged couple device” (CCD), acoplada a um microscópio petrográfico (figura 7). O procedimento de análise das imagens 2D também foi realizado no Laboratório de Microscopia da ESALQ/USP. Foram utilizadas para cada componente do SAF e profundidade, imagens (fotomicrografias) aleatórias de 12 x15 mm (180mm²).

Figura 7 – Representação do esquema de obtenção de microfotografias para realização da análise de imagens.



Fonte: Adaptado de Dalla Rosa (2012).

As imagens foram digitalizadas em 1024x768 pixels, com resolução espectral de 256 tons de cinza, em aumento de 10X, igualando um pixel a $156,25 \mu\text{m}^2$. De posse das imagens com resolução espectral de 256 níveis de cinza, foi realizada a binarização e etiquetagem das imagens utilizando-se o programa: Noesis Visilog.

Após estas etapas, por meio do programa foram quantificadas as variáveis básicas, que se referem ao conjunto do espaço poroso da imagem e as variáveis derivadas, definidas como as entidades discretas sobre a imagem. Uma vez determinadas as variáveis básicas e

derivadas, essas foram classificadas segundo classes de tamanhos, tipos de forma ou combinações de tipos de forma com classes de tamanhos.

A porosidade total (PT) foi calculada considerando a soma das áreas de todos os poros dividida pela área total da imagem, em porcentagem. A classificação e a quantidade dos poros foram determinadas seguindo os critérios utilizados por Cooper e Vidal-Torrado (2005).

Os poros foram divididos em três grupos de acordo com sua forma: arredondados (canais e cavidades isoladas), alongados (fissuras) e complexos (empacotamento). Para isso, foram calculados dois índices de forma conforme sugestão de (COOPER,1999). O índice de forma (Tabela 3) foi obtido pelas equações 8 e 9, em que o I_1 separa os poros arredondados dos poros alongados e o I_2 entre alongados e complexos.

$$I_1 = \frac{P^2}{(4\pi A)}, \quad (8)$$

Em que P é o perímetro do poro e A é sua área;

$$I_2 = \frac{\frac{1}{m} \sum_i (N_i) i}{\frac{1}{n} \sum_j (D_F) j}, \quad (9)$$

Em que: m é o número de i direções e n é o número de j direções nas quais é calculado o N_i que é o número de interceptos de um objeto na direção i ($i = 0, 45, 90$ e 135°), D_F é o diâmetro de Féret de um objeto na direção j ($j = 0$ e 90°). O índice I_2 é utilizado como complemento ao índice I_1 para obter precisão mais alta na separação entre os grupos de formas arredondados, alongados e complexos (COOPER, 1999).

Tabela 3 – Definição das classes de tamanho versus forma dos poros

Forma de Poros	Índices de forma	
	I_1	I_2
Arredondados	$I_1 \leq 5$	---
Alongados	$5 < I_1 \leq 25$	$\leq 2,2$
Complexos	$5 < I_1 \leq 25$ ou < 25	$> 2,2$

Fonte: Cooper (1999).

A classe de tamanho dos poros foi dividida em três: poros pequenos, aqueles que ocupam áreas entre $1,56 \times 10^{-4}$ e $1,56 \times 10^{-2}$ mm²; poros médios, entre $1,56 \times 10^{-2}$ e $1,56 \times 10^{-1}$ mm² e poros grandes, áreas maiores do que $1,56 \times 10^{-1}$ mm² (COOPER, 1999).

3.11 Análise estatística

Os dados referentes aos atributos químicos foram analisados considerando delineamento experimental inteiramente aleatorizado, em parcelas subdivididas no espaço (4x4) com quatro repetições. Foram considerados quatro componentes vegetais, quatro profundidades e quatro repetições, totalizando 64 unidades experimentais. Os perfis de cada espécie e profundidades foram comparados pelo teste Scott-Knott, considerando-se 5% de probabilidade.

Os dados referentes aos atributos físicos foram analisados considerando o delineamento experimental inteiramente aleatorizado, em faixas e quatro repetições. Foram consideradas quatro componentes vegetais, quatro profundidades e quatro repetições, totalizando 64 unidades experimentais. Os dados dos perfis de cada espécie e profundidades foram comparados pelo teste Scott-Knott, considerando-se 5% de probabilidade.

Foram analisados os dados de porosidade do solo obtidos pela análise de imagens considerando-se delineamento inteiramente aleatorizado, utilizando como repetições a porosidade de cada microfotografia, sendo esse número diferente para cada bloco, constituindo um delineamento inteiramente aleatorizado desbalanceado. Utilizou-se como teste de comparação de médias de porosidade Scott-Knott a 5% de probabilidade.

A normalidade dos dados foi verificada pelo Teste de Shapiro-Wilk, e mediante não normalidade foi aplicada transformação. Todos os dados foram analisados usando programa estatístico SISVAR (FERREIRA, 2011).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Descrição morfológica

De acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2013), os perfis estudados foram classificados como LUVISSOLOS Crômicos Órticos típicos.

Os perfis 1 e 2 estão localizados no SAF, na área de influência do componente arbustivo (*L.leucocephala*) e do componente arbóreo (*P.pyramidalis*), respectivamente. Estes solos são bastante similares quanto a sua morfologia e apresentam uma sequência de horizontes A-Bt-BC (Tabela 4).

Tabela 4 – Descrição morfológica dos quatro perfis estudados.

Horizonte (prof.)	Estrutura	Textura	Cor úmida (Munsell)
PERFIL 1: Componente arbustivo – LUVISSOLO Crômico Órtico típico			
A1 (0-5)	2 M BS	Franco-arenosa	7,5 YR 4/2
A2 (5-18)	1 P-M BS	Franco-arenosa	7,5YR 5/4
Bt1(18-25)	2 M PR	Franco-argilo arenosa	2,5 YR 5/6
Bt2 (25-41)	2 M PR	Franco-argilo arenosa	10 R 4/8
Bt3 (41-57)	2 P-M PR	Franco-argilo arenosa	2,5 YR 5/3
BC1 (57-67)	3 M-G PR	Franco-argilo arenosa	2,5 YR 7/4
BC2 (67-90)	3 M-G PR	Franco-argilo arenosa	2,5YR 6/1
PERFIL 2: Componente arbóreo – LUVISSOLO Crômico Órtico típico			
A1 (0-5)	1 P-M BS	Franco-arenosa	7,5 YR 4/2
A2 (5-18)	1 P-M BS	Franco-arenosa	7,5YR 5/4
Bt1(18-25)	2 M PR	Franco-argilo-arenosa	2,5 YR 5/6
Bt2 (25-41)	2 M-G PR	Franco-argilo-arenosa	10 R 4/8
Bt3 (41-57)	2 P-M PR	Franco-argilo-arenosa	2,5 YR 5/3
BC1 (57-67)	3 M-G PR	Franco-argilo-arenosa	2,5 YR 6/4
BC2 (67-90)	3 M-G PR	Franco-argilo arenosa	2,5YR 5/2
PERFIL 3: Componente agrícola – LUVISSOLO Crômico Órtico típico			
A1 (0-7)	2 M BS	Franco-arenosa	7,5 YR 3/4
A2 (7-17)	2 P-M BS	Franco-arenosa	7,5 YR 4/4
A3 (17-25)	2 M BS	Franco-argilo-arenosa	5YR 4/4
Bt1 (25-41)	2 M-G PR	Franco-argilo-arenosa	5YR 4/6
Bt2 (41-65)	2 M-G PR	Franco-argilo-arenosa	2YR 3/6
BC(65-85)	3 G PR	Franco-argilo-arenosa	7,5YR 5/6
PERFIL 4: Regeneração natural – LUVISSOLO Crômico ótico típico			
A1 (0-5)	1 P BS	Franco-arenosa	5YR 2,5/2
A2 (5-15)	1 P-M BS	Franco-arenosa	5YR 3/3
Bt1 (15-25)	1 M-G BS	Franca	5YR 3/4
Bt2 (25-40)	1 M-G BS	Franca	5YR 4/6
BC1 (40-60)	1 P BS	Franco-arenosa	5YR 3/4
BC2 (60-75)	1 P-M BS	Franco-arenosa	7,5YR 4/4
BC3 (75-85)	1 M-G BS	Areia-franca	7,5YR 4/4

Estrutura: 1 – fraca; 2 – moderada; 3 – forte; P: pequena, M: média, G: grande; BS: Blocos subangulares, PR: Prismática.

Fonte: Autor.

A passagem entre os horizontes faz-se de forma abrupta entre o A e Bt e plana e clara entre os demais horizontes. Esta passagem abrupta entre os horizontes A e Bt está ligada principalmente à mudança textural abrupta e mudança de estrutura e seu grau, de blocos subangulares fracos para prismática moderada. As cores dominantes nestes perfis foram as avermelhadas em subsuperfície e brunadas escuras nos horizontes superficiais em virtude da influência da matéria orgânica. A textura é franco-arenosa nos horizontes A e a partir do Bt1, ocorre aumento nos teores de argila, como observado nas análises granulométricas (Tabela 4), modificando para a classe textural franco-argilo-arenosa. Observou-se pouco slinkensides, com grau de desenvolvimento fraco, de modo que não caracteriza horizonte vértico, recobrando algumas superfícies dos agregados.

No perfil referente ao componente arbustivo, notou-se a presença de raízes em todo o perfil, sendo estas mais abundantes nos horizontes A1 e A2. Já no perfil referente ao componente arbóreo, a atividade biológica mostrou-se forte em todo o perfil, evidenciada pela presença de galerias e poros tubulares preenchidos com material solto e microgranular, com artrópodes, principalmente minhocas ao longo do perfil.

O LUVISSOLO Crômico Órtico típico do perfil 3 está localizado na área de influência do componente agrícola (*Zea mays*), sendo pertencente ao SAF. Este solo apresenta uma sequência de horizontes A-Bt-BC (Tabela 4). A passagem entre os horizontes faz-se de forma clara entre o A e Bt e plana e clara entre os demais horizontes. A estrutura é em blocos subangulares moderados pequenos no horizonte A, e prismática moderada média a grande nos demais horizontes. As cores dominantes neste perfil foram avermelhadas e brunadas. A textura é franco-arenosa no horizonte A e franco-argilo-arenosa no restante do perfil. Notou-se a presença de raízes finas comuns em superfície e raras em subsuperfície.

O LUVISSOLO Crômico Órtico típico do perfil 4 está localizado na área de regeneração natural. Este solo possui uma sequência de horizontes A-Bt-BC (Tabela 4). A passagem entre os horizontes faz-se de forma clara entre o A e Bt e plana e gradual entre os demais horizontes. A estrutura é predominantemente em blocos subangulares fracos a moderados. As cores dominantes nestes perfis foram bruno-avermelhadas. A textura é franco-arenosa no horizonte A, franca no Bt1 e Bt2, franco-arenosa BC1 e BC2 e areia franca no BC3. Observou-se raízes finas e grossas comuns, principalmente em superfície.

A consistência seca para os perfis 1 e 2 foram ligeiramente duras até o Bt3 e extremamente duras nos horizontes BC1 e BC2 (Tabela 5). Para os mesmos perfis, os horizontes A1 e A2 apresentaram muita friabilidade quando úmidos e quando molhados, não apresentaram

plasticidade e pagajosidade. O horizontes Bt e BC1 dos perfis 1 e 2 apresentam friabilidade quando úmidos e apenas o horizonte BC2 apresentou consistência úmida muito firme.

Tabela 5 – Consistência dos quatro perfis estudados.

Horizonte (prof.)	Consistência		
	Seca	Úmida	Molhada
PERFIL 1: Componente arbustivo – LUVISSOLO Crômico Órtico típico			
A1 (0-5)	Lig. dura	Muito friável	NPL e NPE
A2 (5-18)	Lig. dura	Muito friável	NPL e NPE
Bt1(18-25)	Lig. dura	Friável	PL e LPE
Bt2 (25-41)	Lig. dura	Friável	PL e PE
Bt3 (41-57)	Extr. dura	Friável	MP e MPE
BC1 (57-67)	Extr. dura	Friável	MP e LPE
BC2 (67-90)	Extr. dura	Muito firme	LP e LPE
PERFIL 2: Componente arbóreo – LUVISSOLO Crômico Órtico típico			
A1 (0-5)	Lig. dura	Muito friável	NPL e NPE
A2 (5-18)	Lig. dura	Muito friável	NPL e NPE
Bt1(18-25)	Lig. dura	Friável	PL e LPE
Bt2 (25-41)	Lig. dura	Friável	PL e PE
Bt3 (41-57)	Extr. dura	Friável	MP e MPE
BC1 (57-67)	Extr. dura	Friável	MP e LPE
BC2 (67-90)	Extr. dura	Muito firme	LP e LPE
PERFIL 3: Componente agrícola – LUVISSOLO Crômico Órtico típico			
A1 (0-7)	Lig. dura	Muito friável	NPL e NPE
A2 (7-17)	Lig. dura	Muito friável	NPL e NPE
AB (17-25)	Dura	Firme	LP e LPE
Bt1 (25-41)	Extr. dura	Firme	PL e PE
Bt2 (41-65)	Extr. dura	Firme	MPL e PE
BC (65-85)	Extr. dura	Firme	MPL e PE
PERFIL 4: Regeneração natural – LUVISSOLO Crômico ótico típico			
A1 (0-5)	Lig. dura	Friável	NPL e NPE
A2 (5-15)	Lig. dura	Friável	NPL e NPE
Bt1 (15-25)	Lig. dura	Friável	LPL e LPE
Bt2 (25-40)	Lig. dura	Friável	LPL e NPE
BC1 (40-60)	Lig. dura	Friável	LPL e NPE
BC2 (60-75)	Lig. dura	Friável	LPL e LPE
BC3 (75-85)	Lig. dura	Muito friável	NPL e NPE

NPL: Não plástica; NPE: Não pegajosa; PL: Plástica; PE: pegajosa; LPE: Ligeiramente pegajosa; MPL: Muito plástica; MPE: Muito pegajosa.

Fonte: Autor.

O perfil 3 do componente agrícola apresentou consistência seca ligeiramente dura no horizonte A, dura no horizonte AB e extremamente dura nos horizontes Bt1, Bt2 e BC. A consistência úmida variou de muito friável no horizonte A e firme nos horizontes AB, Bt e BC. A consistência úmida para esse perfil varia de muito friável a firme.

O perfil 4 da área de regeneração natural apresenta consistência seca ligeiramente dura ao longo de todo o perfil, e friável quando úmida para todos os horizontes, exceto BC3. Todos os solos apresentam consistência não plástica e não pegajosa no horizonte A.

4.2 Atributos químicos

4.2.1 pH, alumínio (Al^{3+}), sódio (Na^+), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), porcentagem de saturação por sódio (PST) e nitrogênio (N)

Por meio do teste F da análise de variância foi constatada significância para fontes de variação de forma isolada (componente vegetal e/ou profundidade). Os atributos pH, alumínio (Al^{3+}), sódio (Na^+), saturação por bases (V%), porcentagem de saturação por sódio (PST) variaram em resposta ao fator profundidades (Tabela 6).

Tabela 6 – Resumo da ANOVA para os atributos químicos: pH, alumínio (Al), sódio (Na), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), porcentagem de saturação por sódio (PST) e nitrogênio (N).

Fontes de Variação	pH	Al ^t	Na ^t	V%	m% ^t	PST ^t	N
	Valor F						
Componente (C)	2,862 ^{ns}	1,836 ^{ns}	0,512 ^{ns}	2,466 ^{ns}	2,038 ^{ns}	0,693 ^{ns}	8,964 ^{**}
Profundidade (P)	10,014 ^{**}	2,913 [*]	5,938 ^{**}	12,69 ^{**}	2,607 ^{ns}	6,936 ^{**}	51,706 ^{**}
Interação C.* P	0,830 ^{ns}	1,728 ^{ns}	0,746 ^{ns}	1,793 ^{ns}	1,630 ^{ns}	0,598 ^{ns}	1,923 ^{ns}
CV 1 (%)	8,43	10,15	14,45	15,2	51,28	59,37	26,52
CV 2 (%)	3,54	7,14	8,9	6,16	34,26	29,57	27,12

** , * e ^{ns}: Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente; CV: Coeficiente de variação.

t = variáveis transformadas por $\sqrt{x + 0,5}$

O nitrogênio (N) foi a única variável em que houve significância isolada no fator componente vegetal, apresentando valores que oscilaram de 0,66 a 1,04 g kg⁻¹ (Tabela 7). Os maiores valores foram verificados para solo na área de influência dos componentes agrícola (1,04 g kg⁻¹) e arbóreo (0,97 g kg⁻¹), que não diferiram entre si. Já a área de regeneração natural teve valor médio de 0,8 g kg⁻¹ e não diferiu do componente arbustivo (0,66 g kg⁻¹ de N).

Os maiores teores de N no solo do componente agrícola são explicados pela adubação com esterco de caprino realizada no SAF nas linhas de milho (*Zea mays*). A aplicação de esterco e o cultivo em aleias nas áreas de agricultura constituem boa alternativa para melhoria

da fertilidade do solo, corroborando com acréscimo da produção, sobretudo, para agricultores familiares (SOUZA *et al.*, 2014). Em adição, é realizada no SAF poda de leguminosas e disposição desse material nas linhas de plantio de milho, o que também explica os maiores teores de N para esse componente.

Para o componente arbóreo, os maiores teores de N encontrados são atribuídos à contribuição de tecidos subterrâneos para a manutenção dos nutrientes no solo e conseqüentemente, para sua fertilidade (CARRANCA *et al.*, 2015). Também há contribuição do componente arbóreo na ciclagem de nutrientes pela fixação biológica de N, por ser uma leguminosa. Iwata *et al.* (2012) constataram aumento nos teores de nitrogênio em sistema agroflorestal no semiárido que foi atribuído ao aporte de matéria orgânica e maior permanência desse material no solo. Dessa forma, aportes constantes de tecidos subterrâneos e superficiais do componente arbóreo e maior permanência desses tecidos no solo permitiram incrementos dos teores de N no SAF.

Tabela 7 – Comparação de médias para as variáveis: pH, alumínio (Al), sódio (Na), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), porcentagem de saturação por sódio (PST) e nitrogênio (N) para o fator componente vegetal.

Componente vegetal	pH	Al	Na	V	m	PST	N
	-	----cmol _c kg ⁻¹ ----		-----%-----			g kg ⁻¹
Arbustivo	6,53 a	0,11 a	0,11 a	72,51 a	1,76 a	1,14 a	0,66 b
Arbóreo	6,71 a	0,15 a	0,08 a	67,03 a	2,53 a	0,83 a	0,97 a
Agrícola	7,06 a	0,05 a	0,16 a	71,34 a	1,02 a	2,30 a	1,04 a
Regeneração natural	6,57 a	0,11 a	0,11 a	63,60 a	2,11 a	1,34 a	0,80 b

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Os valores médios de pH não diferiram entre os componentes estudados (Tabela 8), sendo esses valores próximos a alcalinidade nos componentes arbustivo, arbóreo e regeneração natural e alcalino no componente agrícola. Esses valores médios estão uma faixa ótima de desenvolvimento para as culturas (MELLO *et al.*, 1983) e indicam baixa participação do alumínio na acidez do solo, sendo também os valores médios do Al³⁺ iguais estatisticamente entre os componentes estudados (Tabela 7). De semelhante modo, os valores médios de Na⁺, V%, m% e PST% não diferiram entre os componentes vegetais estudados.

Dentre os atributos que apresentaram significância isolada no fator profundidade, o pH reduziu com o aumento da profundidade, com valor no primeiro horizonte (0-5 cm) estatisticamente igual ao segundo (5-18 cm), sendo esses valores superiores aos demais horizontes (terceiro e quarto) (Tabela 8). A matéria orgânica é capaz de complexar os cátions

H⁺ e Al³⁺ livres e adicionar bases que reduzem a acidez do solo e aumentam o pH (PAVINATO, 2008). Aos maiores teores de matéria orgânica identificados na descrição do solo (Tabela 1) atribui-se os maiores valores de pH nas duas primeiras profundidades, tendo em vista também que, de modo geral, foram maiores os valores de soma de bases superficialmente.

Tabela 8 – Comparação de médias para as variáveis: pH, alumínio (Al), sódio (Na), saturação por bases (V%), saturação por alumínio (m%), porcentagem de saturação por sódio (PST) e nitrogênio (N) para o fator profundidade.

Profundidade	pH	Al ³⁺	Na ⁺	V	m	PST	N
	-	---cmol _c kg ⁻¹ ----		-----%-----			g kg ⁻¹
0-5	6,91 a	0,08 b	0,06 b	73,50 a	1,25 a	0,59 b	1,46 a
5-18	6,80 a	0,07 b	0,07 b	69,68 b	1,27 a	0,83 b	0,89 b
18-25	6,68 b	0,13 a	0,11 b	65,73 c	2,31 a	1,66 a	0,57 c
25-41	6,47 c	0,15 a	0,22 a	65,57 c	2,60 a	2,53 a	0,56 c

Médias com mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Os teores de Al³⁺ foram maiores e iguais estatisticamente nas profundidades de 18-25 cm e 25-41 cm com valores de 0,13 cmol_c kg⁻¹ e 0,15 cmol_c kg⁻¹, respectivamente. Esses valores indicam baixa participação do alumínio na acidez do solo, sendo esse resultado esperado tendo em vista que esse cátion não é expressivo em solos de clima semiárido, especialmente para valores de pH acima de 5,5 (RICHARDS, 1954), conforme verificado neste estudo.

O Na⁺ é um elemento que pode comprometer a qualidade dos solos, pois pode ser adsorvido aos colóides do solo e quando está presente em elevados teores, é capaz de deslocar o Ca²⁺ e o K⁺ do complexo de troca. Essa condição pode afetar a estrutura do solo (OLIVEIRA *et al.*, 2002). Todavia, em todas as profundidades estudadas, os teores de Na⁺ foram considerados baixos, não oferecendo riscos de danos estruturais ocasionados por esse cátion monovalente. Foi observado maior teor de Na⁺ (0,22 cmol_c kg⁻¹) na profundidade de 25-41 cm, o que pode ser decorrente de processo de lavagem dos sais da camada superficial para as mais profundas do solo. Nas demais profundidades 0-5 cm, 5-18 cm e 18-25 cm, os valores de Na⁺ foram 0,06 cmol_c kg⁻¹, 0,07 cmol_c kg⁻¹ e 0,11 cmol_c kg⁻¹, respectivamente (Tabela 8).

