



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE CIÊNCIAS DO SOLO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA: SOLOS E NUTRIÇÃO DE
PLANTAS

THIAGO LEITE DE ALENCAR

ALTERAÇÕES FÍSICAS EM UM CAMBISSOLO TRATADO COM
BIOFERTILIZANTE: INDICADORES DE QUALIDADE E REFINAMENTO DO
MÉTODO DE AVALIAÇÃO PELO $S_{RELATIVO}$

FORTALEZA

2014

THIAGO LEITE DE ALENCAR

**ALTERAÇÕES FÍSICAS EM UM CAMBISSOLO TRATADO COM BIOFERTILIZANTE:
INDICADORES DE QUALIDADE E REFINAMENTO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO
PELO $S_{RELATIVO}$**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Orientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota

FORTALEZA

2014

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

-
- A355a Alencar, Thiago Leite de.
Alterações físicas em um cambissolo tratado com biofertilizante: indicadores de qualidade e refinamento do método de avaliação pelo $S_{relativo}$ / Thiago Leite de Alencar. – 2014.
91 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 Agronomia: Solos e Nutrição de Plantas, Fortaleza, 2014.
Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.
Orientação: Jaedson Cláudio Anunciato Mota.
1. Física do solo. 2. Matéria orgânica. 3. Biofertilizantes. I. Título.

CDD 631.4

THIAGO LEITE DE ALENCAR

**ALTERAÇÕES FÍSICAS EM UM CAMBISSOLO TRATADO COM BIOFERTILIZANTE:
INDICADORES DE QUALIDADE E REFINAMENTO DO MÉTODO DE AVALIAÇÃO
PELO $S_{RELATIVO}$**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre. Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas

Orientador: Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota

Aprovada em: 11/07/2014.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Jaedson Cláudio Anunciato Mota (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Raimundo Nonato de Assis Júnior
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Brivaldo Gomes de Almeida
Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE)

Aos meus pais, Nilson Ferras e Irisneide Leite, que na sua simplicidade, com ensinamentos, sempre me mostraram o valor da educação, das virtudes e da prática de boas ações.

Ao meu avô Pedro Ferras, por ser meu grande exemplo de vida e pelos momentos que levo na memória até hoje.

AGRADECIMENTOS

A Deus; não sei o que seria de mim sem a fé que eu tenho nele;

Aos meus pais, Nilson de Alencar Ferras e Francisca Irisneide Leite de Alencar, pelo esforço, confiança, amor, ajuda e, em especial, por todo carinho ao longo deste percurso;

À minha tia Maria Ivone Leite Cavalcante, por todo apoio, carinho e incentivo para concretização dessa etapa de realização pessoal e profissional;

À minha namorada, Luane Bitu Leal Alencar, pelo amor, compreensão, incentivo, atenção e por estar sempre ao meu lado em todos os momentos;

À Universidade Federal do Ceará e ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Solos e Nutrição de Plantas, pela oportunidade de realização do mestrado;

Ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFCE - Campus Limoeiro do Norte), pelo apoio à realização do experimento.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES), pela concessão da bolsa durante o período de estudo;

À FUNCAP – Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo apoio financeiro via Projeto DCR – 0024-00013.01.00/10;

Ao Prof. Jaedson Cláudio Anunciato Mota, pela orientação, amizade, atenção, apoio, valiosos ensinamentos e exemplo de dedicação profissional;

Ao Prof. Raimundo Nonato de Assis Júnior, pelos ensinamentos e exemplo de competência profissional;

A Arilene Franklin Chaves e ao Prof. Francisco Limeira da Silva, por tornarem possível a realização deste trabalho, a Carlos Levi Anastácio dos Santos e Andréia Pinheiro Queiroz Viana, pelo auxílio em análises de laboratório, e a Roberto Albuquerque, pelo auxílio na coleta das amostras;

Aos docentes do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, pelos ensinamentos transmitidos durante as disciplinas cursadas;

Aos funcionários do Departamento de Ciências do Solo Antônio José Duarte de Menezes, Francisco José da Silva e José Tavares da Costa, pelo auxílio nas análises;

A Antonio Glaydson de Sousa Feitosa, Erivan Araújo Felipe e Magnum de Souza Pereira, pela estimada amizade, consideração e companheirismo;

Aos colegas do curso de mestrado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas da UFC (2012.2) Eder de Oliveira Santos, Esdras Rocha da Silva, Fabiana Machado Gadelha, Jackson de Lima Araújo, Jones Batista Vidal, José Alexsandro Guimarães Lima, Maykon Sousa

da Silva, Maria Gabrielle Sousa de Santana, Mirele Paula da Silva Ferreira, Keivianne da Silva Lima, pelo companheirismo, troca de conhecimentos ao longo do curso e convívio alegre; e
Aos que de alguma forma contribuíram para a concretização deste trabalho.

*“Educação é uma descoberta progressiva da
nossa própria ignorância.”*

Voltaire

RESUMO

O conhecimento sobre as alterações físicas e qualidade do solo é importante para o direcionamento adequado das estratégias de manejo a serem utilizadas quando da exploração do solo por cultivos agrícolas. Partindo das hipóteses de que o cultivo, por degradar as propriedades do solo relacionadas com a geometria porosa, piora sua qualidade em relação ao solo sob vegetação natural, de que a aplicação de biofertilizante (matéria orgânica) em solo sob cultivo, por atuar como agente cimentante entre as partículas, promove a melhoria de seus atributos físicos em relação ao solo sob vegetação natural, de que as alterações físicas do solo podem ser aferidas por índices e interpretadas sob o aspecto qualitativo, e de que o índice S_{relativo} obtido a partir da curva característica de água no solo construída o mais próximo da porosidade textural é mais sensível às alterações físicas do solo do que o S_{relativo} obtido com a curva construída a partir de terra fina seca ao ar (TFSA), objetivou-se: 1) avaliar os efeitos do cultivo e da aplicação de um biofertilizante sobre a qualidade física de um Cambissolo cultivado com *Ficus carica* L., irrigado por sistema de gotejamento; 2) verificar a eficiência de indicadores em mensurar alterações em atributos físicos; e 3) refinar o método de obtenção do S_{relativo} com o propósito de aumentar a sua sensibilidade às alterações físicas do solo. Para fins de avaliação da qualidade física, foram contempladas cinco situações de solo: sob cultivo de figo sem aplicação do biofertilizante (testemunha), com aplicação de 20%, 40% e 60% do biofertilizante na lâmina de irrigação, e mata nativa secundária (testemunha adicional), até a profundidade de 0,3 m, nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m, e quatro repetições. Nestas camadas foram coletadas amostras de solo com estruturas deformada e indeformada para a realização de análises físicas pertinentes ao objetivo do estudo. Foi adotado o delineamento inteiramente casualizado. Para o refinamento do S_{relativo} , com curva característica de água no solo contendo somente porosidade textural (curva de referência), foi feita a dispersão de solo em água e com adição de hidróxido de sódio 1 N (com e sem remoção do sódio por lavagem). Foram aplicados os testes F para a análise de variância e de Dunnett para a comparação de médias. Foram realizados testes de paralelismo de retas e de intercepto para as regressões entre variáveis físicas do solo e S_{relativo} obtidos por TFSA, com dispersão em água e com adição de hidróxido de sódio 1N (com e sem lavagem). Também foi realizada análise multivariada dos dados. Concluiu-se que: 1) a qualidade da rede porosa é melhorada, senão mantida, quando o solo é cultivado sob as condições descritas neste experimento; 2) quando cultivado, a aplicação de biofertilizante melhora ou, no mínimo, mantém a qualidade dos atributos físicos do solo em todas as camadas consideradas, com exceção da permeabilidade intrínseca do solo ao ar na camada de 0,0-0,1 m;

3) em relação ao solo de mata nativa, a aplicação de biofertilizante melhora ou, pelo menos, mantém a qualidade dos atributos físicos do solo em todas as camadas consideradas, exceto quanto ao grau de floculação das argilas na camada de 0,0-0,1 m; 4) os casos em que houve piora da qualidade do atributo físico avaliado em decorrência dos tratamentos aplicados, ainda que eles não sejam considerados críticos ao desenvolvimento de plantas, são indicativos de que há a necessidade de adoção de práticas de manejo específicas para evitar a degradação do solo; 5) a maioria dos indicadores de qualidade física do solo selecionados é eficiente em quantificar as alterações impostas à estrutura do solo; e 6) o índice S_{relativo} obtido a partir do método da dispersão de solo em água é mais sensível às alterações físicas do solo do que o S_{relativo} obtido por terra fina seca ao ar.