Os valores de PST ficaram abaixo do limite de 15%, considerado indicador de sodicidade do solo (RICHARDS, 1954). Os valores encontrados para todas as profundidades não ultrapassaram 2,53% (Tabela 8). Portanto, as concentrações de Na⁺ se mantiveram em níveis aceitáveis para que não ocorram problemas de sodificação. Verificou-se, ainda, incremento nos valores médios de PST com a profundidade, o que corresponde à tendência do Na⁺ aumentar em profundidade.

Os valores de V% oscilaram de 65,57 a 73,50%, sendo o maior valor encontrado na profundidade de 0-5 cm. Contudo, para todas as profundidades, o valor de V% foi superior a 50%, classificando o solo como eutrófico. A liberação de bases trocáveis superficialmente, que influenciou no pH e SB corroboram com o resultado. Conforme Prado (2001), os valores de saturação por bases estão ideais para a cultura do milho, devendo ser esse valor superior a 65%.

4.2.2 Cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+), soma de bases (SB) e capacidade de troca catiônica (CTC)

Pela análise de variância para o Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , SB e CTC (Tabela 9), observou-se que, as interações entre os fatores de tratamento foram significativas, procedendo assim o desdobramento do estudo de um fator dentro do outro.

Tabela 9 – Resumo da ANOVA para os atributos químicos: cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), potássio (K^+), soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC), fósforo (P).

Fontes de Variação	Ca	Mg^t	K^t	SB	CTC
	Valor F				
Componentes (C)	0,358 ^{ns}	7,886*	5,566*	0,423 ^{ns}	0,517 ^{ns}
Profundidades (P)	14,206**	2,617 ^{ns}	19,335**	8,674**	9,339**
Interação C * P.	2,197*	10,051**	2,148*	4,680**	6,796**
CV 1 (%)	44,75	26,55	13,65	42,29	31,41
CV 2 (%)	20,99	13,5	4,79	20,45	14,3

** , * e ^{ns}: Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente; CV: Coeficiente de variação; t = variáveis transformadas por $\sqrt{x+0,5}$.

Para o componente arbustivo e regeneração natural, os teores de Ca^{2+} foram iguais ao longo das profundidades de estudo (Tabela 10). Na área de regeneração natural os teores do elemento variam de 4,40 a 5,66 $cmol_c\ kg^{-1}$ que, comparados a tabela de interpretação do Ceará (FERNANDES, 1993) são considerados altos. Em ecossistemas florestais a disponibilidade de cálcio depende, principalmente, do intemperismo de minerais do solo (BEDEL *et al.*, 2016), sendo esse processo efetivo na área de regeneração natural deste estudo, tendo em vista alta disponibilidade do nutriente no solo. No componente arbustivo, os teores variaram de 3,8 a 5,28 $cmol_c\ kg^{-1}$, sendo considerados médio e alto, respectivamente (FERNANDES, 1993), todavia não diferiram entre si.

Semelhante tendência foi observada para os teores de Mg^{2+} na área de regeneração natural, não diferindo entre as profundidades (Tabela 10). A ausência de revolvimento do solo

do SAF e na área de regeneração natural proporcionou boas condições para os organismos responsáveis pela fragmentação do material vegetal e ciclagem dos nutrientes (CUNHA *et al.*, 2012).

Na profundidade de 0-5 cm os teores de Ca^{2+} não se distinguiram estatisticamente entre os componentes vegetais estudados, oscilando entre 5,28 e 5,93 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, sendo esses teores considerados altos no solo (FERNANDES, 1993). O teor de Mg^{2+} , ainda na profundidade 0-5 cm, foi menor estatisticamente (0,93 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$) na área de regeneração natural. O teor de Mg^{2+} no solo entre 0,6 e 1,0 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, como encontrado neste estudo, é considerado médio (FERNANDES, 1993). A inter-relação entre os nutrientes Ca^{2+} e Mg^{2+} na nutrição vegetal está conexas às suas propriedades químicas semelhantes, fazendo com que ocorra competição pelos sítios de adsorção no solo e na absorção pelas raízes. Dessa forma, a presença de um pode prejudicar os processos de adsorção e absorção do outro (ORLANDO FILHO *et al.*, 1996). Contudo, foram observados teores consideráveis e na proporção adequada para os dois cátions, de modo a não restringir o desenvolvimento dos componentes vegetais no SAF.

Tabela 10 – Teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ em função das espécies vegetais e das profundidades. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas colunas não diferem entre si. Médias seguidas da mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.

Componentes vegetais	Profundidades			
	0-5	5-18	18-25	25-41
$\text{Ca}^{2+} \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$				
Arbustivo	5,28 Aa	3,80 Aa	3,44 Aa	5,33 Aa
Arbóreo	5,93 Aa	5,22 Aa	2,92 Ab	3,36 Bb
Agrícola	5,80 Aa	3,90 Ab	3,44 Ab	3,57 Bb
Regeneração natural	5,66 Aa	4,91 Aa	4,40 Aa	4,55 Aa
$\text{Mg}^{2+} \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$				
Arbustivo	1,29 Ab	1,12 Cb	1,29 Bb	2,04 Aa
Arbóreo	1,38 Aa	1,37 Ba	1,64 Aa	1,46 Ba
Agrícola	1,50 Aa	1,64 Aa	1,12 Bb	1,13 Cb
Regeneração natural	0,93 Ba	0,93 Ca	0,94 Ca	0,98 Ca
$\text{K}^+ \text{ cmol}_c \text{ kg}^{-1}$				
Arbustivo	0,87 Ca	0,82 Ba	0,78 Ca	0,78 Ba
Arbóreo	1,04 Aa	0,94 Ab	0,89 Bb	0,88 Ab
Agrícola	0,97 Ba	0,92 Aa	0,97 Aa	0,94 Aa
Regeneração natural	0,92 Ca	0,82 Bb	0,80 Cb	0,79 Bb

Fonte: Autor.

Os teores de K^+ não diferiram entre as profundidades estudadas para os componentes arbustivo e agrícola (Tabela 10), o que é atribuído à elevada mobilidade do K^+ no

solo. Apesar de terem sido observadas diferenças estatísticas nos teores de K^+ nos componentes arbóreo e na área de regeneração natural, todos os teores enquadram-se como muito altos (FERNANDES, 1993).

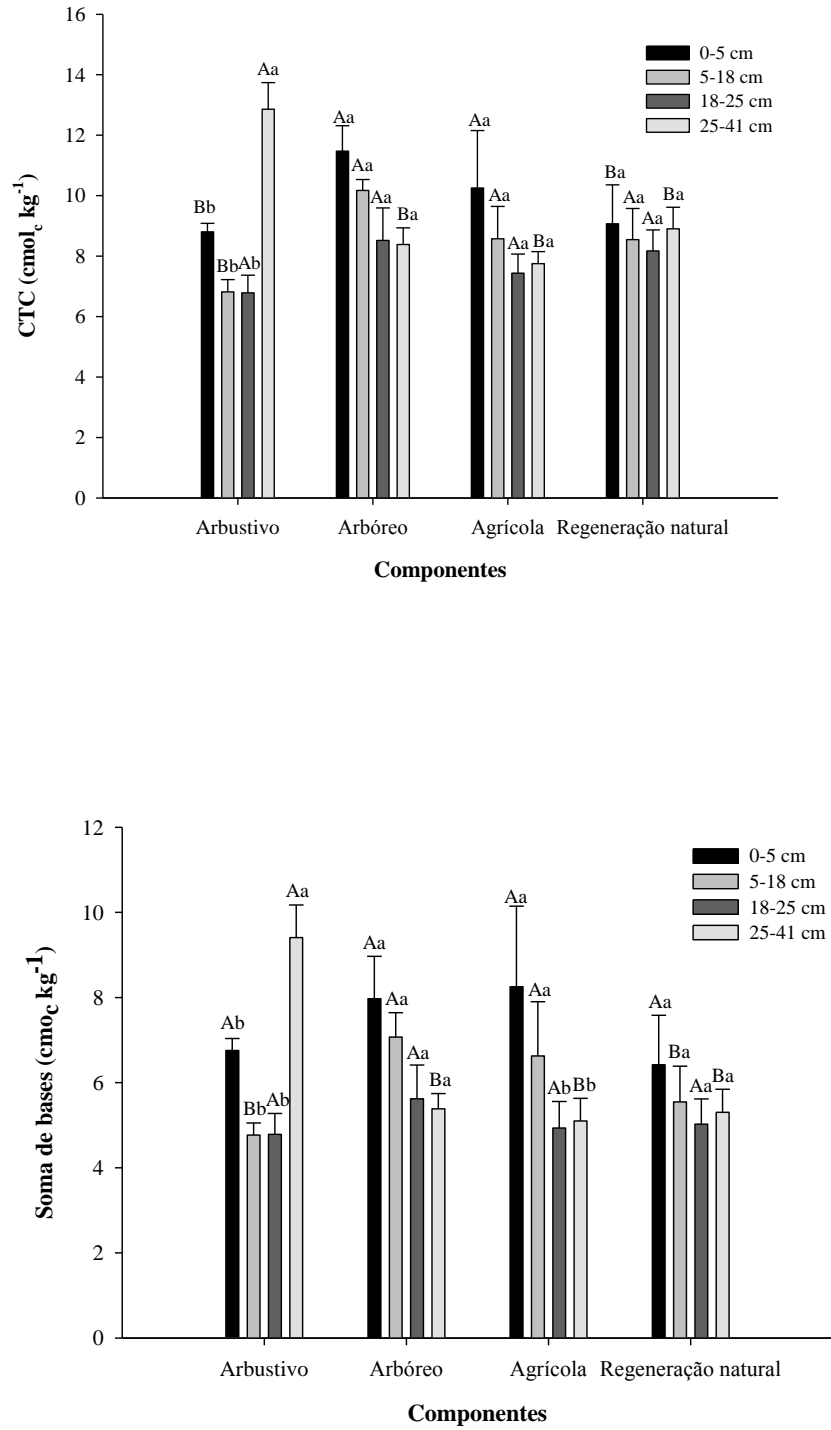
O teor de K^+ na profundidade de 0-5 cm foi maior no componente arbóreo (1,04 $cmol_c kg^{-1}$), seguido do componente agrícola, com 0,97 $cmol_c kg^{-1}$. Os menores teores estatisticamente iguais de K^+ foram encontrados no componente arbustivo e na área de regeneração natural, com 0,92 e 0,87 $cmol_c kg^{-1}$, respectivamente. Em sistemas agroflorestais, Alfaia *et al.* (2004) mencionam a possível exportação desse nutriente por sucessivas safras de produtos, o que pode proporcionar redução dos teores de K^+ no componente agrícola ao longo tempo.

A soma de bases ($Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+$) e a CTC apresentaram semelhantes resultados (Figuras 8). Para o componente arbustivo a SB foi maior na profundidade de 24-41 cm, sendo atribuída aos maiores teores de Na^+ , Ca^{2+} e K^+ encontrados nessa profundidade. Já para o componente arbóreo e regeneração natural, a soma de bases e CTC não variaram com as profundidades. Os sistemas radiculares profundos, bem como as raízes finas das árvores podem ser responsáveis por esse equilíbrio da SB e CTC ao longo de todas as profundidades, por meio de aportes radiculares.

As árvores facilitam a ciclagem de nutrientes e enriquecem o solo com nutrientes e matéria orgânica (LEHMANN *et al.*, 1998), o que leva a melhorias nas propriedades do solo, incluindo aumento de CTC. De acordo com Paciullo *et al.*, (2011), em sistema agrossilvipastoril há influência do componente arbóreo sobre a maioria das características do pasto. Ainda, Pezzoni *et al.* (2012) observaram que o acúmulo de serrapilheira sob as árvores pode favorecer os atributos químicos do solo, interferindo no desenvolvimento de outras plantas.

Para o componente agrícola, a soma de bases e CTC foram maiores superficialmente (0-5 e 5-18 cm), o que é ocasionado pelo manejo das culturas empregadas no SAF, no qual é realizada adubação orgânica e deposição do material de poda. Adicionalmente, as raízes no componente agrícola são mais superficiais em relação aos componentes que apresentam espécies arbóreas e arbustivas. A matéria orgânica, em maiores teores superficialmente, proporcionou maiores valores da CTC do solo. Para os demais componentes vegetais, a CTC superficial não diferiu estatisticamente da profundidade subjacente.

Figura 8 – Soma de bases e CTC em função das espécies vegetais e das profundidades. Médias seguidas da mesma letra maiúscula entre os componentes vegetais não diferem entre si. Médias seguidas da mesma letra minúscula dentro do mesmo componente vegetal não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.



4.2.3 Fósforo total (P)

No teste F da análise de variância para os teores de P foi constatada interação significativa (Tabela 11), sendo efetuado o desdobramento dos níveis de um fator dentro dos níveis do outro fator de tratamento.

Tabela 11 – Resumo da ANOVA para fósforo total no solo.

Fontes de Variação	Fósforo total
	Valor F
Componentes vegetais	261,655**
Profundidades	300,141**
Componentes vegetais* Profundidades	190,592**
CV1(%)	32,59
CV2(%)	21,42

** , * e ^{ns}: Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente; CV: Coeficiente de variação.

Os teores de P encontrados, de modo geral, foram superiores em superfície, associando-se isso à baixa mobilidade deste nutriente e à biociclagem proporcionada pelas plantas, na qual o P é absorvido nas camadas mais profundas pelas raízes e depositado na superfície pelos resíduos vegetais (ARAÚJO *et al.*, 2004). Foi constatada alta variabilidade nos teores de P (2,52 a 211,14 mg kg⁻¹) entre os componentes vegetais e profundidades (Tabela 12). De igual modo, Silveira *et al.* (2006), avaliando as concentrações de P em solos da Paraíba e Pernambuco observaram que os resultados das extrações de Mehlich 1 em amostras de solo apresentaram elevada variação (1 a 202 mg kg⁻¹). O conteúdo de P no solo é afetado principalmente por fatores como material de origem, clima, organismos e processos biogeoquímicos no solo, e a sua distribuição tem grande heterogeneidade espacial (LANE *et al.*, 2011).

Os maiores teores de P foram encontrados no horizonte A, referente ao componente agrícola, sendo isso explicado pela aplicação quantidades grandes de esterco ovino proveniente dos apriscos e adubação com resíduos de poda. Maiores teores de matéria orgânica em superfície contribuem com os maiores teores de P.

Com o uso da biomassa do componente arbustivo, observou-se que no solo desse componente redução nos teores de P, o que pode ser intensificado com o decorrer do tempo. O uso da leucena como adubadora e como banco de proteínas ocasiona redução dos teores de P do solo na sua área de influência. Uma importante recomendação para garantir a sustentabilidade do SAF é o aporte de P direcionado às leguminosas adubadoras.

Tabela 12 – Teores de P em função das espécies vegetais e das profundidades do solo. Médias seguidas da mesma letra maiúscula nas colunas e da mesma letra minúscula nas linhas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.

Componentes vegetais	Profundidades (cm)			
	0-5	5-18	18-25	25-41
	P mg kg ⁻¹			
Arbustivo	22,25 Ca	11,92 Bb	6,08 Ab	3,02 Bb
Arbóreo	41,80 Ba	15,92 Bb	14,12 Ab	13,25 Ab
Agrícola	209,21 Aa	211,14 Aa	3,80 Ab	15,10 Ab
Regeneração natural	16,61 Ca	3,87 Ba	2,52 Aa	2,81 Ba

Fonte: Autor.

Na área de regeneração natural foram encontrados menores teores de P superficialmente, juntamente com o componente arbustivo, comprovando que os teores de P disponível em solos do semiárido, em geral, são baixos, sendo por isso necessárias estratégias que maximizem a ciclagem do P nativo. Ressalta-se o uso de esterco orgânico, quando esses se encontram disponíveis. Além disso, mecanismos de captação de P da serapilheira e solo, como modificações de raízes e fungos micorrízicos, podem ser alternativas para aquisição de P em sistemas de solo de baixa fertilidade (MENDES-FILHO *et al.*, 2009).

4.2.4 Carbono orgânico total

No teste F da análise de variância para os teores de carbono orgânico do solo foi encontrada significância apenas o fator profundidades (Tabela 13).

Tabela 13 – Resumo da ANOVA para carbono orgânico total no solo

Fonte de Variação	Carbono orgânico total do solo
	Valor F
Componentes vegetais	2,972 ^{ns}
Profundidades	97,258 ^{**}
Componentes vegetais* Profundidades	1,011 ^{ns}
CV1(%)	44,8
CV2(%)	19,32

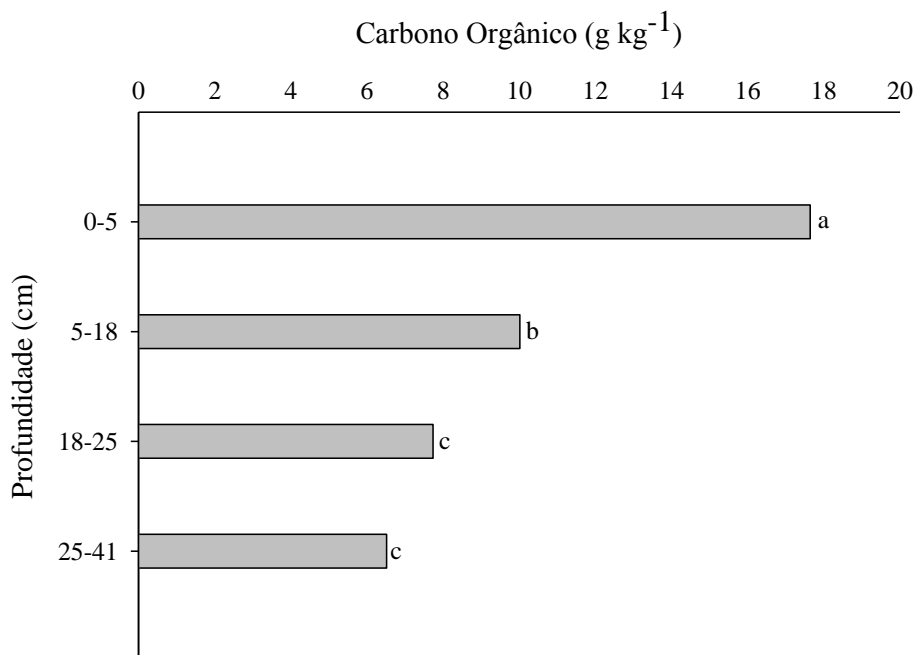
^{**}, * e ^{ns}: Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente; CV: Coeficiente de variação.

Esperava-se que o teor de carbono orgânico no solo sob regeneração natural fosse superior àquele observado nos SAFs, uma vez que solos sob pousio tendem a ser menos perturbados que sistemas cultivados, possibilitando maior acúmulo de matéria orgânica.

Todavia, as diferenças entre esses teores não foram significativas. Isso pode ser atribuído ao tempo de pousio ao qual a área de regeneração está submetida, não sendo suficiente para possibilitar a elevação dos teores de carbono do solo, e ao pastoreio de serapilheira pelos ovinos, que entram livremente na área. Todavia, não se descarta a resiliência estabelecida no SAF, que pode possibilitar a manutenção da matéria orgânica a níveis análogos às áreas de floresta nativa (DIAS, 2002).

O teor médio de carbono orgânico seguiu gradiente decrescente, maior em superfície ($17,64 \text{ g kg}^{-1}$), seguido das profundidades de 5-18 cm ($10,02 \text{ g kg}^{-1}$) e 18-25 e 25-41 cm com teores de $7,74$ e $6,52 \text{ g kg}^{-1}$, respectivamente (Figura 9).

Figura 9 – Teores médios de carbono orgânico total do solo (g kg^{-1}) nas profundidades de 0-5, 5-18, 18-25 e 25-41 cm. Barras seguidas da mesma letra minúscula não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.



Fonte: Autor.

Em sistemas agroflorestais, os resíduos vegetais são aportados no solo como restos de culturas, poda residual de árvores e serapilheira. Esses resíduos vegetais são fontes de nutrientes e matéria orgânica e, quando se decompõem, podem contribuir para a manutenção da fertilidade do solo (ZENG *et al.*, 2010). Considerando que 58% da matéria orgânica é carbono, multiplicando-se os valores médios de carbono orgânico pelo fator 1,724 ($100/58$), os valores médios de matéria orgânica para as profundidades de 0-5, 5-15, 18-25 e 25-41 cm foram

30,41, 17,27, 13,34 e 11,23 g kg⁻¹, respectivamente. Em estudo realizado por Menezes *et al.* (2012), considerando o pressuposto supracitado, o valor médio de matéria orgânica no bioma Caatinga foi de 16,03 g kg⁻¹ superficialmente. Dentre os teores encontrados no presente estudo, sabendo-se que se tratam do mesmo bioma, as duas primeiras profundidades foram superiores aos valores de Menezes *et al.* (2012). Isso é justificável pela reposição de nutrientes com uso de esterco, incorporação de resíduos de leguminosas no SAF.

Dessa forma, comprova-se que práticas que aumentam os teores de matéria orgânica do solo, com reduzido revolvimento do solo e aportes de materiais de qualidades distintas, contribuem para melhorar os teores de carbono orgânico e nutrientes no solo, culminando com melhorias para a diversidade microbiana e fertilidade do solo (BINI *et al.*, 2013).

4.3 Atributos físicos do solo

Os resultados dos atributos físicos determinados para os quatro perfis são apresentados e discutidos a seguir.

4.3.1 Densidade do solo

A densidade é um dos atributos físicos mais influenciados pela degradação estrutural do solo, sendo afetada por cultivos que alteram a estrutura e, por consequência, o arranjo e volume dos poros (KLEIN; LIBARDI, 2002). Mediante teste F da análise de variância (ANOVA) (Tabela 14), detectou-se que houve interação significativa, ou seja, as fontes de variação avaliadas (componentes vegetais e profundidades do solo) influíram conjuntamente na densidade do solo. A dispersão foi baixa em cada profundidade, com coeficientes de variação inferiores a 5,4%, tendo em vista que a densidade do solo é um atributo que apresenta baixa variabilidade e um coeficiente de variação menor que 12% (WARRICK; NIELSEN, 1980).

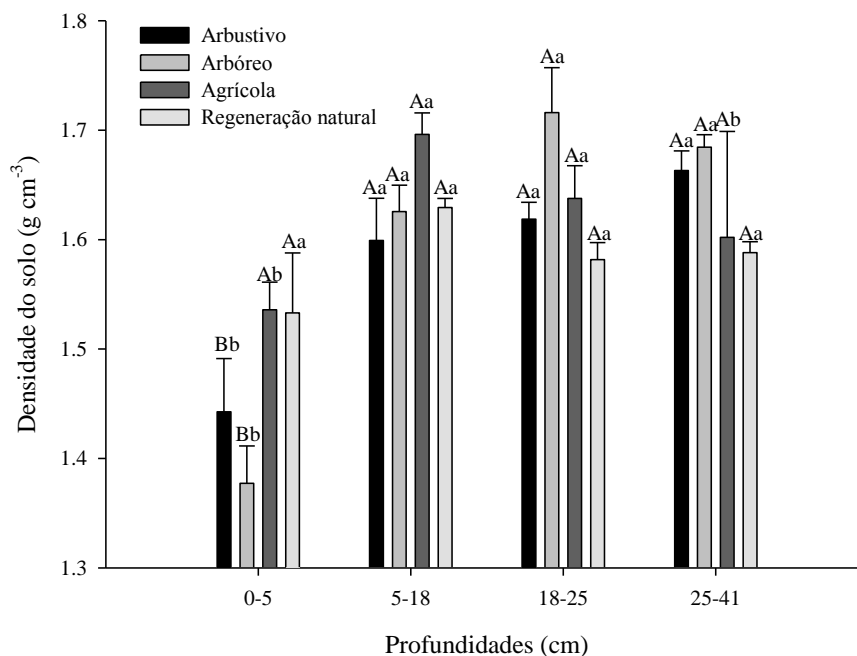
Tabela 14 – Resumo da ANOVA para densidade do solo.

Fontes de Variação	Densidade do solo
	Valor F
Componentes vegetais	0,655 ^{ns}
Profundidades	23,838**
Componentes vegetais* Profundidades	2,905*
CV1(%)	5,36
CV2(%)	4,23
CV3(%)	4,61

** , * e ^{ns}: Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente; CV: Coeficiente de variação.

O conhecimento da densidade constitui importante indicativo das condições de manejo (FERREIRA, 2010) e tem sido usado como medida da qualidade do solo devido às suas relações intrínsecas com outros atributos, como a porosidade. Os menores valores de densidade do solo foram encontrados na profundidade de 0-5 cm, variando de 1,38 a 1,53 g cm⁻³ entre os componentes do SAF e a área de regeneração natural (Figura 10).

Figura 10 – Densidade do solo em função das profundidade e componentes vegetais. Médias seguidas da mesma letra minúscula entre as profundidades e médias seguidas da mesma letra maiúscula dentro da mesma profundidade não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.



Foi observada maior variabilidade na densidade na camada de 0-5 cm, entre os componentes vegetais estudados. Nas camadas superficiais, geralmente, há maior variação na densidade do solo devido ao manejo (como revolvimento para o preparo do solo) o que pode propiciar a formação de poros com diâmetros maiores (MESQUITA; MORAES, 2004) os quais permitem maior infiltração de água no solo.

Ainda na profundidade de 0-5 cm, os componentes arbóreo e arbustivo resultaram em menores valores de densidade do solo ($1,38 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,44 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente) em relação aos demais componentes avaliados (Figura 10). Isso é justificável pela presença de árvores que, juntamente com perturbação mínima do solo, melhoram a maioria das propriedades do solo como os teores de matéria orgânica e agregação, diminuindo a densidade (ROMANECKAS *et al.*, 2009). Estes resultados estão em consonância com os maiores teores de carbono orgânico total encontrados superficialmente (Figura 9), que indicam maior teor de matéria orgânica, auxiliando na agregação, aumentando a porosidade e a infiltração da água, reduzindo a densidade do solo (SZOTT, 1991). Isso ocorre tanto pelo efeito positivo na estabilidade estrutural do solo, quanto pelo fato do o material orgânico apresentar baixa densidade, menor do que os sólidos minerais do solo (BRAIDA *et al.*, 2006).

O componente agrícola e a área de regeneração natural resultaram em densidades superiores estatisticamente para a profundidade de 0-5 cm ($1,54$ e $1,53 \text{ g cm}^{-3}$, respectivamente). Para a área agrícola isso é explicado pela presença de animais (caprinos e ovinos) no início da época seca, que permanecem duas horas por dia ao longo de 40 dias pastejando leguminosas e restolhos. O pisoteio animal tende a reduzir a porosidade e aumentar a densidade do solo, favorecendo a compactação (PEI *et al.*, 2008), sendo que os macroporos são destruídos primeiro (HORN *et al.*, 1995). A maior densidade na camada superficial na área de regeneração natural também pode ser atribuída ao pisoteio animal, pois estes entram na área em período seco e chuvoso. Os resultados deste estudo corroboram com o estudo de Silva, Reinert e Reichert (2000), no qual foi observado que para a profundidade de 0-5 cm, o pisoteio animal aumentou a densidade do solo em área cultivada com milho.

Apesar da densidade do solo na área de influência dos componentes agrícola e regeneração natural ter sido maior que os demais componentes na profundidade de 0-5 cm esses valores situam-se abaixo do valor crítico de densidade de solo proposto por Reinert, Reichert e Silva (2001) de $1,65 \text{ g cm}^{-3}$ para solos com menos de 20% de argila. Não foi possível relacionar as maiores densidades do solo para os componentes agrícola e regeneração natural aos teores de carbono orgânico total, tendo em vista que não foi observada diferença estatística entre os componentes vegetais.

Para a profundidade de 5-18 cm, apenas o componente agrícola superou o limite crítico de $1,65 \text{ g cm}^{-3}$ para solos com menos de 20% de argila; todavia, estatisticamente as densidades não diferiram para essa profundidade. Para a profundidade seguinte, de 18-25 cm, as densidades não diferiram entre os componentes estudados e variaram de $1,58$ a $1,72 \text{ g cm}^{-3}$ e apenas a área de regeneração natural superou o limite crítico de $1,55 \text{ g cm}^{-3}$ para solos com argila entre 20 e 55% (REINERT; REICHERT; SILVA, 2001). Os valores de densidade do solo, considerando todas as profundidades e componentes, variaram de $1,44$ a $1,70 \text{ g cm}^{-3}$, enquadrando-se nos parâmetros de Klein (2008) que explicita que os valores de densidade dos solos agrícolas variam de $0,9$ a $1,8 \text{ g cm}^{-3}$, dependendo da textura e do teor de matéria orgânica.

De modo geral, a densidade aumenta com a profundidade. Isso pode ser associado a incrementos nos teores de argila observados pela análise granulométrica (Tabela 1) e aumento no tamanho das unidades estruturais do solo (blocos subangulares para prismática -Tabela 4).

4.3.2 Macro e microporosidade

A estrutura define a geometria de poros, influenciando decisivamente a movimentação da água e do ar no perfil do solo, pois a macroporosidade é responsável pela livre circulação da água e ar e a microporosidade pela retenção da água (BRADY; WEIL, 2008). Com o teste F para a macro e microporosidade do solo foi observada significância em fatores isolados para a macro (componentes vegetais e profundidades) e interação para a microporosidade (componentes vegetais* profundidades), procedendo-se os desdobramentos (Tabela 15).

Tabela 15 – Resumo da ANOVA para macro e microporosidade do solo.

Fontes de Variação	Macro	Micro
	Valor F	
Componentes vegetais	6,411**	8,265**
Profundidades	29,557**	14,637**
Componentes vegetais* Profundidades	0,759 ^{ns}	2,779*
CV1(%)	29,17	9,84
CV2(%)	25,42	8,17
CV3(%)	28,76	9,00

** , * e ^{ns}: Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente; CV: Coeficiente de variação.

A macroporosidade tem, geralmente, origem estrutural e/ou biológica e esses poros contribuirão com a infiltração e condução de água no solo (COOPER; VIDAL-TORRADO,

2005). Os maiores valores de macroporosidade foram encontrados na área de influência dos componentes arbustivo e arbóreo, com valores de 13,21 e 13,60%, respectivamente, de modo que não diferiram estatisticamente (Tabela 17). Com isso observa-se que há favorecimento de processos de condução de água no solo desses componentes. Embora a macroporosidade represente uma pequena porção da porosidade total do solo, esses vazios de maior tamanho têm papel importante na condutividade hidráulica do solo (DUNN; PHILLIPS, 1991).

Foi encontrado o menor valor de macroporosidade para o componente agrícola, que não diferiu estatisticamente da área de regeneração natural (10,08%) (Tabela 17). O limite de macroporosidade considerado crítico é de $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ($\approx 10\%$ de porosidade de aeração), ou seja, valores inferiores podem indicar alteração estrutural, comprometendo a drenagem de água no solo, reduzindo a permeabilidade do solo, tornando-o suscetível à erosão (GRABLE; SIEMER, 1968).

A camada superficial apresentou maior quantidades de macroporos (Tabela 17) por apresentar menores valores de densidade do solo, evidenciando a relação inversa entre esses dois atributos.

Para as profundidades de 5-18 e 18-25 cm, os valores de macroporosidade não diferiram (Tabela 16); contudo, esses valores situam-se acima do limite crítico de 10%, ao contrário da profundidade de 25-41cm, em que os valores de macroporosidade situaram-se abaixo desse limite, indicando alteração da qualidade estrutural que pode comprometer o desenvolvimento do sistema radicular das plantas e a função de drenagem do solo.

Tabela 16 – Comparação de médias entre os componentes vegetais e profundidade (fatores isolados), para macroporosidade do solo.

Componentes vegetais	Macroporosidade (%)
Arbustivo	13,21a \pm 1,27
Arbóreo	13,60a \pm 1,24
Agrícola	9,40b \pm 0,98
Regeneração natural	10,08b \pm 1,23
Profundidades (cm)	Macroporosidade (%)
0-5	16,70a \pm 1,14
5-18	11,30b \pm 0,80
18-25	11,36b \pm 1,05
25-41	6,93c \pm 0,53

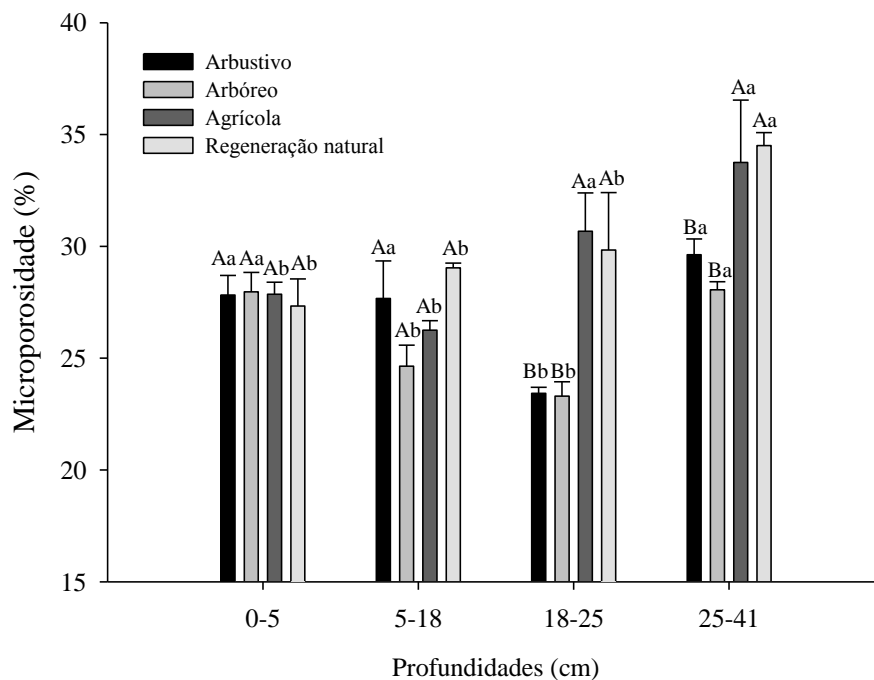
Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

O decréscimo da macroporosidade com a profundidade está relacionado com a textura do solo determinada pela análise granulométrica, que é franco-arenosa na superfície e

se modifica para franco-argilo-arenosa (Tabela 4). Portanto, a primeira textura está mais ligada com processos de condução de água, e a outra associada à de processos de retenção. A maior macroporosidade em superfície também está relacionada ao menor tamanho das unidades estruturais observadas na descrição morfológica (blocos subangulares pequenos a médios), que permite a formação de mais poros relacionados às unidades estruturais do que pode ser obtido nos horizontes subsuperficiais que apresentam maiores unidades estruturais (prismáticas grandes) (Tabela 4).

No que diz respeito à microporosidade, todos os componentes vegetais avaliados apresentaram valores que não diferiram em superfície (Figura 11), indicando também homogeneidade dessa camada no que se refere aos processos de retenção de água no solo.

Figura 11 – Microporosidade do solo em função das profundidades e componentes vegetais. Médias seguidas da mesma letra minúscula entre as profundidades e médias seguidas da mesma letra maiúscula dentro da mesma profundidade não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.



Fonte: Autor.

A tendência de aumento da quantidade de microporos com a profundidade é associada à textura, haja vista que horizontes com maiores teores de argila tendem à maior

formação de microporos pela formação de microagregados de argila. Esse aumento de microporosidade também pode ser associado ao aumento das unidades estruturais que permite maior formação de poros no interior dos agregados.

De 18-25 e 25-41 cm, observou-se maior microporosidade para o componente agrícola e área de regeneração natural, indicando maior formação de microporos, o que corrobora com a maior capacidade de retenção de água pelo solo associado a esses componentes. Esse aumento de microporosidade corrobora com a redução da macroporosidade também observada nessas profundidades para esses componentes.

4.3.3 Resistência do solo à penetração

A resistência mecânica do solo à penetração é influenciada diretamente pela densidade do solo, proporcionando um indicativo do estado de compactação do solo, sendo variável com a umidade, textura e estrutura do solo (IMHOFF; SILVA; TORMENA, 2000). Com o teste F para resistência do solo à penetração detectou-se interação significativa, fazendo-se, assim, o desdobramento de um fator dentro do outro (Tabela 17).

Tabela 17 – Resumo da ANOVA para resistência do solo à penetração.

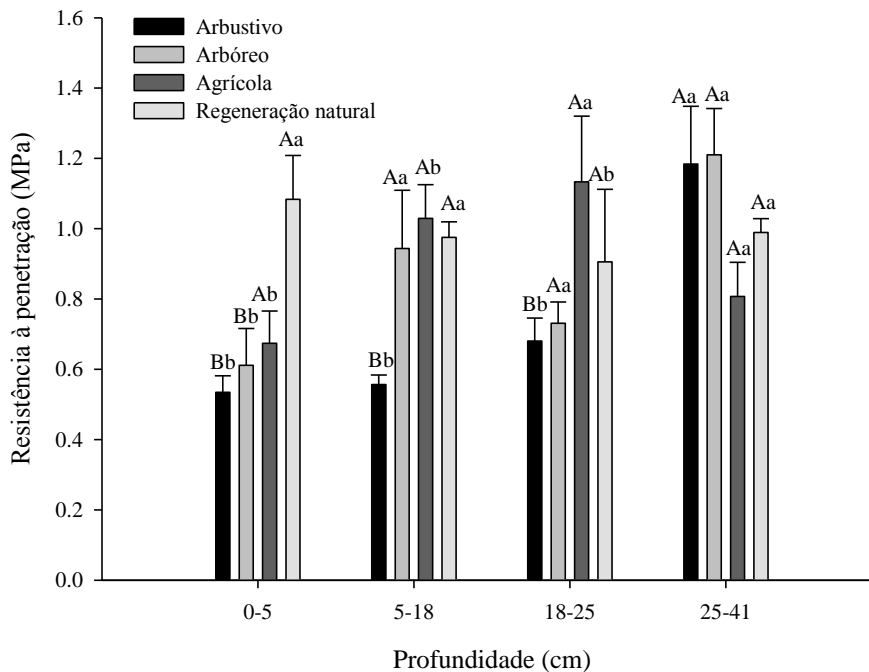
Fonte de Variação	Resistência do solo à penetração
	Valor F
Componentes vegetais	3,303 ^{ns}
Profundidades	10,151**
Componentes vegetais* Profundidades	2,724*
CV1(%)	26,18
CV2(%)	18,86
CV3(%)	29,87

**, * e ^{ns}: Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente; CV: Coeficiente de variação.

A resistência do solo à penetração permite identificar no solo se há resistência mecânica potencialmente limitante ao crescimento das raízes (IMHOFF; SILVA; TORMENA, 2000). No solo da área de influência de todos os componentes vegetais, bem como em todas as profundidades, os valores de resistência do solo à penetração se situaram entre 0,53 e 1,21 MPa (Figura 12), ficando abaixo do limite de 2,0 MPa, que é considerado como crítico e é utilizado

no conceito do intervalo hídrico ótimo (SILVA; KAY; PERFECT, 1994; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998).

Figura 12 – Resistência do solo à penetração, com erros padrão das médias, em função das profundidade e espécies vegetais. Médias seguidas da mesma letra minúscula entre as profundidades e seguidas da mesma letra maiúscula dentro da mesma profundidade não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.



Fonte: Autor.

Como se trata de um fator de impedimento mecânico que o solo oferece ao desenvolvimento de raízes de plantas e que afeta diretamente a produtividade das culturas (SILVA *et al.*, 2008), o solo do SAF e da área de regeneração natural não influi de modo negativo no crescimento e desenvolvimento das plantas quanto a esse fator.

De acordo com a Figura 11, o valor de resistência à penetração na umidade correspondente à capacidade de campo na profundidade de 0-5 cm, foi maior para a área de regeneração natural. De acordo com Giarola, Tormena e Dutra (2007), a presença de argila dispersa em água pode contribuir para o aumento da resistência à penetração, sendo que no presente estudo foram encontrados maiores teores de argila dispersa de 0-5 cm para a área de

regeneração natural (Tabela 1), justificando a maior resistência à penetração. Os maiores valores de resistência à penetração para essa área estão em consonância com os maiores valores de densidade encontrados.

Para os componentes arbustivo e arbóreo, observou-se que há aumento na resistência à penetração com a profundidade. Isso pode estar associado ao aumento da densidade do solo e à deposição de partículas finas das camadas superiores para as inferiores tendo em vista que há aumento de argila dispersa em água em profundidade. Como a medida da resistência à penetração foi realizada em uma mesma unidade para todos os tratamentos, a densidade do solo e textura foram os fatores que contribuíram para a maior resistência do solo à penetração, sendo que a mudança de textura com a profundidade de franco-arenosa para franco-argilo-arenosa proporciona aumentos de resistência do solo à penetração devido à maior manifestação da coesão entre as partículas de argila em relação às de areia (PEDROTTI *et al.*, 2001).

A resistência do solo à penetração também é influenciada pela estrutura do solo, e como a área de regeneração natural possui homogênea estrutura em blocos subangulares ao longo de todo o perfil (Tabela 4), houve homogênea resistência do solo à penetração, que não diferiu entre profundidades.

O uso agrícola pode causar alterações na resistência do solo à penetração, modificando-a negativamente quando ocorre degradação da estrutura (AGUIAR, 2008). Apesar disso, o solo sob componente agrícola possibilitou baixos valores de resistência à penetração ao longo das profundidades estudadas, com aumento em profundidade em decorrência da mudança de textura e aumento das unidades estruturais. Isso também pode ser atribuído ao manejo conservacionista do SAF. No qual, embora haja pisoteio animal, permite incremento de matéria orgânica de qualidades diferentes e maior proteção do solo, permitindo baixos valores de resistência à penetração mesmo com as alterações propiciadas pelo cultivo de *Zea mays*.

4.3.4 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar

A permeabilidade ao ar (K_{ar}) é uma medida da capacidade do solo de conduzir ar, em resposta a um gradiente de pressão, por um processo denominado fluxo de massa (LAL, 2000). De modo similar à condutividade hidráulica, a permeabilidade ao ar depende do conteúdo volumétrico de água e da quantidade, forma, tamanho e continuidade de poros

(ROSEBERG; MCCOY, 1990). A análise estatística para a permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) na tensão adotada por Silva, Kay e Perfect (1994) para definir o intervalo hídrico menos limitante – a capacidade de campo, em 10 kPa –, mostrou diferença significativa entre os componentes vegetais, sendo as demais fontes de variação não significativas (Tabela 18).

Tabela 18 – Resumo da ANOVA para permeabilidade intrínseca do solo ao ar.

Fontes de Variação	Log K_{ar} Valor F
Componentes vegetais	5,959**
Profundidades	2,913 ^{ns}
Componentes vegetais* Profundidades	0,843 ^{ns}
CV1(%)	5,96
CV2(%)	5,80
CV3(%)	6,19

**, * e ^{ns}: Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente; CV: Coeficiente de variação.

O solo na área de influência dos componentes arbustivo e arbóreo apresentam maior área disponível ao fluxo de gases em relação ao componente agrícola e área de regeneração natural (Tabela 19), que não diferiram estatisticamente entre si. A permeabilidade do solo ao ar e à água ocorre principalmente nos macroporos (RODRIGUES *et al.*, 2011) e, assim, a maior macroporosidade do solo dos componentes arbustivo e arbóreo resultou em maior permeabilidade do solo ao ar. Isso corrobora com os menores valores de densidade anteriormente citados para os componentes arbustivo e arbóreo, bem como menor resistência à penetração de raízes. Atribui-se isso também à densidade de raízes observada na descrição morfológica.

Tabela 19 – Comparação de médias, com erros padrão da média, para permeabilidade intrínseca do solo ao ar.