Palavras-chave: física do solo, matéria orgânica, cultura do figo.

ABSTRACT

The knowledge about soil physical changes and soil quality is important for the adequate targeting of management strategies to be adopted when soil is used for cropping. Considering the hypotheses that a) cultivation worsens soil quality, compared to soil under natural vegetation, for degrading its properties related to the porous geometry; b) biofertilizer application (organic matter) in soil under cultivation promotes an improvement in its physical attributes, compared to the soil under natural vegetation, for acting as a cementing agent between particles; c) soil physical changes can be assessed through indices and interpreted under the qualitative aspect; and d) the S_{relative} index obtained using the soil-water retention curve determined as close as possible to the structural porosity is more sensitive to physical changes than the S_{relative} obtained using a soil-water retention curve determined from air-dried soil, the objectives of this study were: 1) evaluate the effects of cultivation and biofertilizer application on the physical quality of a Cambisol cultivated with *Ficus carica* L., irrigated by drip system; 2) verify the efficiency of indicators at assessing changes in physical attributes; and 3) refine the method of obtention of the S_{relative} index, aiming to increase its sensitivity to the soil physical changes. In order to evaluate physical quality, five soil scenarios were analyzed: under fig cultivation without biofertilizer application (control), with application of 20%, 40% and 60% of the biofertilizer through irrigation, and secondary native forest (additional control), until the depth of 0.3 m, in the layers of 0.0-0.1 m, 0.1-0.2 m and 0.2-0.3 m, and four replicates. In these layers, disturbed and undisturbed soil samples were collected in order to perform physical analyses. The completely randomized design was adopted. For the refinement of S_{relative} , with the soil-water retention curve containing only textural porosity (reference curve), soil dispersion was performed in water and with the addition of 1 N sodium hydroxide (with and without removing sodium through washing). F tests were applied for the variance analysis and Dunnett test for mean comparison. Line parallelism and intercept tests were performed for the regressions between soil physical variables and S_{relative} obtained using air-dried soil, with dispersion in water and addition of 1 N sodium hydroxide (with and without washing). A multivariate analysis was also performed in the dataset. It was concluded that: 1) the porous network quality is improved, or kept, when soil is cultivated under the conditions described in this experiment; 2) when cultivated, biofertilizer application improves or, at least, maintains the quality of soil physical attributes in all considered layers, except for the soil air intrinsic permeability in the layer of 0.0-0.1 m; 3) regarding the soil under native forest, biofertilizer application improves or, at least, maintains the quality of soil physical attributes in all

considered layers, except for the clay flocculation degree in the layer of 0.0-0.1 m; 4) cases where the quality of soil physical attributes was worsened as a result of the applied treatments, although they were not considered as critical for plant development, are an indication that the adoption of specific management techniques is needed to avoid soil degradation; 5) most of the selected soil physical quality indicators are efficient at quantifying changes imposed to the soil structure; and 6) the S_{relative} index obtained from the method of soil dispersion in water is more sensitive to soil physical changes than the S_{relative} obtained using air-dried soil.

Keywords: soil physics, organic matter, crop fig.

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1 - Grau de floculação, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.....43
- Gráfico 2 - Densidade de partículas, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.....44
- Gráfico 3 - Densidade do solo, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.....45
- Gráfico 4 - Teores de carbono orgânico, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.....46
- Gráfico 5 - Estabilidade de agregados (4,76-2,00 mm) em água, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.....47
- Gráfico 6 - Diâmetro médio ponderado, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.....48
- Gráfico 7 - Resistência do solo à penetração, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% -

	Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.	49
Gráfico 8	- Permeabilidade intrínseca do solo ao ar, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.	51
Gráfico 9	- Relação entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) e as tensões aplicadas (τ), para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B) e 0,2-0,3 m (C).....	52
Gráfico 10	- Relação logarítmica entre K_{ar} e ϵ_{ar} para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B) e 0,2-0,3 m (C).....	53
Gráfico 11	- Curva característica de água no solo e curva diferencial da curva característica de água no solo para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária na camada de 0,0-0,1 m.....	57
Gráfico 12	- Curva característica de água no solo e curva diferencial da curva característica de água no solo para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária na camada de 0,1-0,2 m.....	58
Gráfico 13	- Curva característica de água no solo e curva diferencial da curva característica de água no solo para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária na camada de 0,2-0,3 m.....	59
Gráfico 14	- Índice S para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.	60
Gráfico 15	- Histograma de distribuição das frações granulométricas no material para a construção das curvas-padrão de referência nos métodos de obtenção do $S_{relativo}$	61
Gráfico 16	- Valores do índice $S_{relativo}$ a partir dos métodos para a construção da curva-padrão de referência. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.	62

- Gráfico 17 - Índice S_{relativo} para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade..... 63
- Gráfico 18 - Regressão e correlação entre o S_{relativo} e atributos relacionados com a fração porosa do solo, para a camada de 0,0-0,10 m. ** - significativo pelo teste t de Student a 1% de probabilidade; ns - não significativo pelo teste t de Student a 5% de probabilidade. 64
- Gráfico 19 - Dispersão dos atributos físicos para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m. ρ_{solo} : densidade do solo; N e $\log K_1$: índices de continuidade de poros; Kar: permeabilidade intrínseca do solo ao ar; α : porosidade total; Micro: microporos; Macro: macroporos; S: índice S; S_r : índice S_{relativo} ; T1, T2, T3 correspondem ao tratamento testemunha (cultivado, porém sem adição de biofertilizante), B1(20%), B2(20%), B3(20%) ao solo cultivado, com adição de biofertilizante 20%, B1(40%), B2(40%), B3(40%) ao com biofertilizante 40%, B1(60%), B2(60%), B3(60%) ao com biofertilizante 60% e M1, M2, M3 à mata secundária, todos, respectivamente, às camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m. 68
- Gráfico 20 - Dendrograma representando a dissimilaridade entre os grupos da testemunha e do cultivo de figo. T1, T2, T3 correspondem ao sistema com a testemunha, B1(20%), B2 (20%), B3 (20%) ao sistema com biofertilizante 20%, B1(40%), B2 (40%), B3 (40%) ao com biofertilizante 40%, B1(60%), B2 (60%), B3 (60%) ao com biofertilizante 60% e M1, M2, M3 à mata secundária, todos, respectivamente, às camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m. 69

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características químicas do biofertilizante puro e das doses estimadas, após diluído em água, nas diferentes concentrações.	32
Tabela 2 - Características físicas do solo (granulometria, argila natural e classe textural). ...	42
Tabela 3 - Índice de continuidade de poros (KI) para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m, para a tensão de 10 kPa.	54
Tabela 4 - Parâmetros da equação de regressão de $\log K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar}$ e porosidade bloqueada (ε_b) para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária, nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m.	55
Tabela 5 - Autovalores e porcentagem explicada por cada componente.	65
Tabela 6 - Correlação entre as variáveis e componentes principais e sua respectiva contribuição para cada componente.	66

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	18
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1 Cultura do figo.....	20
2.2 Qualidade do solo	20
2.3 Indicadores de qualidade do solo	21
2.3.1 <i>Densidade do solo</i>	22
2.3.2 <i>Porosidade do solo</i>	22
2.3.3 <i>Matéria orgânica</i>	23
2.3.4 <i>Estabilidade de agregados</i>	24
2.3.5 <i>Resistência do solo à penetração</i>	25
2.3.6 <i>Curva característica de água no solo</i>	26
2.3.7 <i>Índice S</i>	27
2.3.8 <i>Índice S_{relativo}</i>	27
2.3.9 <i>Permeabilidade intrínseca do solo ao ar e continuidade de poros</i>	28
2.4 Dispersão de solos	29
3 MATERIAL E MÉTODOS	31
3.1 Local do experimento	31
3.2 Caracterização da área experimental e tratamentos.....	31
3.3 Amostragem	32
3.4 Atributos avaliados.....	33
3.4.1 <i>Densidade do solo</i>	33
3.4.2 <i>Densidade das partículas</i>	33
3.4.3 <i>Granulometria</i>	33
3.4.4 <i>Argila dispersa em água</i>	34
3.4.5 <i>Grau de Flocculação</i>	34
3.4.6 <i>Carbono orgânico</i>	34
3.4.7 <i>Porosidade</i>	34
3.4.8 <i>Permeabilidade intrínseca do solo ao ar</i>	35
3.4.9 <i>Índice de continuidade de poros</i>	35
3.4.10 <i>Resistência do solo à penetração</i>	36
3.4.11 <i>Estabilidade de agregados</i>	37

<i>3.4.12 Curva característica de água no solo</i>	37
<i>3.4.13 Índice S</i>	38
<i>3.4.14 Índice $S_{relativo}$</i>	39
3.5 Análise dos dados	40
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
4.1 Textura do solo e grau de flocculação das argilas	42
4.2 Densidade de partículas e do solo	44
4.3 Carbono orgânico	45
4.4. Agregados do solo	46
4.5 Resistência do solo à penetração	48
4.6 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar e continuidade de poros	49
4.7 Curva característica de água no solo e frequência acumulada de poros	55
4.8 Índice S	59
4.9 Índice $S_{relativo}$	60
4.10 Estatística multivariada	64
5. CONCLUSÕES	70
REFERÊNCIAS	71
APÊNDICES	84

1. INTRODUÇÃO

A fruticultura é uma das atividades agrícolas relevantes para a economia do Brasil, visto que o país apresenta condições ambientais favoráveis para produzir frutas de excelente qualidade. Na região semiárida do Nordeste, a Chapada do Apodi é um polo promissor de fruticultura, tendo em vista as condições adequadas de clima, de topografia, além da disponibilidade de recursos hídricos que viabilizam a técnica da irrigação.

O cultivo de figo (*Ficus carica* L.), ainda incipiente na Chapada do Apodi, apresenta um elevado potencial para fruticultura cearense, pois o período de produção é reduzido em comparação às outras regiões produtoras, além de os frutos apresentarem °Brix mais elevado. Por estes aspectos, dentre outros, a expansão do cultivo da espécie como forma de aumentar a fonte de renda para agricultores e inserir o Ceará no mercado de exportação de figo já é uma realidade.

É fato que a corrida pelo aumento da produção de frutos na Chapada do Apodi modificou o uso do solo, em que matas nativas foram removidas e substituídas por áreas agrícolas, com demasiado uso do recurso solo, sem que medidas de manutenção e/ou melhoria da qualidade do solo fossem postas em debate. Como resultado do processo tem-se, em tese, a degradação dos atributos físicos, químicos e biológicos, causando grandes perdas da qualidade do solo.

A aplicação de biofertilizante, produto resultante da biodigestão de resíduos orgânicos, apesar de ter a função primária de fornecer nutrientes, tem sido uma das alternativas utilizadas para mitigar os efeitos da degradação do solo, uma vez que a matéria orgânica atua como agente cimentante entre as partículas, aumenta a capacidade de troca de cátions, disponibilizando mais nutrientes às plantas, e serve como fonte de alimento para a biota do solo.

A qualidade dos solos tem se tornado tema de interesse na área da ciência do solo, pela preocupação com a proteção do solo e sustentabilidade dos sistemas agrícolas. Neste contexto, tem-se procurado identificar, selecionar e atribuir valores quantitativos para indicadores de qualidade, que melhor representem o desempenho de determinadas funções do solo. Dentre os vários indicadores, um índice de avaliação da estrutura do solo – o S_{relativo} –, derivado do índice S proposto por Dexter em 2004, foi apresentado por Freire em 2012. Os resultados observados até agora têm sido promissores, mas, por ser um índice novo, o S_{relativo} necessita de aprimoramento para melhorar a sua sensibilidade às mudanças físicas impostas ao solo.

Nesse contexto, o trabalho partiu das seguintes hipóteses: 1) o cultivo, por degradar as propriedades do solo relacionadas à geometria porosa, piora sua qualidade em relação ao solo sob vegetação natural; 2) a aplicação de biofertilizante (matéria orgânica) em solo sob cultivo, por atuar como agente cimentante entre as partículas, promove a melhoria de seus atributos físicos em relação ao solo sem aplicação de biofertilizante e sob vegetação natural; 3) as alterações físicas do solo podem ser aferidas por índices e interpretadas sob o aspecto qualitativo; e 4) o índice S_{relativo} obtido a partir de uma curva característica de água no solo (curva de referência) construída o mais próximo da porosidade textural é mais sensível às alterações físicas do solo do que o S_{relativo} obtido a partir de uma curva construída com terra fina seca ao ar (TFSA). Portanto, objetivou-se avaliar os efeitos integrados do cultivo e da aplicação de um biofertilizante sobre a qualidade física de um Cambissolo cultivado com figo (*Ficus carica* L.) na Chapada do Apodi, verificar a eficiência de indicadores em mensurar alterações em atributos físicos e refinar o método de obtenção do S_{relativo} com o propósito de aumentar a sua sensibilidade às alterações físicas do solo.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Cultura do figo

A figueira (*Ficus carica* L.) pertence à família das *Moraceae* e é originária da região do mediterrâneo (CELEDONIO, 2011). Apresenta-se com porte arbustivo, raízes fibrosas, em geral pouco profundas, estendendo-se superficialmente a grandes distâncias quando encontra condições favoráveis (RIGITANO, 1955; LEONEL; DAMATTO JUNIOR, 2008). Andrade et al. (2014) estudando produção de figueira, coletaram amostras de solo nas profundidades de 0,0-0,2 m e 0,2-0,4 m por considerarem o sistema radicular efetivo do figo predominantemente nas referidas profundidades. Vale destacar que, segundo Souza (2000), em condições especiais as raízes podem ser encontradas em até seis metros de profundidade. Os figos medem de 5 a 8 cm de comprimento, com formato piriforme, e coloração variada que vai do esverdeado ao violáceo-amarronzado (SILVA, 2012). De acordo com Penteado e Franco (1997), por ser de origem da região mediterrânea, onde predomina clima subtropical temperado, a cultura do figo se adapta aos diferentes climas, em função da sua baixa exigência de frio.

Segundo Leonel e Tecchio (2010), o cultivo de figo é uma das possibilidades de exploração de frutas para o Brasil, pois este se encontra, atualmente, na posição de segundo maior exportador de frutas *in natura* do mundo, devido às chances de a produção brasileira coincidir com a entressafra do mercado mundial no hemisfério norte.

O Brasil é considerado como o principal produtor de figos do hemisfério sul, possuindo uma área cultivada correspondente a 3.020 ha. Segundo dados da FAOSTAT (2013), o país está classificado como o nono maior produtor mundial (26.233 t), área colhida de 3.041 ha, e a quinta maior produtividade (8,63 t ha⁻¹ ano⁻¹), o que torna o Brasil um dos grandes produtores mundiais e o principal exportador de figos frescos para o mercado do Egito, Turquia e Líbia, maiores consumidores mundiais.

2.2 Qualidade do solo

As pesquisas relacionadas à qualidade do solo tiveram uma importância crescente nos últimos anos (WILSON; MALISZEWSKA-KORDYBACH, 2000), destacando-se a preocupação com a sua manutenção e/ou melhora. Desta forma, a qualidade do solo tem sido monitorada constantemente por meio da quantificação de alterações nos seus atributos decorrentes de sistemas de usos e manejos (NEVES *et al.*, 2007).

Na ciência do solo, várias abordagens sobre o conceito de qualidade do solo têm sido feitas pelos pesquisadores, sendo que a maior parte delas, atualmente, baseia-se em Larson e Pierce (1994), que definem a qualidade do solo como uma combinação de propriedades físicas, químicas e biológicas que fornece os meios tanto para a produção vegetal e animal, como para regular o fluxo de água no ambiente e servir como um filtro ambiental na atenuação e degradação de componentes ambientalmente danosos ou perigosos.

A qualidade do solo tem influência nas funções básicas do solo, tais como movimento, redistribuição e fornecimento de água e solutos para as plantas; armazenamento e ciclagem de nutrientes; filtrando, imobilizando e desintoxicando materiais orgânicos e inorgânicos, promovendo o crescimento das raízes das plantas e fornecendo resistência à erosão (KARLEN *et al.*, 1997).

Vários fatores são responsáveis pela qualidade do solo, com destaque para matéria orgânica, pois ela atua diretamente na manutenção da produtividade de ecossistemas agrícolas e naturais (GAMA-RODRIGUES; GAMA-RODRIGUES, 2008).

A qualidade do solo é um estado funcional complexo e, portanto, não pode ser medida diretamente. Porém, pode ser inferida a partir de propriedades do solo, as quais são chamadas de propriedades indicadoras da qualidade do solo (ISLAM; WEIL, 2000). Os indicadores de qualidade do solo, sejam eles físicos, químicos ou biológicos, devem refletir a capacidade do solo em exercer as suas funções (SHUKLA; LAL; EBINGER, 2006).