Componentes vegetais	Log ₁₀ K_{ar} (μm^2)
Arbustivo	1,46a \pm 0,019
Arbóreo	1,51a \pm 0,019
Agrícola	1,41b \pm 0,024
Regeneração natural	1,39b \pm 0,024

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Um solo com K_{ar} de $1 \mu\text{m}^2$ ($\log K_{ar}=0$) é considerado impermeável, ou seja, os poros de aeração estão bloqueados e não fazem parte do transporte convectivo do ar (MCQUEEN; SHEPHERD, 2002). Tal condição não foi encontrada para nenhum componente,

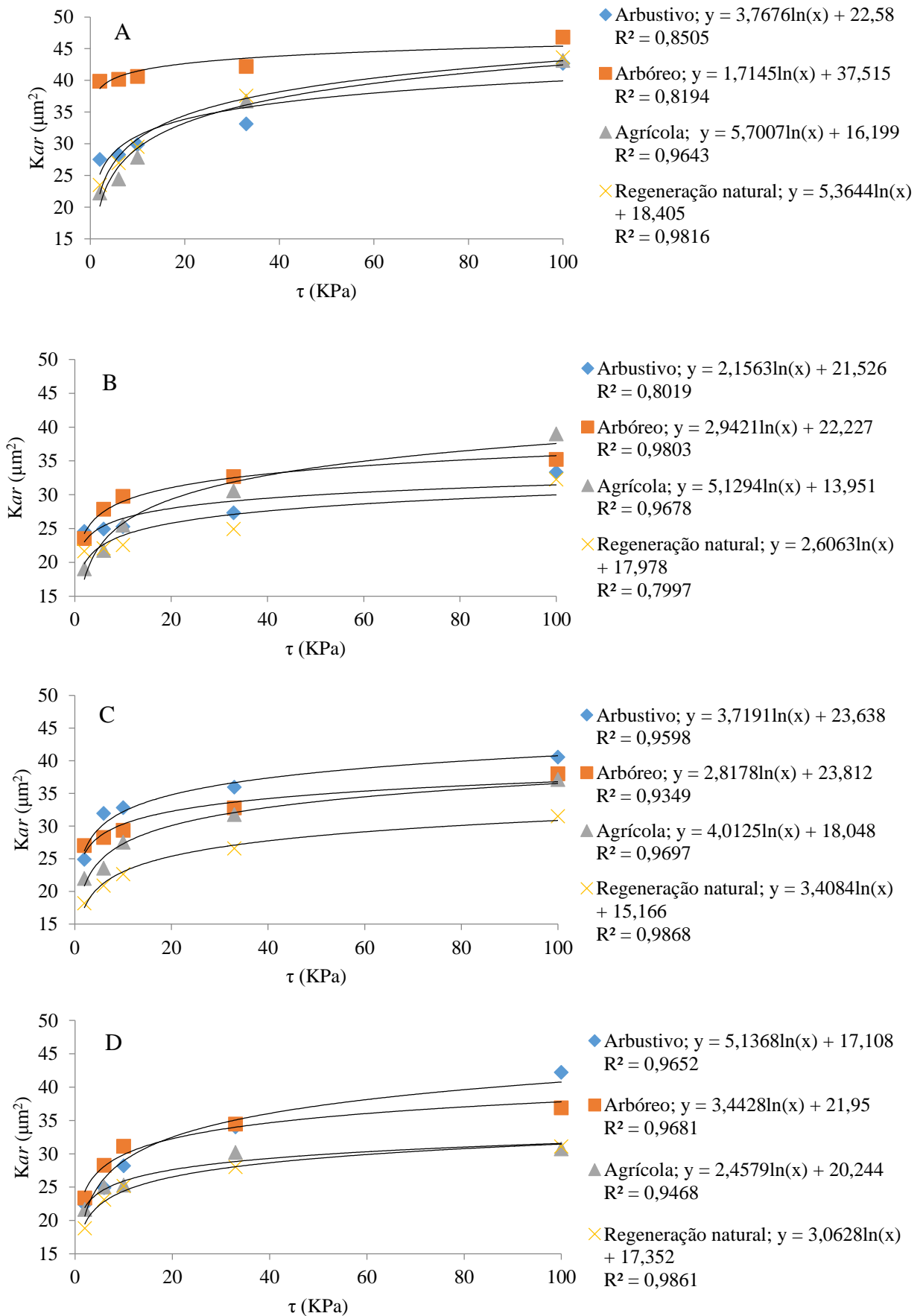
nas tensões aplicadas desde 2 até 100 kPa, evidenciando que, mesmo em condição próxima à saturação, a permeabilidade do solo ao ar não é limitante ao desenvolvimento das culturas.

Ao comparar os componentes do SAF com a área de regeneração natural, verificou-se que o manejo do SAF não degradou a rede porosa, visto que os valores K_{ar} são semelhantes ou superiores aos encontrados na área de regeneração natural. Destaca-se que as práticas culturais alteram o espaço poroso, influenciando o ambiente de trocas gasosas na zona das raízes (TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998; RODRIGUES *et al.*, 2011); contudo, as práticas agrícolas do SAF proporcionam funcionalidade a essa rede de poros.

A Figura 13 representa a relação entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) e as tensões aplicadas (τ) nas amostras de solo com estrutura indeformada nas profundidades de 0-5 cm, 5-18 cm, 18-25 cm e 25-41 cm, na área de influência dos componentes vegetais.

A K_{ar} exibiu correlação positiva com ajuste logarítmico em relação às tensões para todos os componentes vegetais analisados. Dessa forma, a aplicação de tensões mais elevadas permite maior retirada de água do solo culminando em aumento da área disponível ao fluxo de gases, confirmando que a permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) possui relação inversa com o conteúdo de água no solo (SILVA *et al.*, 2009), ou seja, a permeabilidade do solo ao ar alcança seu valor máximo em solos secos e decresce à medida que o solo é umedecido até alcançar um valor de zero quando o solo está próximo ou na saturação (RODRIGUES *et al.*, 2011).

Figura 13 – Permeabilidade do solo ao ar em função das tensões. A) 0-5 B) 5-18 C) 18-25 D) 25-41 cm.



Observou-se que a K_{ar} na profundidade de 0-5 cm para uma tensão de 10 kPa (tensão correspondente à capacidade de campo sob as condições estabelecidas para o intervalo hídrico ótimo) foi maior para o componente arbóreo, aproximadamente $40 \mu\text{m}^2$. Quando se aumenta a profundidade, 5-18 cm, a permeabilidade ao ar decresce resultando em valores de $30 \mu\text{m}^2$, o que está de acordo com o decréscimo de macroporosidade. Para as profundidades de 18-25 e 25-41 cm, as maiores permeabilidades foram observadas para o componente arbustivo e arbóreo, respectivamente. Todos os valores de K_{ar} em todas as profundidades estão acima da permeabilidade crítica ($1 \mu\text{m}^2$) que é considerada não funcional.

As maiores permeabilidades do solo ao ar foram encontradas nos horizontes superficiais. Isso ocorre devido à maior macroporosidade encontrada nesses horizontes e também pelo maior teor de matéria orgânica, que promove redução dos valores de densidade do solo e, conseqüentemente, aumento da porosidade (MOSADDEGHI *et al.*, 2009).

Observou-se que os horizontes formados por unidades estruturais prismáticas de grau forte ou moderado (subsuperficiais) apresentam um comportamento físico-hídrico influenciado pelo menor desenvolvimento macroporos e, conseqüentemente, por valores mais baixos de permeabilidade e um maior desenvolvimento de microporos, que favorecem os processos de retenção de água.

4.3.5 Índices de continuidade de poros

O cálculo da razão entre a K_{ar} (permeabilidade intrínseca do solo ao ar) e a εa (porosidade de aeração), denominado de índice de continuidade de poros (K_1), é útil para indicar se as diferenças nos valores de K_{ar} podem ser atribuídas somente a diferenças na porosidade de aeração ou se devem ser atribuídas também ao aspecto geométrico do espaço poroso preenchido com ar. Assim, quanto maior o valor desse índice, mais contínuos serão os poros do solo (GROENEVELT, KAY; GRANT, 1984). Dessa forma, observou-se que os índices de continuidade de poros apresentaram diferença estatística apenas entre profundidades (Tabela 20). O índice de continuidade (K_1) à 6, 10, 33 e 100 KPa apresentaram significância apenas em profundidades, e o K_1 a 2 KPa obteve significância nos fatores componentes e profundidades.

Tabela 20 – Resumo da ANOVA para índice de continuidade de poros (K_1).

τ (KPa)	----- $\text{Log}_{10}K_1, \mu\text{m}^2$ -----				
	2	6	10	33	100
FV	Valor F				
Comp. (C)	12,245**	1,275 ^{ns}	0,788 ^{ns}	1,372 ^{ns}	1,602 ^{ns}
Prof. (P)	15,102**	14,859**	14,854**	7,326**	6,749**
C * P	1,240 ^{ns}	0,839 ^{ns}	0,927 ^{ns}	0,836 ^{ns}	1,326 ^{ns}
CV1(%)	3,87	5,18	5,45	5,7	4,18
CV2(%)	4,72	6,04	5,82	6,56	4,85
CV3(%)	8,47	5,42	4,9	4,46	4,64

**, * e ^{ns}: Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente; CV: Coeficiente de variação.

A maior continuidade de poros ou menor tortuosidade dos poros na tensão de 2 KPa foi observada na profundidade de 0-5 cm, no solo do componente agrícola, com valor de 2,71 (Tabela 21). Apesar de haver pouco revolvimento do solo em SAFs, o cultivo do componente agrícola proporcionou maior continuidade de poros, mesmo em uma condição próxima à saturação.

As raízes e a atividade biológica são os principais responsáveis pela criação de poros contínuos e alongados no solo (RODRIGUES *et al.*, 2011). Visualmente, observou-se atividade biológica mais intensa no componente arbóreo, porém esta não foi eficiente para superar a maior continuidade criada pelo revolvimento no componente agrícola. Nas tensões de 6, 10, 33 e 100 KPa, o índice de continuidade K_1 não diferiu entre o solo dos componentes vegetais (Tabela 21).

Referente às profundidades (Tabela 21) foi observado que a maior continuidade de poros ocorreu na camada de 25-41 cm, independente da tensão.

Tabela 21 – Comparação de médias para índice de continuidade de poros (K_1) para as tensões de 2, 6, 10, 33 e 100 KPa.

Componentes	τ (KPa)				
	2	6	10	33	100
	----- $\text{Log}_{10}K_1, \mu\text{m}^2$ -----				
Arbustivo	2,54b \pm 0,051	2,35a \pm 0,043	2,31a \pm 0,041	2,22a \pm 0,046	2,27a \pm 0,043
Arbóreo	2,52b \pm 0,037	2,38a \pm 0,028	2,33a \pm 0,028	2,26a \pm 0,024	2,26a \pm 0,025
Agrícola	2,71a \pm 0,067	2,43a \pm 0,050	2,37a \pm 0,045	2,31a \pm 0,038	2,33a \pm 0,024
Regeneração	2,54b \pm 0,048	2,40a \pm 0,051	2,34a \pm 0,048	2,26a \pm 0,033	2,29a \pm 0,025
Profundidades	----- $\text{Log}_{10}K_1, \mu\text{m}^2$ -----				
0-5cm	2,47b \pm 0,025	2,25b \pm 0,025	2,21b \pm 0,028	2,17b \pm 0,033	2,22b \pm 0,020
5-18 cm	2,54b \pm 0,040	2,34b \pm 0,031	2,28b \pm 0,029	2,21b \pm 0,037	2,27b \pm 0,035
18-25 cm	2,55b \pm 0,058	2,38b \pm 0,036	2,34b \pm 0,036	2,27b \pm 0,025	2,29b \pm 0,027
25-41 cm	2,75a \pm 0,063	2,58a \pm 0,035	2,52a \pm 0,025	2,40a \pm 0,019	2,39a \pm 0,022

Médias seguidas da mesma letra minúscula nas colunas não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

Esse fato é justificável pela natureza das argilas constituintes, supondo-se ser do tipo 2:1, em virtude dos processos de expansão e contração observados nessa profundidade. Isso proporcionou, durante os procedimentos analíticos (umedecimento e secagem para a obtenção da permeabilidade), o aparecimento de microfissuras, que geraram fluxo preferencial de ar, resultando em maiores valores de permeabilidade intrínseca do solo ao ar, o que elevou o índice de continuidade de poros. Vale salientar que se considerou fluxo preferencial pelas microfissuras, mas não pelas paredes do cilindro, uma vez que não houve descolamento das amostras.

Todos os valores de índice de continuidade de poros foram superiores a 2,17, sendo que valores baixos refletem uma continuidade dos poros reduzida devido à processos antrópicos como a compactação (MUNKHOLM; SCHJØNNING; KAY, 2002).

O movimento da água no solo depende não só do tamanho e da forma dos poros, mas principalmente da sua continuidade (PAGLIAI; VIGNOZZI; PELLEGRINI, 2004). A permeabilidade ao ar e a porosidade de aeração têm sido relacionadas na tentativa de avaliar possíveis diferenças na geometria dos poros resultantes das práticas de manejo adotadas (BLACKWELL *et al.*, 1990). A K_{ar} também foi relacionada com a ϵ_{ar} por um modelo exponencial (Tabela 22), obtendo-se as constantes M e N.

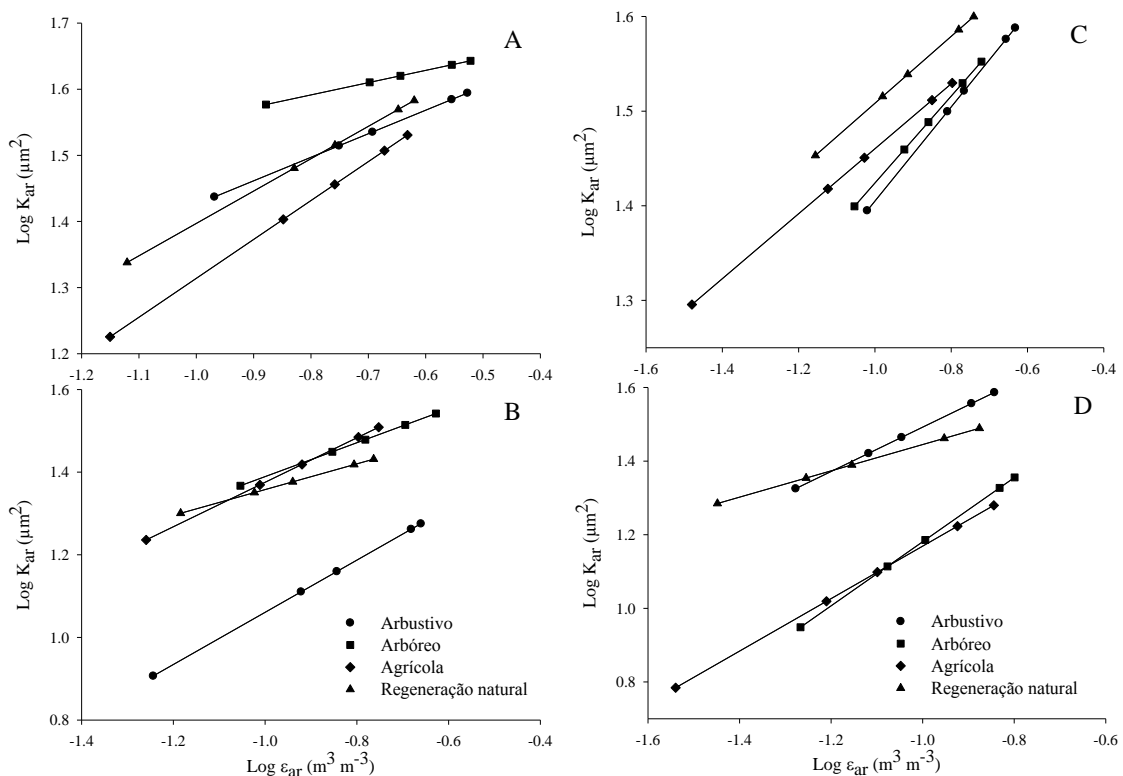
Tabela 22 – Médias dos parâmetros da regressão do modelo $\log K_{ar} = \log M + N$ e porosidade bloqueada (ϵ_b), no solo na área de influência dos componentes vegetais nas profundidades 0-5, 5-18, 18-25 e 25-41 cm.

Componentes vegetais	Prof. (cm)	Log M	N	R ²	ϵ_b
Arbustivo	0-5	1,78	0,36	0,83	0,0
	5-18	1,69	0,63	0,72	0,2
	18-25	1,90	0,50	0,96	0,0
	25-41	2,09	0,60	0,93	0,0
Arbóreo	0-5	1,74	0,19	0,75	0,0
	5-18	1,80	0,41	0,99	0,0
	18-25	1,88	0,46	0,90	0,0
	25-41	2,05	0,87	0,98	0,4
Agrícola	0-5	1,90	0,59	0,80	0,1
	5-18	1,91	0,54	0,96	0,0
	18-25	1,80	0,34	0,89	0,0
	25-41	1,88	0,71	0,97	0,2
Regeneração natural	0-5	1,89	0,49	0,81	0,0
	5-18	1,67	0,31	0,90	0,0
	18-25	1,86	0,54	0,93	0,0
	25-41	1,80	0,36	0,98	0,0

Fonte: Autor.

O modelo permitiu ajuste dos dados com $R^2 > 0,72$, conforme demonstrado pela representação log-log na Figura 14. A inclinação da reta (N) da relação log-log entre K_{ar} e ε_{ar} também é um índice de continuidade de poros e mostra a percentagem de abertura dos caminhos dos poros contínuos disponíveis para o fluxo de ar com o aumento da ε_{ar} , ou seja, a reta mais inclinada indica maior continuidade de poros (RODRIGUES *et al.*, 2011).

Figura 14 – Relação logarítmica entre K_{ar} e ε_{ar} para solo na área de influência dos componentes do SAF (arbustivo, arbóreo, agrícola) e regeneração natural nos horizontes de 0-5 cm (A), 5-18 cm (B), 18-25 (C) e 25-41 (D).



Fonte: Autor.

De 0-5 cm, a inclinação da reta (N) foi maior para o componente agrícola, indicando, semelhante ao índice K_1 , presença de poros mais contínuos para o solo desse componente superficialmente. De 5-18 cm, o N foi maior para o componente arbustivo; de 18-25 cm a maior inclinação foi observada para a área de regeneração natural e de 25-41 cm, o N foi maior para o componente arbóreo. Esses resultados não permitem indicar qual componente vegetal proporciona maior continuidade ou menor tortuosidade de poros no solo.

Semelhante ao K_1 , o N mostra a tendência de aumento da continuidade com a profundidade do solo, o que é justificado pelo aumento nos teores de argila, conferindo fendas ao solo, proporcionando esse aumento de continuidade de poros. Aumento em N com o aumento no conteúdo de argila também foi observado por Schjønning *et al.* (1999).

O solo na área de influência de todos os componentes vegetais não apresenta poros bloqueados (εb) (estimado com valores de intercepto (M) e inclinação (N)), ou seja, todos os poros presentes no solo até 41 cm de profundidade estão contribuindo com o fluxo de ar e água.

4.3.6 Índice S

O índice S é definido como a inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão da curva característica de água no solo, sendo considerado indicador de qualidade. De posse da curva gravimétrica, obteve-se o índice S, definido por Dexter (2004). A análise estatística para o índice S, mediante teste F da análise de variância, exibiu significância apenas para o fator profundidades (Tabela 23).

Tabela 23 – Resumo da ANOVA para índice S.

Fonte de Variação	Índice S
Componentes vegetais	1,874 ^{ns}
Profundidades	25,841**
Componentes vegetais* Profundidades	0,830 ^{ns}
CV1(%)	19,33
CV2(%)	25,81
CV3(%)	40,61

** , * e ^{ns}: Significativo a 1 e 5% de probabilidade e não significativo, respectivamente; CV: Coeficiente de variação.

A premissa fundamental do índice S é que a qualidade física ou estrutural do solo é determinada pelos poros oriundos da estrutura do solo, ao invés de poros decorrentes da textura (REYNOLDS *et al.* 2009). O índice S foi maior em superfície, não diferindo nas profundidades de 5-18, 18-25 e 25-41 cm (Tabela 24). O valor do S em superfície situa-se acima do valor de 0,035 sugerido por Dexter (2004), que indica solo com boa qualidade física, ou seja, que apresenta boas condições estruturais e menores restrições ao crescimento das raízes das plantas.

Tabela 24 – Comparação de médias, com erros padrão, entre as profundidades 0-5 cm, 5-18 cm, 18-25 cm e 25-41 cm, para o índice S.

Profundidades (cm)	Índice S
0-5	0,046a ± 0,003
5-18	0,030b ± 0,002
18-25	0,026b ± 0,002
25-41	0,022b ± 0,001

Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5% de probabilidade.

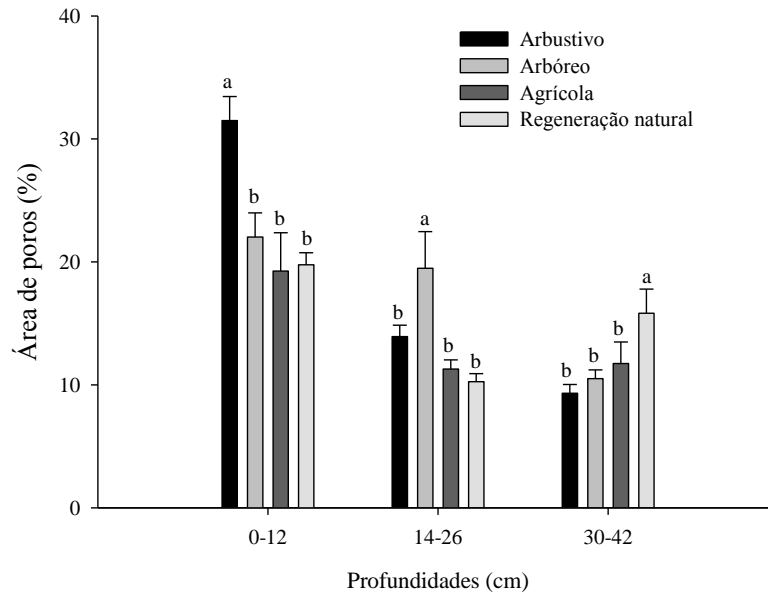
A redução do índice S nas profundidades de 5-18 e 18-25 cm indica diminuição da inclinação da curva característica de água no solo no ponto de inflexão (DEXTER, 2004).