2.3 Indicadores de qualidade do solo

Os indicadores de qualidade do solo são necessários para monitorar mudanças e determinar tendências de melhoria ou deterioração da qualidade do solo em diversos ecossistemas (ARSHAD; MARTIN, 2002). A seleção de tais indicadores deve levar em conta alguns aspectos como as funções de interesse no solo e suas relações com o mesmo, as facilidades de medição e confiabilidade da medida e importância da variação espacial e temporal. Dessa forma, o indicador deve tanto integrar propriedades ou processos físicos, químicos e biológicos como servir de parâmetro básico para estimativa das propriedades ou funções que são desempenhadas pelo solo (NORTCLIFF, 2002; ZALIDIS *et al.*, 2002).

O sistema solo caracteriza-se por possuir atributos que podem se relacionar funcionalmente entre si; portanto, estes podem ser utilizados para quantificar a qualidade dos solos (LARSON; PIERCE, 1994; ZALIDIS *et al.*, 2002). Os atributos mais sensíveis às

mudanças nas práticas de manejo do solo são os mais adequados para serem utilizados como indicadores (ARSHAD; MARTIN, 2002).

Os principais atributos físicos considerados adequados para avaliação da qualidade física do solo estão relacionados com o conteúdo de água no solo, oxigênio disponível para o desenvolvimento de plantas e temperatura, dentre os quais se destacam: densidade do solo, porosidade e distribuição de tamanho de poros, matéria orgânica, estabilidade de agregados, resistência do solo à penetração e permeabilidade do solo ao ar (CAMPOS *et al.*, 1995; INGRAMO, 2003; PEDROTTI; MELLO JÚNIOR, 2009).

2.3.1 Densidade do solo

A densidade do solo é variável de acordo com a textura dos solos, conteúdo de matéria orgânica, estresses oriundos de manejos agrícolas (cultivos, tráfegos de máquinas) e outros fatores ambientais (chuva, ação das raízes das plantas) (LARSON, GUPTA; USECHE, 1980; RAWLS, 1983; HUNTINGTON *et al.*, 1989).

A densidade do solo tem relação direta com a forma e estabilidade estrutural dos solos, sendo um atributo que reflete o arranjo das partículas do solo, definindo as características do sistema poroso (STONE; SILVEIRA, 2001; JONG VAN LIER, 2010). É um parâmetro normalmente utilizado em pesquisas para quantificar a compactação em solos agrícolas (KELLER; HAKANSSON, 2010), devido a sua sensibilidade a alterações na estrutura do solo. Assim, quando o solo sofre compactação a densidade é afetada, ocasionando aumento em seus valores e, conseqüentemente, promovendo redução na porosidade total do solo, o que aumenta as restrições ao crescimento e desenvolvimento das plantas (KELLER; HAKANSSON, 2010). Neste contexto, a densidade do solo é um dos parâmetros que controlam as relações ar-água no solo, além de servir na orientação das práticas de manejo a serem implantadas (JORGE *et al.*, 1991).

2.3.2 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). No espaço poroso é onde ocorrem os processos dinâmicos relacionados ao ar e à solução do solo (HILLEL, 1972).

A formação de poros no solo pode ser oriunda de fatores abióticos (tráfego, ciclos de congelamento e descongelamento, umedecimento e secagem) e bióticos (crescimento de raízes, escavação por minhocas etc.) (KAY; VANDENBYGAART, 2002).

Os poros presentes no solo são de tamanho, forma e continuidade variáveis, características que influenciam diretamente a taxa de infiltração de água no solo, armazenagem e drenagem, distribuição e circulação dos gases e na facilidade de crescimento e desenvolvimento das raízes das plantas (KAY; VANDENBYGAART, 2002).

Richards (1965) utilizou o diâmetro igual a 0,05 mm como limite adequado para separação entre macro ($\geq 50 \mu\text{m}$) e microporos ($< 50 \mu\text{m}$). A principal função dos macroporos, segundo 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 porosidade do solo é um parâmetro importante a ser avaliado, uma vez que ela afeta diretamente o fluxo de fluidos e a armazenagem da água que é disponibilizada para as plantas (SORT; ALCANIZ, 1999). A porosidade caracteriza tipos de solos e é amplamente influenciada pelo uso e manejo dos sistemas agrícolas (MORET; ARRÛE, 2007; BORMANN; KLAASSEN, 2008).

Mudanças ocasionadas na estrutura do solo, geralmente, resultam em diminuição no volume de poros de diâmetro maiores, responsáveis pela transmissão de água, e um aumento de poros de diâmetro menores que atuam na armazenagem, ocasionando deterioração geral das propriedades hidráulicas do solo (PAGLIAI *et al.*, 1989).

2.3.3 Matéria orgânica

A matéria orgânica é em grande parte responsável pela qualidade física do solo, pois atua na relação adequada entre micro e macroporosidade, que segundo Kiehl (1979) deve ser de 2:1, na retenção de água, resistência à compactação e diretamente na formação de agregados no solo, por ser um agente flocculante e cimentante (ZHANG; HARTGE; RINGE, 1997; BARRAL *et al.*, 1998; VIDAL-BEAUDET; CHARPENTIER, 2000; BRANCALIÃO; MORAES, 2008). O processo de agregação é dinâmico, sendo necessário o acréscimo de material orgânico para manutenção da estrutura adequada para o desenvolvimento das culturas (CUNHA *et al.*, 2011). Portanto, a manutenção da matéria orgânica no solo é desejável, uma vez que propicia múltiplos efeitos benéficos sobre o estado de nutrientes no solo, estrutura e capacidade de retenção de água (VON LUTZOW *et al.*, 2002).

As perdas de material orgânico no solo são ocasionadas, geralmente, por práticas de manejo agrícola, que propiciam o revolvimento do solo, influenciando assim a dinâmica da matéria orgânica (BAYER; MIELNICZUK, 1999; VEZZANI; MIELNICZUK, 2011).

Atualmente, a adição de material orgânico, como os biofertilizantes, tem se tornado uma alternativa para mitigar os efeitos da degradação do solo, com o objetivo de melhorar o seu desempenho funcional no sistema agrícola (PAGLIAI; VITTORI ANTISARI, 1993; KIMATURA *et al.*, 2008). O biofertilizante é produto resultante da biodigestão de resíduos orgânicos que, por conter células vivas ou latentes de microrganismos (e composto bioativo), estimula a liberação de substâncias húmicas no solo (BARROS, 2011). O esterco bovino é a fonte mais utilizada e com maior potencial de uso como fertilizante orgânico, especialmente em solos pobres em matéria orgânica (FILGUEIRA, 2008). Devido a sua importante atuação como agente que proporciona benefícios aos solos, o biofertilizante é capaz de melhorar substancialmente muitos de seus atributos físicos, químicos e biológicos (TEJADA *et al.*, 2008).

Em relação aos adubos orgânicos na forma líquida, a aplicação do biofertilizante bovino tem se tornado uma prática eficiente no processo de fertilização, sendo uma forma alternativa de suprir a deficiência de nutrientes, além de favorecer o processo de agregação das partículas do solo (TRATCH; BETTIOL, 1997; MEDEIROS *et al.*, 2007; ALVES *et al.*, 2009).

Segundo Bettiol *et al.* (1998), o biofertilizante bovino na forma líquida deve ser aplicado diretamente no solo, o que vai favorecer de forma significativa alguns atributos físicos como infiltração, aeração do solo e armazenamento de água. Gialbiatti *et al.* (1996) observaram que dos tratamentos aplicados em cultivo de feijoeiro, os que receberam a maior dose de biofertilizante apresentaram maior desenvolvimento das plantas, devido à melhora das condições físicas do solo, maior capacidade de troca catiônica e disponibilidade de nutrientes.

2.3.4 Estabilidade de agregados

A estabilidade de agregados pode ser definida como a resistência do solo aos efeitos externos destrutivos como chuva, escoamento superficial e ventos (SAYGIN *et al.*, 2012). É um dos indicadores mais importantes da degradação dos solos, atuando na susceptibilidade à ação dos processos erosivos e sendo influenciado diretamente por práticas agrícolas (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011).

O processo de agregação do solo é um fenômeno que acontece em duas etapas: a primeira relacionada com a aproximação das partículas do solo e a segunda com a sua

estabilização ocasionada por agentes cimentantes (KIEHL, 1979; BAVER *et al.*, 1973). Vários estudos já foram realizados sobre fatores envolvidos na formação e estabilidade de agregados no solo, e identificaram como principais, além da matéria orgânica, a fração mineral, microrganismos, a fauna do solo, raízes e variáveis ambientais (SALTON *et al.*, 2008).

A matéria orgânica é um dos agentes que tem influência direta no mecanismo de formação das diferentes classes de tamanho de agregados, cuja quantidade permite maior ou menor agregação, influenciando, por exemplo, taxas de perda de solo (CASTRO FILHO; LOGAN, 1991) em decorrência da maior resistência à desagregação e dispersão (WISCHMEIER; SMITH, 1965).

Os agregados do solo podem ser analisados de várias formas, levando-se em consideração o tamanho dos agregados e estado da agregação (CASTRO FILHO *et al.*, 1998). Dentre os parâmetros destacam-se o diâmetro médio ponderado (DMP), o diâmetro médio geométrico (DMG) e o índice de estabilidade de agregados (KEMPER, 1965; KEMPER; CHEPIL, 1965). Segundo Castro Filho *et al.* (1998) o DMP é um parâmetro que pode refletir a resistência do solo à erosão, sendo influenciado pela presença de agregados grandes retidos nas peneiras maiores.

2.3.5 Resistência do solo à penetração

A resistência à penetração é um dos indicadores de qualidade física do solo mais comumente utilizados para avaliação de áreas agrícolas (BEUTLER *et al.*, 2001; PEDROTTI *et al.*, 2001). É um fator de impedimento mecânico que o solo oferece ao desenvolvimento de raízes de plantas, afetando assim, diretamente, a produtividade das culturas (SILVA *et al.*, 2008). Esse impedimento, geralmente, aumenta com o aumento da densidade do solo e com a redução do teor de água no solo, sendo indesejável em certos valores definidos como limitantes para o crescimento de plantas (BENGHOUGH; MULLINS, 1990). Ley *et al.* (1995) encontram correlação linear entre a resistência do solo à penetração e a umidade do solo. De acordo com Busscher *et al.* (1997), a utilização de modelo matemático em que a resistência do solo à penetração é dependente do teor de água no solo pode esclarecer os efeitos das diferenças espaciais, corrigindo os dados para um conteúdo de água comum.

Segundo Benghough e Mullins (1990), Merotto Jr. e Mundstock (1999), Beutler *et al.* (2004), valores de resistência à penetração acima de 1 MPa restringem o crescimento de raízes das plantas; porém o valor de 2 MPa tem sido frequentemente considerado como crítico,

sendo utilizado no conceito do intervalo hídrico ótimo (SILVA *et al.*, 1994; TORMENA *et al.*, 1998).

A compactação é uma alteração na estrutura do solo que ocasiona reorganização das partículas e de seus agregados, podendo tanto reduzir a infiltração e aumentar o escoamento superficial e subsuperficial como limitar trocas gasosas e desenvolvimento de raízes das culturas, afetando, conseqüentemente, o rendimento das mesmas (MODOLO *et al.*, 2008; LUCIANO *et al.*, 2012). Dessa forma, o conhecimento da compactação a partir da resistência do solo à penetração é de grande importância, pois visa a redução dos seus efeitos adversos e uso do solo de forma eficiente e sustentável (BERGAMIN *et al.*, 2010).

2.3.6 Curva característica de água no solo

A curva característica de água no solo tem sido uma importante ferramenta utilizada na descrição do comportamento físico-hídrico e na mecânica dos solos não saturados (LUCAS *et al.*, 2011). Assim, sua determinação adequada é de grande valia para estudos relacionados à qualidade dos solos, implementação e manejos de práticas destinadas ao cultivo agrícola (CÁSSARO *et al.*, 2008; MACHADO *et al.*, 2008).

A curva característica de água no solo representa a relação entre o potencial mátrico (geralmente apresentado em escala logarítmica) e a umidade do solo, à base de massa ou de volume correspondente (CHILDS, 1940). Portanto, a partir dela é possível quantificar o conteúdo de água que um solo pode reter dentro de determinados limites de potenciais pré-estabelecidos (URACH, 2007). 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).

Em potenciais mátricos mais elevados, a curva característica de água no solo é influenciada por poros estruturais associados ao efeito da matéria orgânica no processo de formação e na estabilidade estrutural do solo (RAWLS; GISH; BRAKENSIEK, 1991). Em potenciais mais baixos, a granulometria e a mineralogia do solo tornam-se mais importantes devido à superfície disponível para a adsorção de água (GUPTA; LARSON, 1979).

Alterações ocasionadas na estrutura do solo associadas à perda de estabilidade dos agregados e à compactação alteram diretamente a distribuição do tamanho dos poros, bem como a retenção, o movimento e disponibilidade de água, influenciando assim a curva característica de água no solo (MACHADO *et al.*, 2008).

2.3.7 Índice S

Dexter (2004) propôs um indicador para avaliação da qualidade física dos solos, denominado índice S, que por definição é a inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão da curva característica de água no solo. Em seu artigo, Dexter e Czyz (2007) estabeleceram limites dos valores de S com base em suas experiências práticas, podendo os solos ser classificados fisicamente como muito bons ($S \geq 0,050$); bons ($0,050 > S \geq 0,035$); ruins ($0,035 > S \geq 0,02$) e muito ruins ($S < 0,02$). O valor de S igual a 0,035 é definido como limite entre solos com condições favoráveis e solos com condições restritivas ao crescimento das raízes das plantas.

Maiores valores de S, que correspondem a uma maior inclinação, indicam melhor distribuição do tamanho de poros no solo e condições estruturais que favorecem um adequado funcionamento físico do solo. Alguns fatores que são relacionados com o solo (textura) e com o manejo (matéria orgânica e estrutura) influenciam na distribuição do tamanho de poros, ocasionando mudanças nos valores de S e, conseqüentemente, na qualidade física do solo (DEXTER, 2004).

A porosidade microestrutural (poros estruturais) influencia principalmente a declividade S da reta tangente à curva característica de água no solo no ponto de inflexão e, deste modo, o índice S está associado diretamente a muitos dos principais atributos físicos do solo (ANDRADE; STONE, 2009).

O índice S é sensível à degradação da qualidade física do solo, sendo possível, por meio da sua interpretação, identificar a degradação nos diferentes sistemas de uso do solo (MAIA, 2011). No entanto, Freire (2012) destaca a existência de limitações no índice S, quando é utilizado como indicador para distinguir os efeitos dos sistemas de manejo de solos que pertencem à classe de textura arenosa, por exemplo. O autor não menciona quais são as limitações existentes, porém tem-se observado que solos arenosos apresentam valores de S elevados, o que os classifica como de muito boa qualidade física. Vale ressaltar que nem sempre tais solos podem ser classificados como bons fisicamente, tendo em vista que eles apresentam, por exemplo, baixa retenção e armazenagem de água.

2.3.8 Índice $S_{relativo}$

Um novo índice de qualidade física do solo, com base no S proposto por Dexter (2004), foi apresentado por Freire (2012). Foi definido pela razão entre o valor do S obtido com a curva característica de água no solo para um determinado manejo considerado e o S utilizado

como referência. O autor descreveu a obtenção do S de referência a partir da curva característica de água no solo construída utilizando-se amostra com estrutura deformada, na condição de terra fina seca ao ar (TFSA), com o objetivo de simular uma situação em que apenas o arranjo das partículas em função da textura do solo influencia a retenção de água.

O efeito da porosidade estrutural na curva característica de água é mensurado quando se utiliza o índice S_{relativo} , uma vez que este considera um estado de referência padrão, no caso uma curva construída apenas com poros texturais. Neste caso, um maior valor de S_{relativo} entre sistemas avaliados corresponde a uma melhor qualidade física do solo. De acordo com Freire (2012), valores de S_{relativo} acima e abaixo da unidade indicam, respectivamente, melhora e piora da estrutura do solo em relação à situação utilizada como referência, e valor de S_{relativo} igual à unidade indica que não ocorreram alterações na estrutura do solo em relação à situação de referência.

Os resultados apresentados por Freire (2012) e Alves (2013) tornaram evidentes que o índice S_{relativo} apresenta sensibilidade, tanto para distinguir sistemas de manejo do solo, como para distinguir camadas de solo para mesmo sistema de manejo. Dessa forma, este índice pode ser utilizado como fonte para interpretação da resposta do solo às ações sobre a sua estrutura.