O solo na profundidade de 25-41 cm é classificado com baixa qualidade estrutural, situando-se abaixo do valor representado pelo valor de índice S de 0,025 limitado por Andrade e Stone (2009). Segundo os autores, os solos com valores de índice S abaixo desse limite, apresentam condições físicas muito pobres, restringindo o crescimento das raízes das plantas. Contudo, convém salientar que o estabelecimento de valores fixos para a classificação de um mecanismo tão complexo, como a qualidade física do solo, tem sido uma crítica constante a este indicador (JONG VAN LIER, 2014).

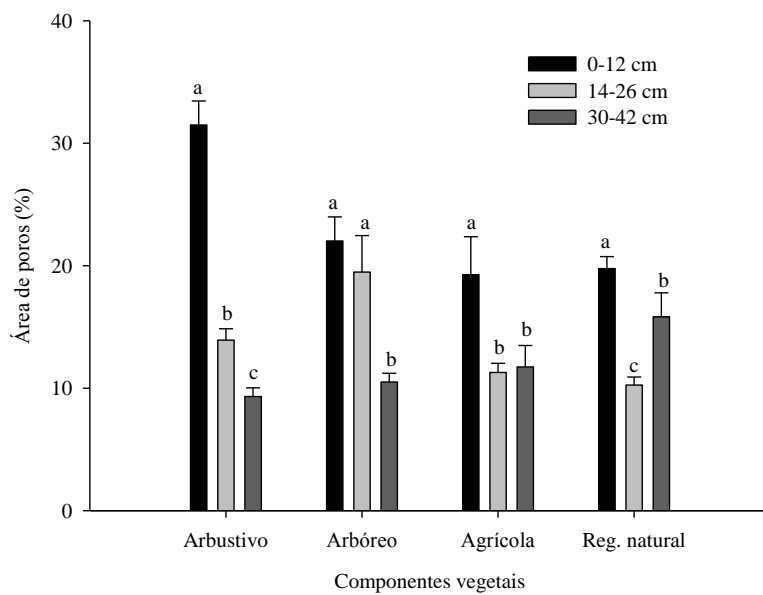
4.3.7 Porosidade do solo pelo método da análise de imagens

Na comparação da área de poros do solo entre componentes vegetais, de 0-12 cm, (figura 15a) constata-se que o componente arbustivo (*L. leucocephala*) resultou em área de poros superior (31,49%), aos demais componentes (arbóreo, agrícola e regeneração natural). Atribui-se essa maior porosidade em superfície encontrada em área de influência de *L. leucocephala* à densidade de raízes da leguminosa, que foi observada em descrição morfológica (ANEXOS), e que possuem tendência em crescer no horizonte A (ALVARENGA *et al.*, 1995). Ainda, Carranca *et al.* (2015) mencionam contribuição positiva de tecidos subterrâneos de leguminosas na estrutura do solo.

Figura 15 – Teste de comparação da porosidade total entre: (a) Comparação entre componentes vegetais e área de regeneração natural dentro da mesma profundidade. Médias seguidas da mesma letra minúscula entre os componentes vegetais não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%. (b) Comparação entre profundidades dentro do mesmo componente vegetal. Médias seguidas da mesma letra minúscula entre as profundidades não diferem entre si pelo teste de Scott-Knott a 5%.



(a)



(b)

Os maiores teores de matéria orgânica contribuem para justificar a maior porosidade, sendo também corroborada, para o componente arbustivo e arbóreo, pela menor densidade, maior macroporosidade, menor resistência à penetração, maior área disponível ao fluxo de gases e maior índice S, indicando maior qualidade física superficialmente. Especula-se também, em consonância com explicações apresentadas por Baver (1972), que a maior porosidade dos horizontes superficiais está relacionada ao menor tamanho das unidades estruturais, que permite a formação de mais poros relacionados às mesmas do que pode ser obtido nos horizontes subsuperficiais que apresentam maiores unidades estruturais. Isso foi confirmado nos solos estudados em descrição morfológica (ANEXOS). Nos horizontes superficiais há predomínio blocos subangulares pequenos a médios, enquanto que em horizontes subsuperficiais há predomínio de estrutura prismática de tamanho médio a grande.

Na comparação da área de poros do solo entre as profundidades para o mesmo componente vegetal, foi constatado que o solo na área de influência do componente arbustivo apresentou porosidade maior em superfície que foi reduzindo com a profundidade (Figura 15b). Isso ocorreu devido ao aumento de densidade do solo, diminuição da macroporosidade, redução dos teores de matéria orgânica, aumento do tamanho das unidades estruturais do solo bem como redução de raízes, conforme observado na descrição morfológica e nos resultados até então apresentados.

Para a profundidade de 14-26 cm o componente arbóreo (*P. pyramidalis*) resultou em maior porosidade (19,48%), diferindo dos demais. Essa maior porosidade em subsuperfície na área de influência de *P. pyramidalis* também pode ser atribuída à atividade biológica, havendo indicativos de intensidade dessa atividade na profundidade em questão, observadas em descrição morfológica (ANEXOS). Essa atividade foi evidenciada pela presença de galerias e poros tubulares preenchidos com material solto e microgranular. Vale ressaltar que foi observada a presença de minhocas, sendo essas capazes de mediar processos estruturais e funcionais, incluindo a porosidade do solo (AL-MALIKI; SCULLION, 2013). Para esse componente, a porosidade nas profundidades de 0-12 cm e 14-26 cm não diferiram entre si, sendo maior e distinta da profundidade inferior (30-42 cm) (Figura 15b).

Referente à profundidade de 30-42 cm, observou-se maior porosidade (15,82%) na área de regeneração natural, distinta e superior à dos componentes vegetais do SAF. Atribui-se essa maior porosidade às raízes finas presentes, observadas nessa profundidade em campo (ANEXOS). Perfis de distribuição de raízes mostram que 95% de todas as raízes finas estão localizados a menos de 100 cm da superfície do solo em ecossistemas florestais (ROSENGREN

et al., 2006). Essas raízes finas (<2 mm) são uma parte efêmera do sistema radicular, no entanto, têm maiores volumes, bem como maior atividade metabólica em comparação com raízes que se desenvolvem mais profundamente (MCCORMACK *et al.*, 2013). Em biomas semiáridos e áridos, como no caso do presente estudo, raízes profundas têm vital importância devido a capacidade de evitar o estresse hídrico (CALLESEN *et al.*, 2015).

Vale ressaltar que em todos os componentes, a maior porosidade do solo foi observada em superfície (0-12 cm). O acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo, em razão da baixa mobilização, contribui para maior proliferação de raízes nas camadas superficiais (YIBRIN; JOHNSON; ECKERT, 1993), esse maior predomínio de raízes superficialmente contribui com maiores teores de matéria orgânica e maior porosidade do solo. A contribuição das raízes ao aporte orgânico das culturas no solo é de 23 a 45% da matéria seca da parte aérea, conforme a cultura e o manejo utilizados (PRAKASH *et al.*, 2002).

A maior contribuição da matéria orgânica em superfície, como já detectado neste estudo, também reforça esse resultado, tendo em vista sua participação na estruturação do solo. Contudo, não se pode descartar a granulometria inerente ao solo superficialmente, franco-arenosa, tendo, portanto, grande participação de macroporos. Isso atribui maior porosidade, conseqüentemente maior capacidade de infiltração de água e menor capacidade de retenção. A estrutura em blocos subangulares em superfície, que proporcionam maior formação de poros entre as estruturas, também está em consonância com esse resultado.

A menor porosidade, de modo geral, foi encontrada para o solo na área de influência do componente agrícola (*Zea mays*). A integração lavoura-pecuária pode compactar a camada superficial do solo e restringir o crescimento de raízes (ALBUQUERQUE; SANGOI; ENDER, 2001). Contudo, isso não se refletiu na resistência à penetração de raízes, que se situou em valor que não restringe o crescimento das plantas. Também para esse componente foram encontrados maiores valores de densidade, menor permeabilidade intrínseca do solo ao ar (indicando menor área disponível ao fluxo de gases), o que justifica menor porosidade. Todavia, os efeitos de manejo sobre os valores de porosidade do solo podem ser pouco evidentes, sendo mais comuns os efeitos na forma e distribuição dos poros ao longo do perfil do solo (SCHAEFER *et al.*, 2001).

Esses resultados diferenciais do mesmo solo na área de influência de espécies distintas evidenciam as características peculiares de cada uma, suas influências na porosidade do solo e robustecem a assertiva que o sistema radicular tem efeito direto sobre o estado de estruturação do solo (MARTINS *et al.*, 2009).

4.3.8 Porosidade segundo forma e tamanho dos poros

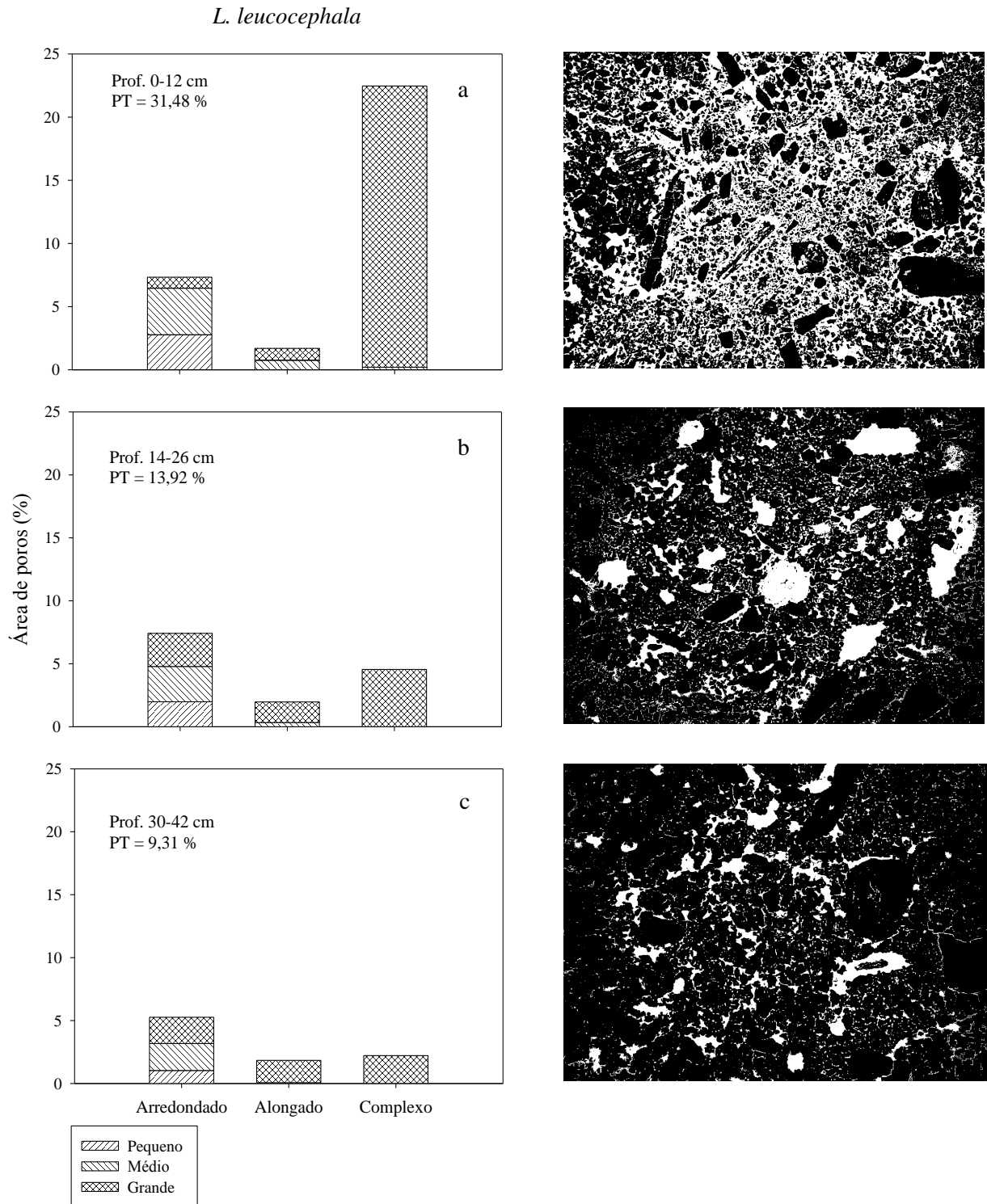
Foram realizados estudos de análise de imagens nas profundidades de 0-12 cm, 14-26 cm e 30-42 cm para os quatro perfis referentes à *L. leucocephala*, *P. pyramidalis* e *Zea mays* e área de regeneração natural, respectivamente. Esses resultados foram apresentados na forma de histogramas de repartição da área total ocupada por poros em tamanho e da forma dos poros, conforme a tipologia definida nas Tabelas 1 e 2.

Para a profundidade de 0-12 cm, no solo na área de influência do componente arbustivo, verificou-se que a porosidade dominante se mostrou complexa e grande (Figura 16a). Esses poros complexos de tamanho grande que foram mais expressivos nessa profundidade são responsáveis pela drenagem de água no solo (TOMA, 2012). Ainda, a presença desses poros em maior proporção indica boa estruturação do solo, com poros interconectados, promovida pelo aporte de restos vegetais e desenvolvimento radicular das plantas (GENNARO *et al.*, 2015).

Poros complexos são formados especialmente por processos biológicos, como o enraizamento das culturas utilizadas em rotação (WILLIAMS; WEILL, 2004). Justificou-se a formação dos poros complexos neste estudo pela atividade radicular de *L. leucocephala*. Poros complexos reduzem as limitações físicas, favorecendo o crescimento das raízes (SOUZA *et al.*, 2006), o que pode aumentar a produtividade das culturas (WILLIAMS; WEILL, 2004). A menor densidade em superfície está relacionada com maior porosidade e maior quantidade de poros complexos, que são responsáveis pela drenagem de água. Ainda, o predomínio desses poros evita processos erosivos, por promover maior infiltração de água no solo, contribuindo para a manutenção da fertilidade do solo, bem como nutrição e produção das plantas do SAF (TOMA, 2012).

Seguidos dos poros complexos de 0-12 cm, seguem os poros arredondados pequenos e médios, que são responsáveis pela retenção de água, em quantidades semelhantes, e em menor proporção, estão os poros arredondados grandes. Nessa profundidade houve reduzida quantidade de poros alongados grandes e médios e ausência de poros alongados grandes.

Figura 16 – Distribuição da porosidade segundo a forma e o tamanho dos poros de três profundidades de um LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico na área de influência de *L. leucocephala* e as imagens binárias correspondentes. Os poros aparecem em branco e a fase sólida em preto. PT: porosidade total; Poro pequeno: 0,001-0,01mm², médio: 0,01- 0,1mm², grande: >0,1mm².



Fonte: Autor.

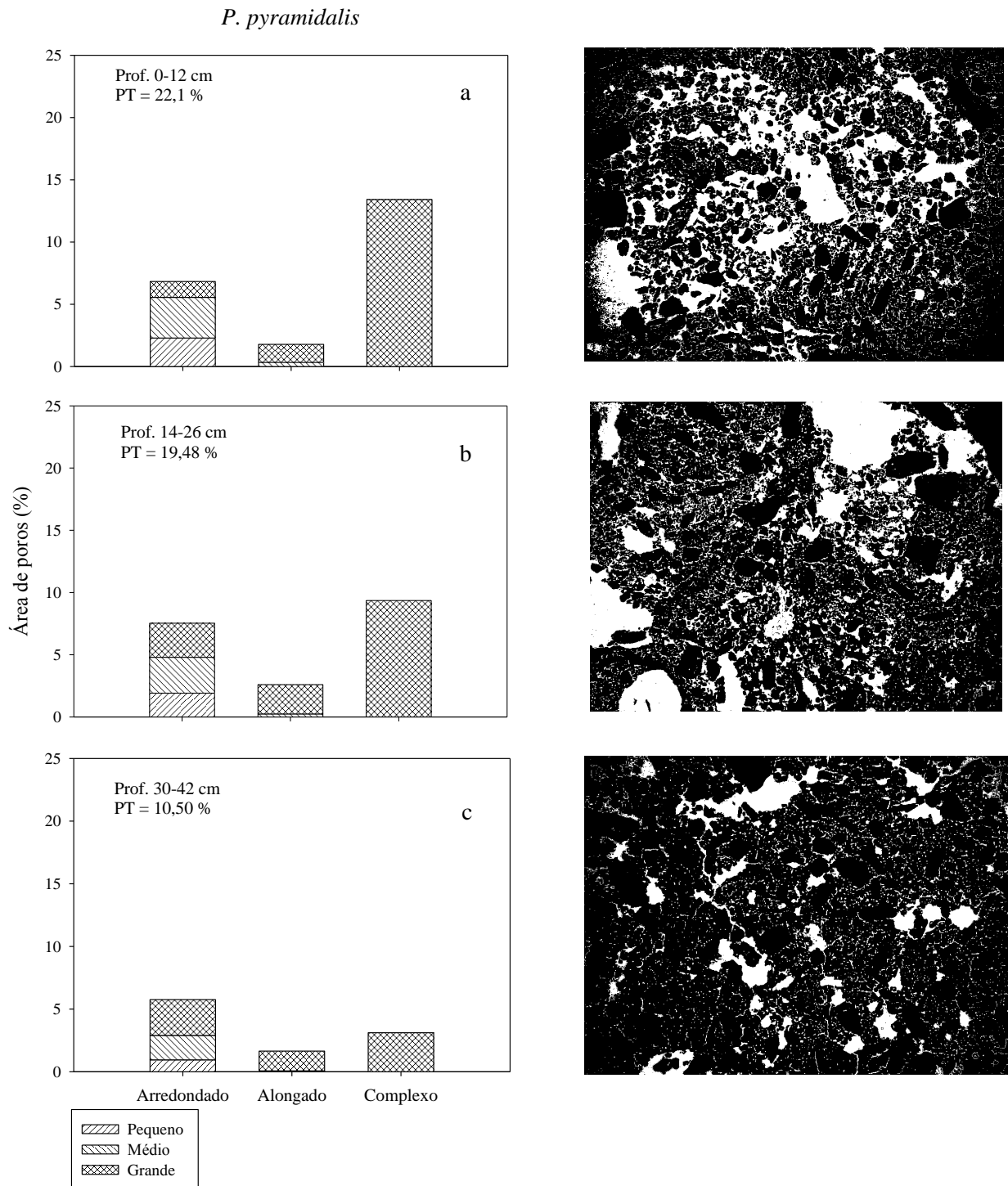
Na profundidade de 14-26 cm do perfil de *L. leucocephala*, os poros arredondados foram dominantes, com quantidades bem distribuídas de poros pequenos médios e grandes. (Figura 16b). A maior proporção de poros arredondados em subsuperfície é responsável por menor condução de água ao longo do perfil do solo em razão de menor conectividade entre poros (GENNARO *et al.*, 2015). Como houve redução dos poros do tipo complexo grande e um aumento nos poros alongados e arredondados, alterou-se o comportamento do solo entre a superfície e subsuperfície havendo mudança de uma camada que apresenta menor capacidade de retenção de água para outra com maior capacidade de retenção. Na profundidade de 30-42 cm também houve redução da participação dos poros complexos grandes, e novamente os poros arredondados foram dominantes, mas em menor magnitude que a profundidade anterior, aumentando-se ainda mais a retenção de água.

É interessante salientar que a quantidade de poros arredondados e poros complexos é inversamente proporcional no perfil, ou seja, onde há alta proporção da porosidade complexa, a porosidade arredondada é menor, já onde a porosidade complexa é baixa a proporção da porosidade arredondada é predominante. Semelhantes resultados foram encontrados por Cooper e Vidal-Torrado (2005), estudando a porosidade de solos em topossequência com B níticos e latossólicos no município de Piracicaba, estado de São Paulo.

O solo na área de influência do componente arbustivo, caracterizado por esta distribuição de poros, apresenta boa infiltração de água, mas possui potencial para armazenamento de água em sua segunda camada, que favorece a disponibilidade de água para as plantas. Por outro lado, vale ressaltar que essa característica pode permitir formação de enxurrada e erosão.

Semelhante ao observado para o perfil de *L. leucocephala*, o perfil referente à *P. pyramidalis* teve maior participação de poros complexos grandes em superfície (Figura 17a). Contudo, essa quantidade de poros foi 40% menor do que no perfil de *L. leucocephala*. Maiores teores de matéria orgânica encontrados em superfície neste trabalho influenciam na formação de poros complexos, visto que são definidos como estruturais (RINGROSE-VOASE, 1991). Ainda na profundidade de 0-12 cm, seguidos dos poros complexos grandes, aparecem os poros arredondados pequenos e médios, seguidos dos poros alongados grandes. Observa-se a mesma tendência de maior porosidade complexa que o componente arbustivo, o que conferiu a esses componentes menor densidade, maior macroporosidade, menor resistência à penetração e maior permeabilidade ao ar, atribuindo melhor qualidade da rede porosa.

Figura 17 – Distribuição da porosidade segundo a forma (arredondados; alongados; complexos) e o tamanho (pequeno: 0,001-0,01mm², médio: 0,01- 0,1mm², grande: >0,1mm².) de três profundidades de um LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico na área de influência de *P. pyramidalis* e as imagens binárias correspondentes. Os poros aparecem em branco e a fase sólida em preto. PT: porosidade total; Poro pequeno: 0,001-0,01mm², médio: 0,01- 0,1mm², grande: >0,1mm².



Fonte: Autor.

Para a profundidade de 14-26 cm de *P. pyramidalis*, houve redução da área de poros complexos e aumento da área de poros arredondados, sendo esses bem distribuídos em pequenos, médios e grandes (Figura 17b). Quando se compara ao componente arbustivo, verifica-se que a porosidade nessa profundidade é maior, especialmente na proporção de poros complexos.