2.3.9 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar e continuidade de poros

A permissividade oferecida à passagem do ar através de uma massa de solo é definida como permeabilidade intrínseca do solo ao ar (KIRKHAM, 1946). É um dos atributos físicos que governam o fluxo de gases no solo, sendo influenciado pelo efeito da estrutura, particularmente em relação ao tamanho e continuidade dos macroporos e fortemente pelo conteúdo de água no solo (RODRIGUES, 2009; SILVA *et al.*, 2009). Quando o solo está seco, a permeabilidade alcança o seu valor máximo, e decresce à medida que ocorre o umedecimento até atingir um valor zero quando o solo está na saturação ou próximo dela.

A quantificação da permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) é de fundamental importância para a caracterização do espaço poroso e identificação de mudanças ocasionadas na estrutura do solo, pois K_{ar} se mostra sensível aos efeitos oriundos de práticas de manejo (BLACKWELL *et al.*, 1990; FISH; KOPPI, 1994; CAVALIERI *et al.*, 2009). Também se faz importante por possibilitar correlações com a condutividade hidráulica, que é uma propriedade do solo de difícil determinação (LOLL *et al.*, 1999). Para Mesquita e Moraes (2004), a

permeabilidade é dependente de alguns atributos do solo, principalmente da densidade, porosidade, macro e microporosidade.

De acordo com Resurreccion *et al.* (2007), o conhecimento da permeabilidade do solo ao ar implica resposta com maior exatidão e confiança do comportamento dos gases no solo, em especial do O₂, quando comparado ao uso de um valor constante de porosidade de aeração. McQueen e Shepherd (2002) sugerem limite crítico para a permeabilidade do solo ao ar ($K_{ar} = 10^{-12} \text{ m}^2$).

A continuidade de poros é definida como a razão entre a permeabilidade do solo ao ar e a porosidade de aeração (BALL *et al.*, 1994), sendo um parâmetro de fundamental importância para a funcionalidade do sistema poroso do solo, por indicar a respeito da conexão dos poros. É quantificada por meio de índices que estimam a quantidade de poros que participam efetivamente nos processos de fluxos, e que, portanto, podem atuar como indicadores da movimentação tridimensional da água e do ar (SILVEIRA JUNIOR *et al.*, 2012). A continuidade de poros é afetada de forma direta pelo processo de compactação, o que reflete valores mais baixos dos índices (LIPIEC; GLINSKI, 1997; MUNKHOLM; SCHJØNNING; KAY, 2002).

2.4 Dispersão de solos

O processo de dispersão tem por finalidade realizar a separação das partículas que estão reunidas nos agregados em partículas individuais (areia, silte e argila) por meio de processos químicos e físicos. A dispersão química depende diretamente do pH do meio, pois este tem grande importância na dispersão das argilas que apresentam cargas dependentes do pH (MAURI *et al.*, 2011).

A elevação do pH do meio, sendo superior ao ponto de carga zero (PCZ) do solo, facilita o processo de dispersão, pois, nessas condições, a proporção de cargas negativas dependentes do pH é elevada e, dessa forma, intensifica-se a repulsão entre as partículas do solo (MAURI *et al.*, 2011).

A utilização de um determinado agente dispersante é importante em estudos relacionados à separação de partículas, já que ele possibilita a desagregação e, conseqüentemente, uma distribuição quantitativa mais eficiente (TOTOU *et al.*, 2011). De acordo com Baver (1956), alguns elementos químicos são conhecidos e classificados na seguinte ordem de eficiência como dispersantes: Li > Na > K > Rb > Cs. Conforme Rodrigues (2008), embora o sódio esteja em segundo lugar na escala de eficiência de dispersão, os

compostos mais utilizados são os que contêm este elemento, devido à sua facilidade de oferta no mercado e baixo custo.

Para Totou *et al.* (2011), a utilização do hidróxido de sódio (NaOH) é uma forma simples para conseguir um alto grau de dispersão das partículas, tendo em vista que este atua no aumento da repulsão eletrostática entre as partículas. A utilização do hidróxido de sódio 1 N como dispersor de solos parte do princípio da substituição dos cátions divalentes (íons floclulantes) por íons Na^+ , ocasionando, assim, uma elevação do potencial eletrocinético (RODRIGUES, 2008). No processo da dispersão, segundo Kirkham e Powers (1972), a espessura da dupla camada eletrostática é conduzida de acordo com o raio iônico hidratado e a valência do cátion adsorvido. Portanto, a saturação pelo íon Na^+ no complexo de troca propicia um ambiente de dispersão já que este íon possui um grande raio iônico hidratado e baixa valência.

O sódio atua no solo ocasionando hidratação dos agregados instáveis, expansão e/ou dispersão nas partículas de argila. Portanto, o aumento do conteúdo de sódio no solo altera a capacidade de retenção de água como consequência da expansão e/ou dispersão das partículas de argilas que resultam na redução no diâmetro dos poros (CRESCIMANNO; LOVINO; PROVENZANO, 1995). Estes autores obtiveram resultados que confirmam que o sódio tem influência nas características hidráulicas e estabilidade de agregados. Além disso, observaram que pequenas adições de sódio resultam em dispersão do solo, propiciando o transporte das partículas menores que se acumulam nos poros de diâmetro maior e, com isso, reduzindo a condutividade hidráulica do solo.

Diante disso, Dexter (2004) faz um alerta para interpretação de dados correspondentes à retenção de água em solos com elevada quantidade de sódio. Segundo ele, a redução no teor de água com aumento da tensão pode não ser devida à drenagem dos poros, mas devida à dispersão do solo ocasionada pelo sódio, que reduz as áreas porosas. Vale ressaltar que, de acordo com Pires *et al.* (2011), os poros texturais são relativamente mais estáveis que os poros estruturais e, deste modo, são menos afetados pelo efeito do sódio no solo.

Não se pode desconsiderar o fato de o sódio apresentar a característica de higroscopicidade, isto é, ser um material com elevada capacidade de absorver água (BRODERSEN, 1992; CARVALHO; SOUSA; SOUSA, 2005), o que também pode influenciar, superestimando, o conteúdo de água para uma determinada tensão considerada.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Local do experimento

A área estudada está localizada na Chapada do Apodi, na Unidade de Ensino, Pesquisa e Extensão – UEPE, uma das unidades físicas do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFCE- Campus Limoeiro do Norte), situada no município de Limoeiro do Norte, estado do Ceará, a uma altitude de 145 m. A área experimental, cultivada com figo, tem em seu centro as coordenadas geográficas 5° 10' 57,64" S e 38° 0' 45,97" O. A mata secundária tomada como referência está localizada a 400 m da área cultivada. O solo da área experimental é um Cambissolo originado do calcário da Formação Jandaíra (BRASIL, 1973).

3.2 Caracterização da área experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido em um ambiente a campo aberto, com o cultivo de figo em ensaio com aplicação de biofertilizante. O experimento teve início em outubro de 2010. As mudas utilizadas no experimento foram produzidas pela empresa Figood, sendo originadas de estacas de plantas matrizes da variedade Roxo de Valinhos. As covas para plantio tiveram as dimensões de 0,4 m x 0,4 m x 0,4 m. Realizou-se uma adubação de fundação, aplicando-se 20 L de esterco curtido por cova. Para o plantio adotou-se espaçamento de 1,50 m x 1,50 m.

O biofertilizante aplicado no solo foi produzido por meio de processo anaeróbico, em recipiente plástico (volume de 200 L) hermeticamente fechado. Na tampa, foi adaptada uma mangueira com a outra extremidade mergulhada num recipiente com água na altura de 20 cm, para a saída de gases. A proporção utilizada para produção do biofertilizante foi de 50% (volume/volume = v/v) da fermentação do esterco bovino fresco e água, por um período de trinta dias.

As dosagens do biofertilizante foram formuladas com as seguintes proporções: T0, 0:5 – 0% de biofertilizante e 100% de água; T1, 1:4 – 20% de biofertilizante e 80% de água; T2, 2:3 – 40% de biofertilizante e 60% de água; T3, 3:2 – 60% de biofertilizante e 40% de água. A aplicação foi realizada inicialmente via fertirrigação por gotejamento e, depois, manualmente, com 3 litros por planta da solução constituída para cada tratamento, a cada 15 dias. De acordo com as concentrações acima, as proporções de água e biofertilizante para formar a solução a ser aplicada por planta foram as seguintes: T0 (sem biofertilizante e 3 L de água), T1 (0,6 L de

biofertilizante e 2,4 L de água), T2 (1,2 L de biofertilizante e 1,8 L de água) e T3 (1,8 L de biofertilizante e 1,2 L de água).

O biofertilizante foi aplicado ao solo no período de outubro de 2010 a agosto de 2012, totalizando 23 meses, 4 ciclos da cultura, 46 aplicações, e um total de 138 L da solução aplicados ao solo por planta. Amostras do biofertilizante foram analisadas no Laboratório de Solo, Água e Tecidos Vegetais (LABSAT) do IFCE, para caracterização química (Tabela 1).

Tabela 1 - Características químicas do biofertilizante puro e das doses estimadas, após diluído em água, nas diferentes concentrações.

Amostras	Macronutrientes						Micronutrientes					
	g L ⁻¹						mg L ⁻¹					
	N	P	K	Ca	Mg	S	Fe	Zn	Cu	Mn	B	Na
Puro (100%)	0,78	0,73	1,19	0,59	0,28	0,21	73,04	5,88	2,04	9,32	1,62	175
20%	0,16	0,15	0,25	0,12	0,06	0,06	14,60	1,17	0,40	1,86	0,32	35
40%	0,31	0,29	0,49	0,24	0,11	0,08	29,21	2,35	0,82	3,72	0,48	70
60%	0,47	0,44	0,68	0,35	0,17	0,13	43,82	3,52	1,22	5,59	0,97	105
	C.E. (dS m ⁻¹)			C (%)			C/N			pH		
Puro (100%)	7,05			1,08			13,8			7,78		
20%	1,41			0,216			13,5			8,05		
40%	2,82			0,432			13,9			8,29		
60%	4,23			0,648			13,8			8,14		

Fonte: Silva (2012).

Nos dois meses iniciais do experimento o biofertilizante foi aplicado via sistema de irrigação localizada por gotejamento. O sistema foi projetado para operar com duas linhas de emissores por fileira de planta, constituindo um total de 4 emissores por planta, com vazão média por emissor de 4 L h⁻¹. Vale salientar que no dia da aplicação o sistema de irrigação era utilizado exclusivamente com o biofertilizante, evitando assim diluição do produto. Entretanto, foi identificado entupimento de alguns gotejadores, o que resultaria em desuniformidade de aplicação; diante disto, optou-se por realizar a aplicação de forma manual. Neste modo de aplicação, o biofertilizante era depositado em um balde de 3 L e, então, distribuído em torno da planta, correspondendo a uma lâmina de 1,33 mm do produto por área explorada pela planta, no período de 15 dias, e total de 61 mm por área explorada pela planta em todo o período do experimento.

3.3 Amostragem

Para fins de avaliação da qualidade física do solo foram coletadas amostras com estruturas preservada e não preservada, em duas condições de manejo (solo sob plantio de figo

com aplicação de doses de biofertilizante e solo sob mata secundária), nas camadas de 0,0-0,1, 0,1-0,2 e 0,2-0,3 m, selecionadas de modo a abranger todo o volume de solo explorado pelo sistema radicular efetivo da cultura do figo. As coletas foram feitas em quatro repetições. Com objetivo de abranger a maior amplitude possível de densidade do solo, foram coletadas mais 5 amostras com estrutura do solo preservada, na camada de 0,0-0,1 m, nos locais onde passam os rodados de máquinas e de intenso pisoteio humano, todas no entorno da área experimental cultivada com figo.

As amostras com estrutura preservada foram coletadas em anéis de aço, com dimensões de 0,05 m de altura por 0,05 m de diâmetro. Após a coleta, as amostras foram identificadas e acondicionadas para manutenção da sua integridade física durante o transporte, e encaminhadas ao laboratório de Física do Solo da Universidade Federal do Ceará - UFC, para realização das análises físicas, cujos procedimentos são os que seguem.

3.4 Atributos avaliados

3.4.1 Densidade do solo

Determinada a partir de amostras com estrutura preservada, coletadas em cilindros de volume conhecido, e secas a 105°C até massa constante (BLAKE; HARTGE, 1986b).

3.4.2 Densidade das partículas

Determinada pelo método do balão volumétrico, cujo princípio é determinar o volume de álcool utilizado para completar um balão volumétrico de 50 mL que contenha 20 g de terra fina seca em estufa (TFSE) (BLAKE; HARTGE, 1986a).

3.4.3 Granulometria

Realizada pelo método da pipeta (GEE; BAUDER, 1986). O hidróxido de sódio (NaOH) 1 N foi utilizado para a dispersão química das partículas. O silte e a argila foram separados via sedimentação, conforme a Lei de Stokes, e areia por tamização úmida.

3.4.4 Argila dispersa em água

Seguiu o mesmo procedimento adotado na análise granulométrica, distinguindo-se daquele apenas por não utilizar o dispersante químico.

3.4.5 Grau de Floculação

Foi calculado a partir da argila total determinada na análise granulométrica e da argila dispersa em água, segundo a equação (1)

$$GF (\%) = \frac{\text{argila total} - \text{argila dispersa em água}}{\text{argila total}} * 100 \quad (1)$$

3.4.6 Carbono orgânico

Determinado a partir da oxidação da matéria orgânica via úmida com dicromato de potássio, em presença de H₂SO₄ e aquecimento externo, titulando-se o excesso de dicromato com sulfato ferroso amoniacal (YEOMANS; BREMNER, 1988).

3.4.7 Porosidade

Foi obtida a partir da densidade do solo e de partículas, de acordo com a equação (2)

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho_s}{\rho_p} \right), \quad (2)$$

sendo α a porosidade (m³ m⁻³) e ρ_p e ρ_s as densidades de partículas e do solo (kg m⁻³), respectivamente. A determinação da microporosidade (poros com diâmetro < 50 µm) foi realizada mediante a aplicação de tensão de 6 kPa no funil Haines, até que a água que ocupasse os poros com diâmetro igual ou superior a 50 µm fosse drenada (DANIELSON; SUTHERLAND, 1986). A macroporosidade foi obtida por diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

3.4.8 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar

Determinada segundo o 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 indeformada, equilibrada nas tensões de 2, 6, 10, 33 e 100 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, utilizando 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 do ar atmosférico (Pa) e S o coeficiente angular da regressão linear da pressão (ln da pressão) em função do tempo.

3.4.9 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, de um modo análogo ao de Ahuja *et al.* (1984), conforme a equação (4)

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

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 na equação (5)

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

A partir da regressão linear da relação de $\log \varepsilon_{ar}$ versus $\log K_{ar}$, os valores de M e N são, 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 , que corresponde ao valor de ε_{ar} abaixo do qual o fluxo de ar através do solo cessa devido à descontinuidade na rede de poros de aeração. Partindo da equação (4), ε_b é expressa pela equação (6)

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

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

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

3.4.10 Resistência do solo à penetração

Determinada em amostras com estrutura indeformada, com teor de água correspondente a uma tensão de 10 kPa (SILVA; KAY; PERFECT, 1994). Para tanto, se utilizou um penetrômetro eletrônico estático de laboratório, equipado com atuador linear de célula de carga de 20 kgf, haste com cone de 0,4 cm de diâmetro de base e ângulo de 60° e área de 12,566 mm², com velocidade de penetração de 1 cm min⁻¹, registro de uma leitura por segundo, acoplado a um microcomputador para aquisição dos dados por software próprio do equipamento, conforme descrito por Tormena, Silva e Libardi (1998). O procedimento compreendeu três repetições por amostra, sendo 180 leituras por repetição, totalizando 540 leituras em cada amostra (é importante ressaltar que o primeiro e o último centímetro da amostra de solo foram desconsiderados) A resistência à penetração foi representada pela média das 540 leituras.

3.4.11 Estabilidade de agregados

Determinada seguindo o método por via úmida para mensurar a quantidade e distribuição do tamanho dos agregados que são estáveis em água, e relacioná-los com os que não se desintegram mediante o processo de tamisação (KEMPER; ROSENAU, 1986). A tamisação das amostras foi realizada por meio de um oscilador elétrico vertical, contendo dois conjuntos de peneiras com as respectivas malhas de abertura 2,0, 1,0, 0,5 e 0,25 mm. A massa de agregados em cada peneira foi expressa em cinco classes de diâmetro (4,76-2,00 mm, 2,00-1,00 mm, 1,00-0,50 mm e 0,50-0,25 mm), com objetivo de estimar o diâmetro médio ponderado (DMP), de acordo com a equação (8)

$$\% \text{ de agregados estáveis por classe} = \left(\frac{M_a - M_p}{M_s - M_w - \sum M_p} \right) \cdot 100, \quad (8)$$

em que, M_a corresponde a massa de agregados aparentes na classe, M_p a massa de partículas primárias na classe, M_s a massa da amostra original antes da tamisação e M_w a massa de água na amostra original.