Além da redução de poros complexos e aumento de poros arredondados, observou-se aumento de poros alongados. Processos de expansão e contração, devido a períodos chuvosos e secos, podem ser responsáveis pela presença de poros alongados. A presença de poros alongados também pode ser atribuída aos bioporos (cavidades e canais biológicos) que evidenciam a atividade biológica contribuindo para a melhor estruturação desse solo.

Houve acentuada redução da área de poros complexos grandes de 30-42cm, especialmente quando se compara com a profundidade de 0-12 cm, indicando redução da condutividade e aumento da capacidade de retenção de água no solo, comprovados pelo aumento de densidade, redução da macroporosidade, redução da área disponível ao fluxo de ar, e menor inclinação da curva característica de água no solo.

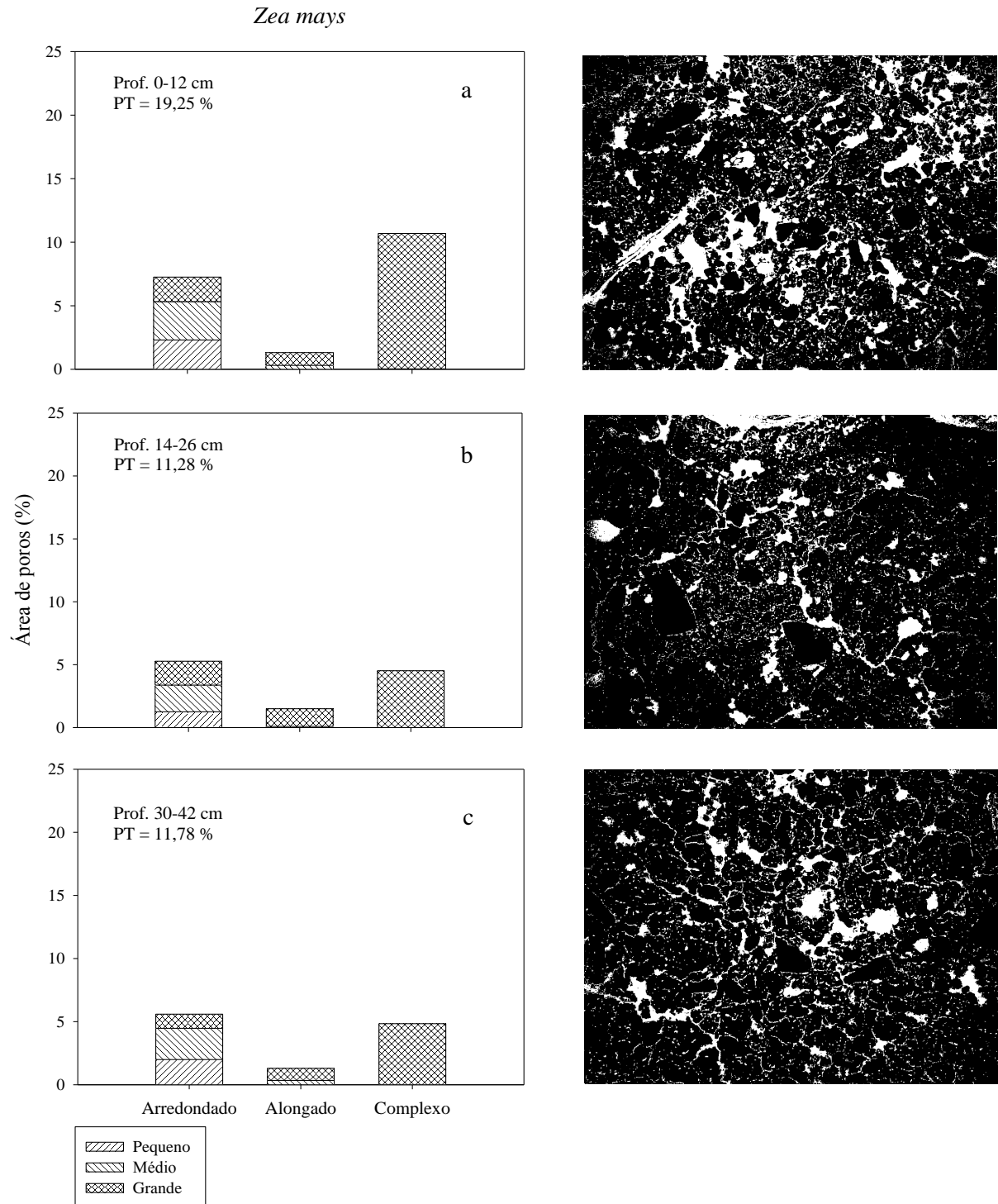
A distribuição morfológica em tipos e tamanhos de poros obtida a partir da análise de imagens, no qual o predomínio foi dos poros complexos grandes, confere a esses solos uma maior condução de água em relação à retenção.

No solo referente ao cultivo de *Zea mays* observou-se maior participação, na profundidade de 0-12 cm, dos poros complexos grandes (cerca de 10% da totalidade da área de poros) seguidos dos arredondados pequenos, relativamente bem distribuídos entre os três tamanhos (Figura 18a). Isso confere maior capacidade de infiltração do que retenção de água de 0-12 cm.

Foi observada reduzida quantidade de poros alongados no solo desse componente, em todas as profundidades, quando se compara aos demais, inclusive área de regeneração natural. Tendo em vista que são tipicamente poros de transmissão (PAGLIAI; LA MARCA, M.; LUCAMONTE, 1983), conferem menor capacidade de transmissão de água para o solo referente à *Zea mays*.

Comparando a porosidade complexa de 0-12 cm com as dos componentes arbustivo e arbóreo observa-se que essa é menor, o que confere menor área de poros, também comprovada pela menor macroporosidade, menor permeabilidade do solo ao ar e maior densidade. Isso propicia menor capacidade de infiltração de água que os demais solos avaliados, o que pode favorecer a formação de enxurrada e carreamento de partículas de solo.

Figura 18 – Distribuição da porosidade segundo a forma e o tamanho dos poros de três profundidades de um LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico na área de influência de *Zea mays* e as imagens binárias correspondentes. Os poros aparecem em branco e a fase sólida em preto. PT: porosidade total; Poro pequeno: 0,001-0,01mm², médio: 0,01- 0,1mm², grande: >0,1mm².



Fonte: Autor.

Na profundidade subsequente (14-26 cm, Figura 18b) houve redução de cerca de 50% de poros complexos grandes em relação a profundidade de 0-12 cm, o que reduz a capacidade de infiltração e aumenta a capacidade de retenção (com poros arredondados com maior contribuição na porosidade). Referente aos poros alongados, estes foram predominantemente grandes. Como ocorre redução dos poros complexos grandes, que são responsáveis pela infiltração de água, ocorre uma modificação na capacidade de retenção de 0-12 cm para 14-26 cm, sendo maior com a profundidade.

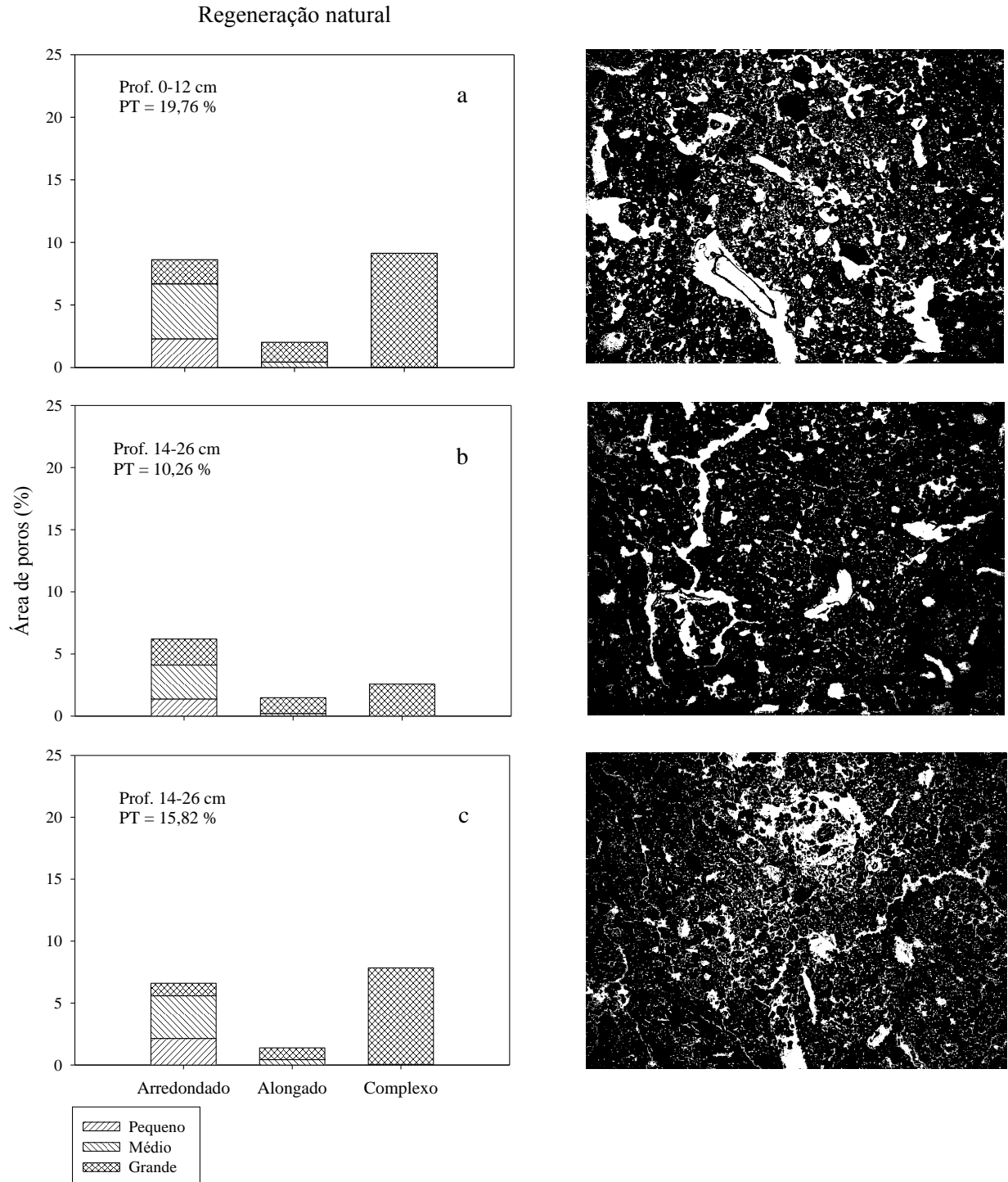
Para 30-42 cm (Figura 18c), o padrão de distribuição de poros manteve-se semelhante ao da camada anterior, com predomínio de poros arredondados compondo a porosidade, o que confere alta capacidade de retenção de água, observado também pela menor inclinação da curva característica de água no solo.

O solo referente ao componente agrícola (juntamente com regeneração natural) apresentou os valores mais baixos de macroporosidade e permeabilidade do solo ao ar entre os componentes analisados. Os baixos valores nesses atributos refletem os maiores valores de densidade que solo desse componente apresenta e a menor porosidade total observada pela análise de imagens. A distribuição da forma e tamanho dos poros mostrou-se com qualidade menor que o solo da área de regeneração natural. A distribuição dos poros juntamente com os outros atributos, indica que no solo na área de influência do componente agrícola houve redução da qualidade da rede de poros.

Para a área de regeneração natural, na profundidade de 0-12cm (Figura 19a) observou-se que os poros arredondados obtiveram a mesma quantidade de poros complexos. Contudo, os poros arredondados são divididos em pequenos, médios e grandes e os poros complexos presentes são todos grandes. Essa homogeneidade entre a porosidade arredondada e complexa proporciona também homogeneidade entre os processos de infiltração e retenção de água nessa camada.

Na profundidade de 14-26 cm (Figura 19b) houve redução acentuada dos poros complexos grandes, passando de 10% para cerca de 3%, e na profundidade seguinte esses poros aumentam novamente. Foi observado em campo uma alteração textural, havendo incremento de areia, detectada também em análise granulométrica (Tabela 1), o que justifica o aumento da porosidade em profundidade, bem como o aumento da porosidade complexa (Figura 19c).

Figura 19 – Distribuição da porosidade segundo a forma e o tamanho dos poros de três profundidades de um LUVISSOLO CRÔMICO Órtico típico em área de regeneração natural e as imagens binárias correspondentes. Os poros aparecem em branco e a fase sólida em preto. PT: porosidade total; Poro pequeno: 0,001-0,01mm², médio: 0,01- 0,1mm², grande: >0,1mm².



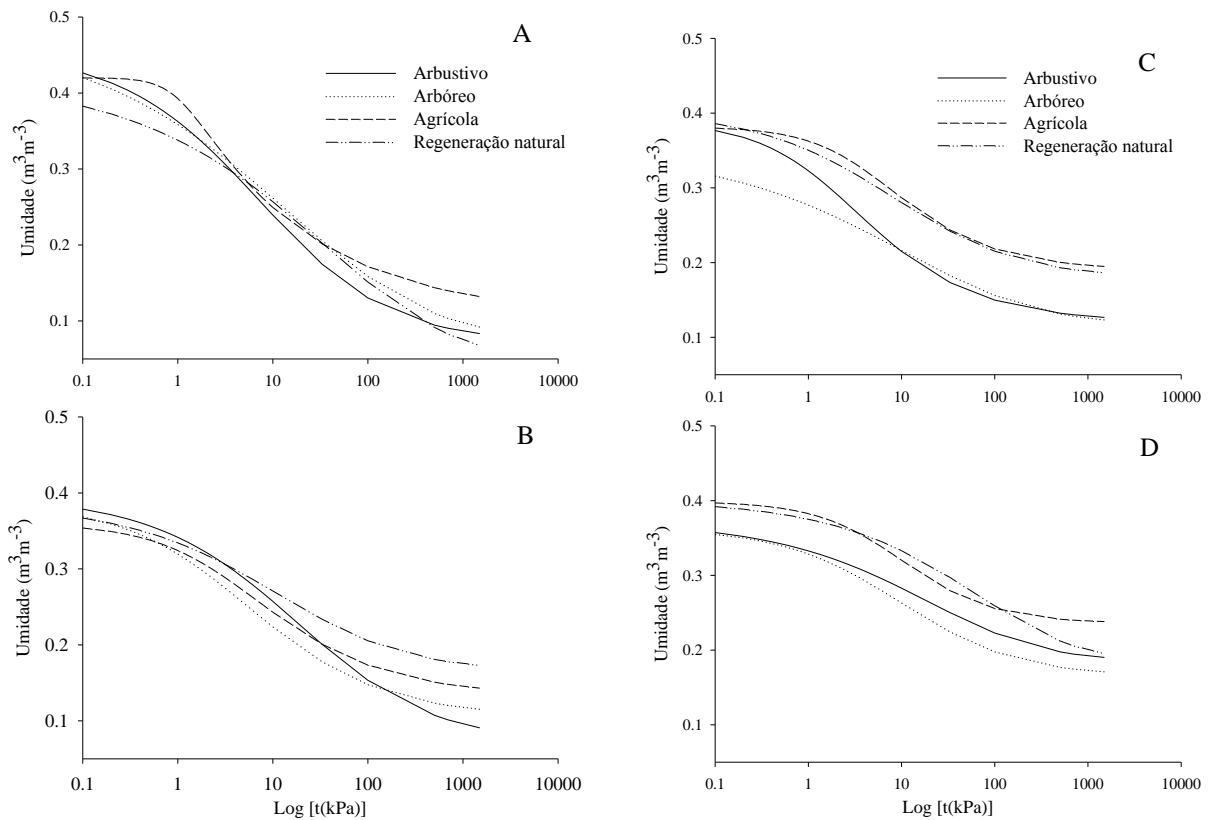
Fonte: Autor.

4.3.9 Curva característica de água no solo

As curvas características de água no solo na área de influência dos componentes vegetais do SAF e área de regeneração natural nas profundidades de 0-5 cm (A), 5-18 cm (B), 18-25 cm (C) e 25-41 cm (D) estão apresentadas na Figura 20.

Nas profundidades de 0-5 cm (A) e 5-18 cm (B) observou-se que as curvas de retenção apresentam maiores gradientes que as demais profundidades para o solo de todos os componentes estudados, indicando que a água é rapidamente drenada e pouco retida. Esse gradiente mais pronunciado deve-se à presença de estruturas em blocos subangulares pequenos a médios, que conferiram dominância de macroporos sobre microporos, proporcionando a esses horizontes uma boa drenagem e baixa retenção de água. Além disso, esse comportamento é corroborado pelos poros do tipo complexos grandes que proporcionam alta porosidade no solo.

Figura 20 – Curva característica de água no solo na área de influência dos componentes vegetais do SAF (arbustivo, arbóreo, agrícola) e regeneração natural nos horizontes de 0-5 cm (A), 5-18 cm (B) 18-25 cm (C) e 25-41 cm (D).



Contrariamente, as curvas da profundidade de 25-41 cm (D) apresentam uma estrutura prismática bem desenvolvida que resulta num domínio de microporos sobre macroporos conferindo a estes solos um comportamento caracterizado por uma maior retenção e diminuição na condução de água, o que reduz a inclinação da curva. Observou-se para esses solos o predomínio de poros arredondados e redução marcante dos poros complexos, o que está em consonância com as curvas característica de água no solo, uma vez que poros arredondados são essencialmente poros de retenção.

Nas profundidades de 0-5 e 5-18 cm, os solos dos componentes vegetais foram semelhantes no comportamento da retenção de água. Nos potenciais matriciais altos, a influência dos macroporos é maior (RAWLS *et al.*, 1991) e, nesse caso, a estrutura em blocos subangulares dos horizontes confere-lhes maior retenção de água nessa região. Entretanto, nos potenciais mais baixos onde a composição granulométrica e mineralógica assume maior importância pela sua superfície específica para a adsorção das moléculas de água (GUPTA; LARSON, 1979; MACHADO *et al.*, 2008) a retenção nesta região da curva diminuiu pelo menor teor de argila presente nestes horizontes. Para essas profundidades, a disposição das curvas características de água no solo foi típica de solos arenosos (sendo a textura desses horizontes franco-arenosa – Tabela 1) com considerável parte da água perdida nas primeiras tensões aplicadas. Isso ocorre devido à maior macroporosidade, como poros complexos de tamanho grande observados na análise de imagens, que conferem capacidade de infiltração de água no solo.

As curvas características de água no solo para os componentes arbustivo e arbóreo na profundidade de 0-5 cm (A) possuem alta semelhança, em função da similaridade da distribuição dos tipos e tamanhos de poros visto na análise de imagem, onde os valores dos poros complexos grandes são marcantes, conferindo perda de grande parte da água nas primeiras tensões. Esses poros do tipo complexos grandes que proporcionam alta porosidade no solo e favorecem a drenagem da água. Ainda nessa profundidade, observou-se que o componente agrícola apresentou maior capacidade de retenção de água que os demais componentes, o que pode ser favorável no sistema agrossilvipastoril no semiárido, onde as chuvas são escassas e há a necessidade de água para as plantas. Numa camada superficial, a maior capacidade de retenção do solo desse componente permite maior disponibilidade para a cultura de interesse, o que pode ser preponderante na sobrevivência das plantas no SAF.

Semelhança entre as curvas dos componentes arbustivo e arbóreo também foi verificada de 25-41 cm (D), não se observando diferenças no gradiente e na forma entre elas,

onde há redução de poros complexos e predomínio de poros arredondados, o que proporciona maior retenção de água mesmo nas tensões mais altas.

Com a redução da porosidade, aumento da densidade do solo e a melhor distribuição dos tipos de poros pela análise de imagem, os horizontes subsuperficiais (18-25 e 25-41 cm) adquirem alta capacidade de retenção de água, mesmo nas tensões mais altas, diminuindo a inclinação da curva com relação ao eixo do potencial matricial. A suavização da primeira inflexão que ocorre nos horizontes subsuperficiais é atribuída à mudança do tipo de poro, à diminuição da porosidade e ao tamanho de poros, que privilegiam a retenção de água (LEWANDOWSKA *et al.*, 2008).

As diferenças entre as caudas das curvas B, C e D, que se dá principalmente nas tensões mais altas, indicam que a água fica mais fortemente retida no solo do componente agrícola e área de regeneração natural, o que está de acordo com a maior microporosidade observada, corroborando em maior capacidade de retenção.

5 CONCLUSÕES

Com base nos atributos químicos e físicos do solo, bem como análise de imagens, aceita-se a hipótese de que os componentes vegetais possuem efeitos diferenciais em atributos químicos e estruturais do solo.

Os componentes vegetais arbustivo, arbóreo e agrícola contribuem igualmente com os teores de matéria orgânica do solo do sistema agrossilvipastoril e esses teores são análogos aos da área de regeneração natural.

Há benefícios no solo do componente agrícola devido a adição dos resíduos de poda do componente arbustivo e dos esterco dos animais do sistema agrossilvipastoril. Já no solo do componente arbustivo há redução de fertilidade, o que pode, a longo prazo, resultar a exaustão química do solo.

O solo do componente agrícola apresenta menor porosidade, maior densidade e menor permeabilidade intrínseca do solo ao ar culminando em redução da qualidade física, contudo observou-se sua maior contribuição na retenção de água no solo no horizonte superficial, o que constitui benefício ao sistema agrossilvipastoril.

O solo na área de influência dos componentes arbustivo (*L. leucocephala*) e arbóreo (*P. pyramidalis*) possuem melhor estruturação do solo com menor densidade, menor resistência à penetração, maior permeabilidade intrínseca do solo ao ar e área total de poros, com predomínio de poros complexos e grandes. Esses poros funcionam como rotas alternativas para o crescimento das raízes e favorecem a infiltração de água no solo, contribuindo para a conservação do solo e da água no sistema agrossilvipastoril no semiárido.

Com base na determinação da permeabilidade do solo ao ar (K_{ar}) e na derivação de índices de continuidade de poros (K_1 e N), não foi possível comprovar a hipótese que o componente arbóreo do sistema agrossilvipastoril resulta na formação de poros mais contínuos no solo.

Com a análise de imagens digitalizadas 2-D foi possível detectar diferenças no solo causadas pelos componentes vegetais, por intermédio de maior detalhamento dos poros quanto à quantidade, ao tamanho e à forma, indicando que são diferenciados de acordo com o componente vegetal presente no solo e manejo adotado.

O solo referente ao componente agrícola, juntamente com regeneração natural, apresenta valores mais baixos de macroporosidade e permeabilidade do solo ao ar entre os componentes analisados, que juntamente com a distribuição dos poros indica redução da qualidade da rede de poros desses solos.

REFERÊNCIAS

ACCIOLY, L. J. O. **Degradação do solo e desertificação no Nordeste do Brasil**. Portal Dia de campo. Disponível em: <<http://www.diadecampo.com.br>> Acesso em: nov 2014

AGUIAR, M. I. *et al.* Perdas de solo, água e nutrientes em sistemas agroflorestais no município de Sobral, CE. **Revista Ciência Agronômica**, v.37, n.3, p.270-278, 2006.

AGUIAR, M.I. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. 2008, 89 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008.

AHUJA, L.R. *et al.* Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. **Soil Science Society of America Journal**, v. 48, p. 699-702, 1984.

ALBUQUERQUE, J.A.; SANGOI, L.; ENDER, M. Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p.717-723, 2001.

ALFAIA, S.S. *et al.* Evaluation of soil fertility in small holder agroforestry systems and pastures in Western Amazônia. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, v. 102, p. 409-414, 2004.

AL-MALIKI, S.; SCULLION, J. Interactions between earthworms and residues of differing quality affecting aggregate stability and microbial dynamics. **Applied Soil Ecology**, v. 64, p. 56–62, 2013.

ALTIERI, M.A. **Agroecology: the science of sustainable agriculture**. Boulder, CO: Estview Press, 1995. 433p.

ALVARENGA, R. C *et al.* Características de alguns adubos verdes de interesse para a conservação e recuperação de solos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.30, n.2, p.175-185, 1995.

ANDRADE, R. S.; STONE, L. F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.13, p.382-388, 2009.

ARAÚJO FILHO, J. A de **Manejo pastoril sustentável da caatinga**. Recife, PE: Projeto Dom Helder Camara, 2013.

ARAÚJO FILHO, J.A. Caatinga: agroecologia versus desertificação. **Ciência Hoje**, v. 30, n. 180, p. 44-45, 2002.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um latossolo vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 337-345, 2004.

- ARSHAD, M.A.; LOWERY, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. *In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Ed.). **Methods for assessing soil quality***. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p.123-141.
- BAAH-ACHEAMFOURA, M. *et al.* Trees increase soil carbon and its stability in three agroforestry systems in central Alberta, Canada. **Forest Ecology and Management**, v.328, p. 131-139, 2014.
- BARRETO, A.C.; FERNANDES, M.F. Cultivo de *Gliricidia sepium* e *Leucaena leucocephala* em alamedas visando a melhoria dos solos dos tabuleiros costeiros. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, n.10, p.1287-1293, 2001.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Soil physics**. 4th ed. New York : John Wiley and Sons, 1972. 498p.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. *In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O., (Eds). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais***. Porto Alegre, Gênese, p.9-26, 1999.
- BEDDEL, L; POSZWA, A. *et al.* Unexpected calcium sources in deep soil layers in low-fertility forest soils identified by strontium isotopes (Lorraine plateau, eastern France), **Geoderma**, v. 264, p. 103-116, 2016.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 849-856, 2003.
- BEUTLER, A.N *et al.* Retenção de água em dois tipos de latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 829-834, 2002.
- BINI, D. *et al.* Effects of land use on soil organic carbon and microbial processes associated with soil health in south ern Brazil. **European Journal of Soil Biology**, v.55, p. 117-123, 2013.
- BLACKWELL, P.S. *et al.* The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. **Journal of Soil Science**, v. 41, p. 215-228, 1990.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. *In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis***. 2th. ed. Madison; American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986b. pt. 1, p. 363-375, 1986b. (Agronomy Monography, 9).
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Particle density. *In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analysis***. 2th ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p. 377-382, 1986a. (Agronomy Monography, 9).
- BRADY, N.C.; WEIL, R.R. **The nature and properties of Soils**. 14th ed. Upper Saddle River, NJ: Pearson-Prentice Hall, 2008.

BRAIDA, J. A. *et al.* Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 4, p. 605-614, 2006.

BRANDFORM, J. M. Penetrability. *In*: Klute, A. (Ed.). Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods. **American Society of Agronomy**, v.2, p. 463-478. 1986.
BRASIL. Ministério do meio ambiente. **Caatinga**. Brasília, MMA, 2012. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/biomas/Caatinga>> Acesso em: 12 out. 2014.

BROWN, G. G.; ROMBKE, J.; HOFER, H. Biodiversity and function of soil animals in Brazilian agroforestry systems. *In*: GAMARODRIGUES, A. C. *et al.* (Eds). **Sistemas agroflorestais: bases científicas para o desenvolvimento sustentável**. Campos dos Goytacazes, RJ: Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, 2006. 365 p.

CALLESEN, I. *et al.* Carbon storage and nutrient mobilization from soil minerals by deep roots and rhizospheres. **Forest Ecology and Management**, v. 359, p. 322–331, 2016.

CAMPANHA, M.M. *et al.* Estrutura da comunidade vegetal arbóreo-arbustiva de um sistema agrossilvipastoril, em Sobral - CE. **Revista Caatinga**, v.24, p.94-101, 2011.

CAMPOS, B.C. *et al.* Estabilidade estrutural de um latossolo vermelho-escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 19, p. 121-126, 1995.

CARRANCA, C.; TORRES, M. O.; MADEIRA, M. Under estimated role of legume roots for soil N fertility. **Agronomy for Sustainable Development**, v.35, n.3, p.1095-1102, 2015.

CARVALHO, F. C. Desempenho produtivo de ovelhas crioulas em um sistema de produção agrossilvipastoril, no semi-árido brasileiro. **Agrossilvicultura**, v. 1, n. 2, p. 81-90, 2004.

CARVALHO, F.C. de. **Sistema de produção agrossilvipastoril para a região semi-árida do nordeste do Brasil**. 2003. 77f. Tese (Doutorado em Zootecnia). Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.

CASTRO, S. S. *et al.* Micromorfologia do solo: bases e aplicações. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 107-164, 2003.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **Recuperação de áreas degradadas no semiárido do Ceará**. Fortaleza: Secretaria dos Recursos Hídricos, 2010a.

CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos. **Sistema de produção agrossilvipastoril no semiárido do Ceará**. Fortaleza: Secretaria dos Recursos Hídricos, 2010b.

COOPER, M. **Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizontes B latossólico e B textural sobre diabásio**. 1999. 130f. (Tese de Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 1999.

- COOPER, M.; VIDAL-TORRADO, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B nítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.581-595, 2005.
- CORRÊA R. M. *et al.* Atributos químicos de solos sob diferentes usos em perímetro irrigado no semiárido de Pernambuco. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.33, n.2, 2009.
- CUNHA, E. Q. *et al.* Atributos físicos, químicos e biológicos de solo sob produção orgânica impactados por sistema de cultivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.56-63, 2012.
- DANIELSON, R. E.; SUTHERLAND, P. L. Porosity. *In*: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. 2th. ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 443-461, 1986. (Agronomy Monography, 9).
- DEXTER, A. R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter and effects on root growth. **Geoderma**, v. 120, p. 201-214, 2004.
- DEXTER, A. R.; CZYZ, E. A. **Applications of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences**. New York: Wiley Interscience, 2007.
- DIAS, H. C. T. *et al.* Variação temporal de nutrientes na serapilheira de um fragmento de floresta estacional semidecidual montana em Lavras, MG. **Cerne**, v.2, p.1-17, 2002.
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. **Defining and assessing soil quality**. *In*: DORAN, J.W. *et al.* (Eds.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America, 1994. p. 3-21. (Special Publication, 35).
- DOURADO NETO, D. *et al.* Software to model soil water retention curves (SWRC, version 2.00). **Scientia Agricola**, v. 57, n. 1, p. 191-192, 2000.
- DUGUMA L. A.; HAGER, H. Farmers' assessment of the social and ecological values of land uses in central highland Ethiopia. **Environmental Management**, v. 47, p. 969-982, 2011.
- DUNN, G.H.; PHILLIPS, R.E. Macroporosity of a well-drained soil under no-till and conventional tillage. **Soil Science Society of American Journal**, v. 55, p. 817-823, 1991.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2013. 353 p
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2. ed. rev. ampl. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230 p.
- FERNANDES, V. L. B. **Recomendações de adubação e calagem para o estado do Ceará**. Fortaleza: UFC, 1993. 248p.
- FERREIRA, D. F. SISVAR: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, p.1039-1042, 2011.

FERREIRA, M. M. Caracterização física do solo. *In*: LIER, Q. J. **Física do Solo**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 298 p.

FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C.; LIMA, S.L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 947-953, 2003.

FRAGA, V.S.; SALCEDO, I.H. Declines of organic nutrient pools in tropical semi-arid soils under subsistence farming. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p. 215-224, 2004.

GARDA, E. C. **Atlas do meio ambiente do Brasil**. Brasília: Editora Terra Viva, 1996.

GENNARO, L. A. *et al.* Estrutura do solo sob feijão irrigado e diferentes manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n.2, 2015.

GIAROLA, N. F. B.; TORMENA, C. A.; DUTRA, A. C. Degradação física de um latossolo vermelho utilizado para produção intensiva de forragem. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 31, p. 863-873, 2007.

GOMES, M. A. F.; FILIZOLA, H. F. **Indicadores físicos e químicos de qualidade de solo de interesse agrícola**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente 2006. 8p.

GRABLE, A.R.; SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potentials and elongation of corn roots. **Soil Science Society of America Journal**, v.32, p.180-186, 1968.

GROENEVELT, P.H.; KAY, B.D.; GRANT, C.D. Physical assessment of a soil with respect to rooting potential. **Geoderma**, v. 34, p. 101-114, 1984.

GUPTA, S.C.; LARSON, W.E. Estimating soil water retention characteristics from particle size distribution, organic matter content and bulk density. **Water Resources Research**, v. 15, p. 1633-1635, 1979.

HAMBLIN, A. The effect of tillage on soil physical conditions. P.S CORNISH, , P.S. ; PRATLEY, J. E. (Eds.). **Tillage**. Melbourne : Australian Society of Agronomy. Inkata Press, 1987. 448p.

HE, Z. L.; YANG, X. E.; STOFFELLA, P. J. Trace elements in agroecosystems and impacts on the environment. **Journal of Trace Elements in Medicine and Biology**, v.19, p.125-140, 2005.

HORN, R.; DOMZAL, H.; OUWERKERK, C.V. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soil and the environment. **Soil and Tillage Research**, v.35, p.23-36, 1995.

ILSTEDT, U. *et al.* The Effect of afforestation on water infiltration in the tropics: a systematic review and meta-analysis. **Forest Ecology and Management**, v. 251, p.45–51, 2007.

- IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência na qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 35, p. 1493-1500, 2000.
- IWATA, B. F. *et al.* Sistemas agroflorestais e seus efeitos sobre os atributos químicos em Argissolo Vermelho-Amarelo do Cerrado piauiense. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.7, p.730–738, 2012.
- JONG VAN LIER, Q. Revisiting the s-index for soil physical quality and its use in Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p. 1-10, 2014.
- KAY, B.D.; VANDENBYGAART, A.J. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. **Soil and Tillage Research**, v. 66, p. 107-118, 2002.
- KETEMA, H.; YIMER, F. Soil property variation under agroforestry based conservation tillage and maize based conventional tillage in Southern Ethiopia. **Soil and Tillage Research**, v. 141, p. 25-31, 2014.
- KIEHL, E. J. **Manual de edafologia**: relação solo-planta. Piracicaba:Ceres, 1979. 262p.
- KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. **Soil Science Society of America**, v. 11, p. 93-99, 1946.
- KLEIN, V. A. **Física do solo**. Passo Fundo: Ed. Universidade de Passo Fundo, 2008.
- KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p.857-867, 2002.
- KOOHAFKAN, P.; ALTIERI A. M.; GIMENEZ H. E. Green Agriculture: foundations for biodiverse, resilient and productive agricultural systems. **International Journal of Agricultural Sustainability**, v. 10, p. 61-75, 2012.
- LAL, R. Soil management in the developing countries. **Soil Science**, v. 165, p. 57-72, 2000.
- LANE, P.N.J.; NOSKE, P.J.; SHERIDAN, G.J. Phosphorus enrichment from point to catchment scale following fire in eucalypt forests. **Catena**, v. 87, p. 157–162, 2011.
- LEHMANN J. *et al.* Below-ground interactions in dryland agroforestry. **Forest Ecology and Management**, v. 111, p. 157-169, 1998.
- LEWANDOWSKA, J. *et al.* Water drainage in double-porosity soils: experiments and micro-macro modeling. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, v. 134, n. 2, p. 231-243, 2008.
- LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012. 346 p.

- MACHADO, J.L. *et al.* Inter-relações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um Latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 495-502, 2008.
- MARTINS, M. V. *et al.* Correlação linear e espacial entre a produtividade do feijoeiro e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico de Selvíria, Estado de Mato Grosso do Sul. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 31, n. 1, p. 147-154, 2009.
- MCCORMACK, M. L.; EISSENSTAT, D.M.; PRASAD, A.M.; Smithwick, E.A. Regional scale patterns of fine root lifespan and turnover under current and future climate. **Global Change Biology**, v. 19, p. 1697–1708, 2013.
- MCQUEEN, D.J; SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (TypicEndoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil and Tillage Research**, v. 25, p.217-230, 2002.
- MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, v.34, p.963-969, 2004.
- MELLO, F.A.F. *et al.* **Fertilidade do solo**. São Paulo:Nobel, 1983. 400p
- MENDES-FILHO, P.F. *et al.* Evaluating the potential of forest species under “microbial management” for the restoration of degraded mining areas, **Water, Air and Soil Pollution**, v. 208, p. 79-89, 2009.
- MENGEL, K. *et al.* **Principles of plant nutrition**. 5th.ed. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2001. 849p.
- MENEZES, R. S. C. *et al.* Biogeochemical cycling in terrestrial ecosystems of the Caatinga Biome. **Brazilian Journal of Biology**, v.72, p.643-653, 2012.
- MONTAGNINI, F. **Sistemas agroforestales: principios y aplicaciones em los trópicos**. 2. ed. San Jose: Organizacion para Estudios Tropicales, 1992.
- MUNKHOLM, L.J.; SCHJØNNING, P.; KAY, B.D. Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. **Soil and Tillage Research**, v. 64, p. 125-135, 2002.
- MOSADDEGHI, M.R.; MAHBOUBI, A.A.; SAFADOUST, A. Short-term effects of tillage and manure on some soil physical properties and maize root growth in a sandy loam soil in western Iran. **Soil and Tillage Research**, v. 104, p. 173-179, 2009.
- MITCHELLMURPHY, C.P. **Thin section preparation of soils and sediments**. Berkhamsted: A.B. Academic Publ., 1986. 149p.
- MURPHY, C.P.; BULLOCK, P.; TURNER, R.H. The measurement and characterization of voids in soil thin sections by image analysis. Part I. Principles and techniques. **Journal of Soil Science**, v.28, p.498-508, 1977.

- NAIR, M.G.; SAFIR, G.R.; SIQUEIRA, J.O. Isolation and identification of vesicular arbuscular mycorrhiza stimulatory compounds from clover (*Trifolium repens*) roots. **Applied and Environmental Microbiology**, v.57, p.434-439, 1991.
- NEVES, C.M.N.N. *et al.* Atributos indicadores da qualidade do solo em sistema agrossilvipastoril no noroeste do Estado de Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 74, p. 45-53, 2007.
- NGUYEN, Q. *et al.* Multipurpose agroforestry as a climate change resiliency option for farmers: an example of local adaptation in Vietnam. **Climatic Change**, v. 117, p.241-257, 2013.
- NORTCLIFF, S. Standardisation of soil quality attributes. **Agriculture, Ecosystem and Environment**, v. 88, p.161-168, 2002.
- OLIVEIRA NETO, S.N. *et al.* **Sistema agrossilvipastoril: integração lavoura, pecuária e floresta**. Viçosa, MG: Sociedade de Investigações Florestais, 2010. 189p.
- OLIVEIRA, F. C. *et al.* Efeitos de aplicações sucessivas de lodo de esgoto em latossolo amarelo distrófico cultivado com cana-de-açúcar: carbono orgânico, condutividade elétrica, pH e CTC. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, n.3, p.505-519, 2002.
- OLIVEIRA, L. B. *et al.* Morfologia e classificação de luvisolos e planossolos desenvolvidos de rochas metamórficas no semiárido do nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 33, n. 5, 2009.
- ORLANDO FILHO, J. O. *et al.* Relações K, Ca e Mg de solo areia quartzosa e produtividade da cana-de-açúcar. **STAB: Açúcar, Alcool e Subprodutos**, v. 14, n. 5, p. 13-17, 1996.
- PACIULLO D. S. C. *et al.* Características produtivas e nutricionais do pasto em sistema agrossilvipastoril, conforme a distância das árvores. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 46, n. 10, 2011.
- PAGLIAI, M.; LA MARCA, M.; LUCAMONTE, G. Micromorphometric and micromorphological investigations of a clayloam soil in viticulture under zero and conventional tillage. **Journal of Soil Science**, v. 34, p. 391-403, 1983.
- PAGLIAI, M.; VIGNOZZI, N.; PELLEGRINI, S. Soil structure and the effect of management practices. **Soil and Tillage Research**, v. 79, p. 131-143, 2004.
- PAVINATO, P. S. Disponibilidade de nutrientes no solo - decomposição e liberação de compostos orgânicos de resíduos vegetais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.911-920, 2008.
- PEDROTTI, A. *et al.* Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 521-529, 2001.

- PEI, S.; FU, H.; WAN, C. Changes in soil properties and vegetation following exclosure and grazing in degraded Alxa desert steppe of Inner Mongolia, China. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 124, p.33-39, 2008.
- PEZZONI, T; VITORINO, T. A. C; DANIEL, O; LEMPP, B. Influência de *Pterodonemarginatus* Vogel sobre atributos físicos e químicos do solo e valor nutritivo de *Brachiaria decumbens* Stapf em sistema silvipastoril. **Cerne**, v. 18, n. 2, p. 293-301, 2012.
- PRADO, D. As Caatingas da América do Sul. *In*: LEAL, I.R. ; TABARELLI; J. M.C; SILVA (Eds.). **Ecologia e conservação da caatinga**. Recife: Editora Universitária da Universidade Federal de Pernambuco, 2003. p. 3 – 73.
- PRADO, R. M. Saturação por bases e híbridos de milho sob sistema de plantio direto. **Scientia Agrícola**, v.58, p.391-394, 2001.
- PRAKASH, V. *et al.* Annual carbon input to soil through rainfed soybean (*Glycine max*)-wheat (*Triticumaestivum*) cropping sequence in mid-hills of Northwest Himalaya. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v.72, p.14-17, 2002.
- RADOMSKI, M.I.; RIBASKI, J. **Produção de grevilea e eucalipto em sistema silvipastoril na região do Arenito Caiuá, Noroeste do Paraná**. Colombo: Embrapa Florestas, 2011. 34p. (Embrapa Florestas. Documentos, 231).
- RAWLS, W.J.; GISH, T.J.; BRAKENSIEK, D.L. Estimating soil water retention from soil physical properties and characteristics. **Advances in Soil Sciences**, v. 16, p. 213-234, 1991.
- REINERT, D. J., REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. **Propriedades físicas de solos em sistema de plantio direto irrigado**. *In*: CARLESSO, R. *et al.* (Eds). **Irrigação por aspersão no Rio Grande do Sul**. Santa Maria, RS: Palloti, 2001. p.114-133.
- REYNOLDS, W. D. *et al.* Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality, **Geoderma**, v. 52, p. 252–263, 2009.
- RICHARDS, L.A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington: United States Department of Agriculture, 1954. 160p. (Agriculture Handbook, 60).
- RICHARDS, L.A. Physical conditions of water in soil. *In*: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society for Testing and Materials, 1965. p. 128-152.
- RINGROSE-VOASE, A. J. Micromorphology of soil structure: description, quantification, application. **Australian Journal of Soil Research**, v. 29, n. 6, p. 777-813, 1991.
- RODRIGUES, S. *et al.* Permeabilidade ao ar em latossolo vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.35, p.105-114, 2011.
- ROMANECKAS, K. *et al.* The effect of conservation primary and zero tillage on soil bulk density, water content, sugar beet growth and weed infestation. **Agronomy Research**, v.7 , p. 73–86, 2009.

ROSEBERG, R.J.; MCCOY, E.L. Measurement of soil macropore air permeability. **Soil Science Society of America Journal**, v. 54, p. 969-974, 1990.

ROSENGREN, U. *et al.* Functional biodiversity aspects on the nutrient sustainability in forests – importance of root distribution. **Journal of Sustainable Forestry**, v.21, n. 2–3, p.77–100, 2006.

SÁ, I. B.; FOTIUS, G. A.; RICHE, G. R. Degradação ambiental e reabilitação natural do trópico semiárido brasileiro. *In*: CONFERÊNCIA NACIONAL E SEMINÁRIO LATINO-AMERICANO DA DESERTIFICAÇÃO, Fortaleza, 1994, **Anais...** Fortaleza, 1994. p.310-332.

SALAZAR L.F.; NOBRE C. A.; OYAMA M. D.; Climate change consequences on the biome distribution in tropical South America. **Geophysical Research Letters**, v. 34, p.1-16, 2007.

SAMPAIO, E.V. S. B.; SILVA, F.B.R. Fertilidade de solos do semiárido do Nordeste. *In*: PEREIRA, J.R.; FARIA, C.M.B. (Eds). **Fertilizantes: insumos básicos para a agricultura e combate à fome**. Petrolina: Embrapa, 1995. p.51-71.

LEMOS, R. C. *et al.* **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6. ed. rev. e ampl. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2013. 100 p.

SCHAEFER, C.E.G.R. *et al.* Características da porosidade de um argissolo vermelho amarelo submetido a diferentes sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p.765-769, 2001.

SCHØNNING, P. *et al.* Turnover of organic matter in differently textured soils. I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. **Geoderma**, v. 89, p.77-198, 1999.

SHARMA, U.K. *et al.* Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. **Soil and Tillage Research**, v. 83, p. 246–259. 2005.

SILVA, A.P. *et al.* Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 6, p. 1535-1545, 2009.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SILVA, A. P. *et al.* Indicadores da qualidade física do solo. *In*: JONG VAN LIER, Q. **Física do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. 298 p.

SILVA, A.P. *et al.* Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 1-10, 2008.

SILVA, G.L. *et al.* Soil physical quality of Luvisols under agroforestry, natural vegetation and conventional crop management systems in the Brazilian semi-arid region. **Geoderma**, v. 167–168, p. 61–70, 2011.

SILVA, I.F.; MIELNICZUK, J. Avaliação do estado de agregação do solo afetado pelo uso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 313-319, 1997.

SILVA, S. I. *et al.* Seed oils of Euphorbiaceae from the Caatinga, a Brazilian tropical dry forest. **Biomass and Bioenergy**, v. 69, p. 124 -134, 2014.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.191-199, 2000.

SILVEIRA, L.R. *et al.* Sistema de aquisição de dados para equipamento de medida da permeabilidade intrínseca do solo ao ar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, n. 2, p. 429-436, 2011.

SILVEIRA, M. M. L.; ARAÚJO, M. S. B.; SAMPAIO, E. V. S. B. Distribuição de fósforo em diferentes ordens de solo do semi-árido da Paraíba e de Pernambuco. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.30, p.281-291, 2006.

SOUSA, F.P. *et al.* Carbon and nitrogen in degraded Brazilian semi-arid soil under going desertification. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 148, p. 11–21, 2012.

SOUZA, H. A. *et al.* Níveis críticos para atributos do solo pela distribuição normal reduzida em culturas anuais de subsistência. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.4, p.425–430, 2014.

SZOTT, L. T.; FERNANDES, E. C. M.; SANCHEZ, P. A. Soil-plant interactions in agroforestry systems. **Forest, Ecology and Management**, v. 45, n. 1-4, p. 127-152, 1991.

TIESSEN, H.; SALCEDO, I.H.; SAMPAIO, E.V.S.B. Nutrient and soil organic matter dynamics under shifting cultivation in semi-arid Northeastern Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 38, p. 139-151, 1992.

TOMA, R. S. **Evolução do funcionamento físico-hídrico do solo em diferentes sistemas de manejo em áreas de agricultura familiar na região do Vale do Ribeira, SP.** 2012. 236 f. Tese (Doutorado em ciências) Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2012.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um latossolo roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 573-581, 1998.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G.; SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciado por calagem, preparo inicial e tráfego. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 301-309, 1998.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892 – 898, 1980.

WARRICK, A.W; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical in the field. **In:** HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press,1980. p.319-344.

WILLIAMS S. M.; WEIL R. R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.1403-1409, 2004.

WOHLENBERG, E.V. Dinâmica da agregação de um solo franco-arenoso em cinco sistemas de culturas em rotação em rotação e em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, n.5, p.891-900, 2004.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analyses**, v. 19, p. 1467-1476, 1988.

YIBRIN, H.; JOHNSON, J.W.; ECKERT, D.J. No-till corn production as affected by mulch, potassium placement, and soil exchangeable potassium. **Agronomy Journal**, v.85, p.639-644, 1993.

ZENG, D.H. *et al.* Carbon mineralization of tree leaf litter and crop residues from poplar-based agroforestry systems in North-east China: a laboratory study. **Applied Soil Ecology**, v. 44, p.133-137, 2010.

ANEXOS

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA: PERFIL 1 - COMPONENTE ARBUSTIVO

LUVISSOLO Crômico Ótico típico

- A1 0-5 cm; bruno (7,5 YR 4/2); franco-arenosa; blocos subangulares grande, grau médio-se desfaz em granular; ligeiramente dura, muito friável; não plástico, não pegajoso; transição plana e clara. Raízes finas e médias abundantes, transagregados e interagregados; fissuras finas que separam os agregados; porosidade tubular < 1mm abundante, cavidades e canais com preenchimento denso completo e solto contínuo; preenchimentos de cores brunadas e avermelhadas.
- A2 5-18 cm; bruno (7,5YR 5/4); franco-arenosa; fraca pequena a média blocos subangulares– se desfaz em blocos angulares e subangulares; ligeiramente duro, muito friável; não plástico e não pegajoso; transição plana e abrupta. Cascalho milimétrico; raízes (> 1 cm de diâmetro) abundantes, raízes finas abundantes, com orientação paralela; porosidade biológica abundante (raízes); grandes canais (5 mm – 1 cm); poros tubulares finos e médios (entre 1 – 2 mm), transagregados; fissuras finas abundantes, interagregados; canais com preenchimento denso completo, com solo de horizontes subjacentes (vermelho) e superficiais (bruno).
- Bt1 18-25 cm; vermelho (2,5 YR 5/6); franco argilo arenosa; moderada média prismática; ligeiramente duro, friável; plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e clara. Cascalho centimétrico comum a abundante (0,5 – 2 cm); raízes médias, finas e muito finas, transagregados; poros tubulares finos e muito finos abundantes, fissuras finas entre agregados, canis preenchidos com material mais escuro proveniente dos horizontes superficiais, nódulos ferruginosos.
- Bt2 25-41 cm; vermelho (10 R 4/8); franco argilo arenosa; moderada média prismática – se desfaz em blocos angulares; ligeiramente duro, friável; plástico e pegajoso; transição plana e clara. Cascalho centimétrico (maior de 3 cm), com predomínio de cascalho de tamanho de 5 mm – 1cm; raízes finas comuns e transagregados; poucas raízes grandes; poros fissurais finos (<1 mm de largura), formado entre os agregados prismáticos; porosidade tubular comum a abundante, como poros tubulares de origem biológica (raiz), com matriz adjacente amarela; raízes finas comuns e transagregados, poucas raízes grandes.
- Bt3 41-57 cm; bruno avermelhado (2,5 YR 5/3); franco argilo arenosa; moderada a forte média a grande prismática; extremamente duro, friável; muito plástico e muito pegajoso; slickenside pouco e fraco; transição plana e clara. Cascalho centimétrico e milimétrico comum a abundante; raízes finas e muito finas comuns, com orientação horizontal e diagonal; raízes finas tansagregados; poros tubulares com recobrimento brunado.
- BC1 57-67 cm; bruno-avermelhado-claro (2,5 YR 7/4); franco argilo arenoso; forte média a grande prismática; extremamente duro, friável; muito plástico e ligeiramente pegajoso; transição ondulada e difusa. Cascalho centimétrico, grau forte, poros fissurais verticais que variam de 3- 4 cm, largura de 0,5-2,0 mm, interagregados, orientação horizontal, poros fissurais separam agregados; porosidade tubular fina a muito fina com abundância moderada; poros fissurais dominantes, poucas raízes grandes, presença comum de de raízes finas e muito finas com formato achatado.

BC2 67-90 cm; cinzento avermelhado (2,5YR 6/1); franco argilo arenoso; forte grande a muito grande prismática; extremamente dura muito firme; ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso. Slickensides comum moderado a forte. Poros verticais, fissurais, quantidade moderada de 15-20 cm de comprimento; poros interagregados – poros tubulares, finos, com abundância moderada devido à atividade biológica (crescimento de raízes), mas não se observou restos de raízes dentro dos poros. Poucas raízes grossas, transagregados, presença moderada de raízes finas e muito finas que crescem nas paredes dos agregados, como formato achatado.

Observações:

- Caráter coeso a 41 cm (consistência extremamente dura).

- Mosqueado no horizonte B (10 YR 6/8); BC1 (10 R 4/6); BC2 (10 R 4/6); e C (3,5 Y 7/3; 2,5 YR 4/4; 10 R 4/4).

-Minerais brilhantes (provavelmente mica) ao longo do perfil.

ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS: PERFIL 1 - COMPONENTE ARBUSTIVO

Simb.	Prof.	Areia	Silte	Argila	Arg. Disp.	Grau de Floc.	Relação Silte/Argila	P assi.	C org.
Hor	Cm	-----g kg ⁻¹ -----				%		mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹
A1	0-5	736,50	224,90	38,60	24,40	36,79	5,83	116,76	13,01
A2	5-18	738,50	210,10	51,40	37,40	27,24	4,09	86,74	4,99
Bt1	18-25	600,00	191,40	208,60	139,20	33,27	0,92	23,35	3,47
Bt2	25-41	540,00	170,40	289,60	144,80	50,00	0,59	20,02	3,22
Bt3	41-57	561,00	148,80	290,20	159,60	45,00	0,51	22,40	2,34
BC1	57-67	565,50	177,30	257,20	138,00	46,35	0,69	21,92	2,21
BC2	67-90	577,00	194,20	228,80	135,60	40,73	0,85	18,11	1,33

Hor.	pH Água 1:2,5	Complexo Sortivo								V	m	PST
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al ³⁺	H ⁺	CTC			
		-----cmolc kg ⁻¹ -----								-----%-----		
A1	6,82	7,00	1,90	0,56	0,08	9,54	0,10	2,20	11,84	80,58	1,08	0,68
A2	6,86	3,80	1,20	0,41	0,04	5,45	0,10	0,90	6,45	84,49	1,88	0,60
Bt1	6,11	3,40	2,70	0,51	0,06	6,67	0,10	1,00	7,77	85,85	1,58	0,80
Bt2	5,44	3,40	3,80	0,24	0,14	7,58	0,20	3,00	10,78	70,32	2,60	1,30
Bt3	5,44	3,80	4,90	0,09	0,23	9,02	0,40	2,10	11,52	78,30	4,24	1,97
BC1	5,44	3,70	5,50	0,08	0,33	9,61	0,30	1,60	11,51	83,49	3,08	2,83
BC2	5,67	3,80	5,50	0,10	0,46	9,86	0,20	1,90	11,96	82,44	2,06	3,84

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA - PERFIL 2 (COMPONENTE ARBÓREO)

LUVISSOLO Crômico Ótico típico

- A1 0-5 cm; bruno (7,5 YR 4/2); franco-arenosa; blocos subangulares grande, grau médio-se desfaz em granular; ligeiramente dura, muito friável; não plástico, não pegajoso; transição plana e clara. Raízes finas e muito finas comuns, intraagregados; porosidade tubular moderada; preenchimento denso contínuo com horizonte subjacente; porosidade fissural <1mm pouca.
- A2 5-18 cm; bruno (7,5YR 5/4); franco-arenosa; fraca pequena a média blocos subangulares– se desfaz em blocos angulares e subangulares; ligeiramente duro, muito friável; não plástico e não pegajoso; transição plana e abrupta. Raízes finas e muito finas comuns, transagregados; poucas raízes grossas; porosidade tubular comum; pouca porosidade fissural; atividade biológica (artrópodes).
- Bt1 18-25 cm; vermelho (2,5 YR 5/6); franco argilo arenosa; moderada média prismática; ligeiramente duro, friável; plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e clara; Cascalho centimétrico pouco; raízes finas e muito finas comuns, transagregados; porosidade tubular comum; porosidade fissural pouca; abundantes preenchimentos denso contínuo e solto contínuo com cores brunadas e avermelhadas; atividade biológica de artrópodes, presença marcante de minhocas.
- Bt2 25-41 cm; vermelho (10 R 4/8); franco argilo arenosa; moderada média prismática – se desfaz em blocos angulares; ligeiramente duro, friável; plástico e pegajoso; transição plana e clara. Cascalho centimétrico pouco; raízes finas e muito finas comuns, entre os agregados; abundante preenchimento solto e denso contínuo de cores brunadas e avermelhadas; moderada porosidade tubular e pouca fissural; atividade biológica de artrópodes.
- Bt3 41-57 cm; bruno avermelhado (2,5 YR 5/3); franco argilo arenosa; moderada a forte média a grande prismática; extremamente duro, friável; muito plástico e muito pegajoso; slickensides pouco e fraco; transição plana e clara. Cascalho milimétrico; poucas raízes finas e muito finas, transagregados e intraagregados; canais de raízes grossas; preenchimentos densos contínuos comuns; preenchimento solto contínuo abundante; porosidade tubular comum, porosidade fissural pouca.
- BC1 57-67 cm; bruno-avermelhado-claro (2,5 YR 7/4); franco argilo arenoso; forte média a grande prismática; extremamente duro, friável; muito plástico e ligeiramente pegajoso; transição ondulada e difusa. Poucas raízes finas, canais de raízes grossas; porosidade fissural abundante, porosidade tubular comum; preenchimento denso e solto contínuo.
- BC2 67-90 cm; cinzento avermelhado (2,5YR 6/1); franco argilo arenoso; forte grande a muito grande prismática; extremamente dura muito firme; ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso. Slickensides comum e forte. Poucas raízes finas transagregados; porosidade fissural abundante e tubular comum.

ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS (COMPONENTE ARBÓREO)

Simb.	Prof.	Areia	Silte	Argila	Arg. Disp.	Grau de Floc.	Relação Silte/Argila	P assi.	C org.
Hor	Cm	-----g kg ⁻¹ -----				%		mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹
A1	0-5	753,00	171,20	75,80	26,60	64,91	2,26	44,23	13,33
A2	5-18	746,50	180,90	72,60	41,00	43,53	2,49	10,01	5,12
AB	18-25	699,00	186,40	114,60	61,40	46,42	1,63	4,48	3,73
Bt1	25-41	622,00	126,60	251,40	145,40	42,16	0,50	4,86	3,35
Bt2	41-57	595,00	93,60	311,40	160,20	48,55	0,30	4,67	2,91
Bt3	57-67	625,50	136,10	238,40	125,60	47,32	0,57	3,53	2,21
BC	67-90	650,00	131,00	219,00	114,80	47,58	0,60	4,96	1,52

Hor.	pH Água 1:2,5	Complexo Sortivo								V	m	PST
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al ³⁺	H ⁺	CTC			
-----cmolc kg ⁻¹ -----								-----%-----				
A1	6,80	6,80	1,80	1,08	0,06	9,74	0,10	1,60	11,44	85,14	1,02	0,55
A2	6,67	4,00	1,00	0,45	0,04	5,50	0,10	0,80	6,40	85,93	1,79	0,69
AB	6,44	3,30	1,30	0,38	0,05	5,04	0,10	1,20	6,34	79,48	1,95	0,86
Bt1	5,48	3,20	2,40	0,22	0,14	5,96	0,40	2,70	9,06	65,79	6,29	1,59
Bt2	5,45	2,90	3,70	0,07	0,31	6,98	0,30	2,10	9,38	74,41	4,12	3,31
Bt3	6,17	3,00	5,70	0,08	0,80	9,59	0,20	1,60	11,39	84,19	2,04	7,05
BC	6,50	3,20	6,00	0,09	0,91	10,20	0,20	1,00	11,40	89,48	1,92	8,02

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA – (COMPONENTE AGRÍCOLA)**LUVISSOLO Crômico Ótico típico**

- A1 0-7 cm; bruno escuro (7,5 YR 3/4), franco-arenosa; blocos subangulares médios, grau médio; ligeiramente dura, friável; não plástico, não pegajoso; transição plana e clara. Cascalho centimétrico; raízes finas e muito finas comuns, transagregados; porosidade tubular pouca; preenchimento denso contínuo comum.
- A2 7-17 cm; bruno (7,5 YR 4/4) franco-arenosa; blocos subangulares pequenos médios, grau médio; ligeiramente dura, friável; não plástico, não pegajoso; transição plana e clara. Cascalho centimétrico; raízes finas comuns, transagregados e intraagregados; porosidade tubular comum; preenchimento denso contínuo bruno avermelhado comum.
- A3 17-25 cm; bruno-avermelhado (5YR 4/4); mosqueado: (5 YR 3/4); franco argilo arenosa; blocos subangulares moderada média; dura, firme; ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e clara. Cascalho milimétrico à centimétrico; Raízes finas e muito finas comuns, intraagregados; porosidade fissural abundante; porosidade tubular comum; preenchimento denso contínuo avermelhado comum.
- Bt1 25-41 cm; vermelho-amarelado (5YR 4/6); franco argilo arenosa; forte grande prismática – se desfaz em blocos angulares; extremamente dura, firme; plástico e pegajoso; transição plana e clara. Cascalho milimétrico à centimétrico; poucas raízes finas e muito finas transagregados; porosidade fissural abundante; pouca porosidade tubular; preenchimento denso contínuo vermelho.
- Bt2 41-65 cm; vermelho escuro (2YR 3/6) Mosqueado: amarelo avermelhado 7,5 YR 6/6; franco argilo arenosa; forte média a grande prismática; extremamente duro, firme; muito plástico e ligeiramente pegajoso; transição ondulada e difusa. Cascalho milimétrico à centimétrico; poucas raízes finas e muito finas transagregados; porosidade fissural abundante, pouca porosidade tubular; preenchimento denso contínuo.

ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS (COMPONENTE AGRÍCOLA)

Simb.	Prof.	Areia	Silte	Argila	Arg. Disp.	Grau de Floc.	Relação Silte/Argila	P assi.	C org.
Hor	Cm	-----g kg ⁻¹ -----				%		mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹
A1	0-7	715,50	211,10	73,40	28,20	61,58	2,88	33,46	10,42
A2	7-17	672,60	210,00	117,40	70,80	39,69	1,79	7,34	5,24
A3	17-25	676,50	235,30	88,20	57,60	34,69	2,67	10,87	6,63
Bt1	25-41	501,00	198,00	301,00	169,80	43,59	0,66	2,86	3,47
Bt2	41-65	593,50	222,70	183,80	126,80	31,01	1,21	5,72	4,61

Hor.	pH Água 1:2,5	Complexo Sortivo								V	m	PST
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al ³⁺	H ⁺	CTC			
		-----cmolc kg ⁻¹ -----								-----%-----		
	6,48	5,90	1,50	0,53	0,11	8,03	0,10	2,00	10,13	79,27	1,23	1,05
	6,86	4,70	1,90	0,26	0,11	6,97	0,10	0,80	7,87	88,57	1,41	1,41
	6,70	5,30	2,30	0,28	0,14	8,02	0,10	1,50	9,62	83,36	1,23	1,45
	6,38	5,10	4,10	0,33	0,13	9,66	0,10	1,70	11,46	84,29	1,02	1,14
	6,24	5,10	3,00	0,23	0,12	8,45	0,10	1,70	10,25	82,44	1,17	1,13

DESCRIÇÃO MORFOLÓGICA (REGENERAÇÃO NATURAL)

- A1 0-5 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR 2,5/2); franco-arenosa; fraca pequena bloco subangulares; macio; não plástico e não pegajoso; transição plana e clara. Raízes finas e muito finas comuns, transagregados; porosidade tubular e fissural moderada.
- A2 5-15 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/3); franco-arenosa; fraca pequena a média bloco subangulares; macio; não plástico e não pegajoso; transição plana e clara. Raízes finas e muito finas comuns; raízes médias comuns; poucas raízes grossas; porosidade tubular abundante; pouca porosidade fissural; preenchimento denso contínuo bruno.
- Bt1 15-25 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/4); franca; fraca média a grande blocos subangulares; solto, solto; ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual.
- Bt2 25-40 cm; vermelho-amarelado (5YR 4/6) franca; fraca média a grande blocos subangulares; solto; ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso; transição plana e gradual.
- BC1 40-60 cm; bruno-avermelhado-escuro (5YR 3/4); franco-arenosa; pequena blocos subangulares; ligeiramente duro; ligeiramente plástico e não pegajoso; transição plana e clara.
- BC2 60-75 cm; bruno (7,5YR 4/4); franco-arenosa; fraca pequena a média bloco subangulares; ligeiramente plástico e ligeiramente pegajoso.
- BC3 75-85+ cm; bruno (7,5YR 4/4); areia franca; fraca média a grande bloco subangulares; não plástico e não pegajoso.

ANÁLISES FÍSICAS E QUÍMICAS (REGENERAÇÃO NATURAL)

Simb.	Prof.	Areia	Silte	Argila	Arg. Disp.	Grau de Floc.	Relação Silte/Argila	P assi.	C org.
Hor	cm	-----g kg ⁻¹ -----				%		mg kg ⁻¹	g kg ⁻¹
A1	0-5	726,25	221,95	51,80	34,60	33,20	4,28	404,70	22,17
A2	5-15	609,40	250,00	140,60	79,00	43,81	1,78	5,72	5,12
Bt1	15-25	461,65	287,95	250,40	173,80	30,59	1,15	3,24	4,11
Bt2	25-40	483,10	391,90	125,00	135,00	-8,00	3,14	2,10	3,09
BC1	40-60	620,40	330,00	49,60	78,40	-58,06	6,65	3,34	2,08
BC2	60-75	710,40	258,80	30,80	24,40	20,78	8,40	16,49	1,07
BC3	75-85 ⁺	839,00	138,20	22,80	34,60	-51,75	6,06	15,54	0,82

Hor.	pH Água 1:2,5	Complexo Sortivo								V	m	PST
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	S	Al ³⁺	H ⁺	CTC			
		-----cmol _c kg ⁻¹ -----								-----%-----		
A1	6,50	6,00	3,50	0,24	0,05	9,79	0,10	1,70	11,59	84,48	1,01	0,44
A2	5,65	5,50	1,70	0,16	0,07	7,43	0,20	2,90	10,53	70,55	2,62	0,67
Bt1	5,36	7,90	3,60	0,12	0,20	11,82	0,30	3,30	15,42	76,65	2,48	1,28
Bt2	5,57	11,40	4,50	0,08	0,16	16,14	0,50	3,00	19,64	82,18	3,00	0,80
BC1	5,43	10,10	4,70	0,07	0,16	15,04	0,70	3,40	19,14	78,58	4,45	0,86
BC2	5,68	9,00	4,70	0,07	0,20	13,98	0,50	1,40	15,88	88,03	3,45	1,29
BC3	6,00	6,30	3,00	0,07	0,19	9,56	0,30	1,30	11,16	85,66	3,04	1,70