O diâmetro médio ponderado (DMP), considerado um índice de agregação do solo (Van Bavel, 1949), foi determinado pelo somatório da proporção em massa W_i de um determinado tamanho da fração de agregados multiplicada pelo diâmetro médio X_i dessa fração.

3.4.12 Curva característica de água no solo

Determinada nas amostras com estrutura deformada e indeformada, para, a partir delas serem obtidos os índices S e S_{relativo} , respectivamente. No procedimento, o conteúdo de água na saturação foi considerado igual à porosidade do solo; para os pontos de baixa tensões (0, 2, 4, 6, 8 e 10 kPa) o funil de Haines foi utilizado para a estabelecer o equilíbrio entre a tensão aplicada e o conteúdo de água no solo; para os demais pontos (33, 100, 700 e 1500 kPa), o equilíbrio foi obtido em extrator de placa porosa de Richards (KLUTE, 1986). Obtidos os valores de umidade do solo em todos os pontos de tensão, foi feito o ajuste dos dados de acordo com o modelo matemático proposto por Van Genuchten (1980), a partir da equação (9)

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha|\phi_m|)^n]^m}, \quad (9)$$

em que θ corresponde ao conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), θ_r e θ_s são, respectivamente, os teores de água residual e de saturação ($\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$), ϕ_m o potencial mátrico da água no solo (kPa), α um escalonador do ϕ_m ; m e n são parâmetros de ajuste do modelo relacionados ao formato da curva. Os dados foram ajustados com o auxílio do programa Table Curve 2D, versão 5.01 (Versão Trial, 2014), sendo as variáveis θ_s e θ_r fixadas com valores, respectivamente, de conteúdo de água no solo correspondente à saturação e tensão de 1500 kPa, ambos mensurados em laboratório. O ajuste dos parâmetros α , m e n seguiu o método iterativo de Newton-Raphson, sem dependência do parâmetro m com o n (DOURADO NETO *et al.*, 2001).

Para a obtenção da curva de frequência acumulada de poros, relacionou-se o logaritmo da tensão com o quociente entre a umidade base volume e porosidade total. A curva diferencial da curva característica de água no solo (θ em função de ψ_m), cujo pico está relacionado aos poros mais frequentes, foi obtida a partir de $-1/\alpha (d\theta/d\psi_m)$ (kPa^{-1}).

3.4.13 Índice S

Segundo Dexter e Czyz (2007), é possível escrever o conteúdo de água gravimétrico (u) como uma função do potencial mátrico a partir da equação de van Genuchten, como sendo

$$u = (u_{sat} - u_{res}) [1 + (\alpha h)^n]^m + u_{res}. \quad (10)$$

O cálculo do S pode ser simplificado por meio de manipulações matemáticas da equação 10. Inicialmente, deve-se derivar duas vezes essa equação em relação ao logaritmo da tensão ($\ln h$) e, igualando-a a zero, obtém-se assim o módulo do potencial de água (h_i) no ponto de inflexão de acordo com a equação (11)

$$h_i = \frac{1}{\alpha} \left[\frac{1}{m} \right]^{\frac{1}{n}}. \quad (11)$$

Assim, a inclinação no ponto de inflexão (índice S) é calculada em termos dos parâmetros da equação de van Genuchten como sendo

$$S = -n(u_{sat} - u_{res}) \left[1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \quad (12)$$

3.4.14 Índice $S_{relativo}$

Foi obtido a partir da razão entre o valor do S obtido com a curva característica de água no solo para o manejo considerado e o S da curva de referência. O S utilizado como referência foi obtido por meio da curva característica de água para o solo da mata nativa secundária, construída com amostra de solo com estrutura deformada, tomando-se uma amostra de terra fina seca ao ar (TFSA), acondicionada em anéis com dimensões de 0,05 m de altura x 0,05 m de diâmetro, cuja disposição foi feita de modo que as partículas se arranjassem normalmente sem a necessidade de pré-estabelecer um valor de densidade (FREIRE, 2012).

Quanto ao refinamento do $S_{relativo}$, o propósito foi obter o valor de S de referência a partir da curva característica de água construída com solo com estrutura deformada o mais próximo da porosidade textural, visto que a percepção a partir dos trabalhos de Freire (2012) e Alves (2013) é de que a curva construída a partir de TFSA ainda contém parte de sua porosidade associada à microestrutura. No processo de refinamento, o $S_{relativo}$ foi obtido seguindo o mesmo procedimento de acomodação do solo em anéis. A diferença é que o material testado foi disperso em água e com adição de hidróxido de sódio 1 N (com e sem lavagem posterior para a remoção de sais, particularmente do sódio). A dispersão foi realizada seguindo o método da pipeta estabelecido por Gee e Bauder (1986). Como dito, o objetivo da dispersão foi tornar o arranjo das partículas do solo dependente apenas da porosidade textural. Após realizar o processo de dispersão química e física, as amostras contendo areia, silte e argila em solução foram encaminhadas à estufa a 45 °C até massa constante.

Após secagem em estufa, o material foi analisado estatisticamente quanto à distribuição das frações por tamanho. Para fins de comparação, foram tomados 20 g de TFSA, 20 g de material disperso em água e 20 g de material disperso com adição de hidróxido de sódio 1 N (com e sem lavagem posterior). Cada material foi peneirado passando por um conjunto de cinco peneiras (1 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,105 mm, 0,053 mm), perfazendo seis classes de tamanho (≤ 2 mm a >1 mm; ≤ 1 mm a $>0,5$ mm; $\leq 0,5$ mm a $>0,25$ mm; $\leq 0,25$ mm a $>0,105$ mm; $\leq 0,105$ mm a $>0,053$ mm; $\leq 0,053$ mm). Os dados da distribuição granulométrica foram tratados

estatisticamente por meio do programa de microcomputador PHI, desenvolvido por Jong van Lier e Vidal-Torrado (1992), o qual utiliza os parâmetros estatísticos de Folk e Ward (1957), para estabelecer comparações entre as classes de tamanho de partículas do solo, presentes na amostra que foi utilizada para construção da curva-padrão característica de água no solo. No programa PHI, os dados de entrada correspondem às porcentagens absolutas de cada fração granulométrica na amostra e seu respectivo diâmetro na escala phi [$\phi = -\log_2 D$ (mm)]. Com a transformação dos diâmetros das classes em mm para escala phi, tem-se que ϕ de ≤ 2 a > 1 mm = ϕ de ≤ -1 a > 0 ; ϕ de ≤ 1 a $> 0,5$ mm = ϕ de ≤ 0 a > 1 ; ϕ de $\leq 0,5$ a $> 0,25$ mm = ϕ de ≤ 1 a > 2 ; ϕ de $\leq 0,25$ a $> 0,105$ mm = ϕ de ≤ 2 a $> 3,32$; ϕ de $\leq 0,105$ a $> 0,053$ mm = ϕ de $\leq 3,32$ a $> 4,32$; ϕ de $\leq 0,053$ mm = ϕ de $\leq 4,32$. Posteriormente à dispersão e análise de distribuição das frações por diâmetro, o material foi utilizado para a construção da curva característica de água no solo e, a partir desta, obtido o valor do índice S. Como descrito em Freire (2012), o S_{relativo} foi obtido pela equação (13)

$$S_{\text{relativo}} = \frac{S_{\text{estrutura não deformada}}}{S_{\text{estrutura deformada}}}, \quad (13)$$

lembrando que os valores de S, em ambas as formas de estrutura do solo, derivam matematicamente da equação (9), mas substituindo-se a umidade à base de volume por umidade gravimétrica.

3.5 Análise dos dados

Os dados experimentais foram analisados em delineamento inteiramente casualizado com cinco situações de solo (sob cultivo de figo com aplicação de 20%, 40% e 60% do biofertilizante na lâmina de irrigação; uma testemunha sem aplicação do biofertilizante; e um tratamento adicional – solo com mata). Foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov a 5% de probabilidade para verificar a normalidade dos dados.

Como o experimento continha duas testemunhas, uma como referência à aplicação de biofertilizante, e outra como referência ao cultivo do solo, foi realizada a análise de variância por meio do teste F, com a comparação entre as médias dos demais tratamentos em relação à situação de solo sob mata secundária pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade, considerando a configuração de cinco tratamentos e quatro repetições. As análises estatísticas referentes aos

atributos avaliados encontram-se nos apêndices A-AE. Os dados de densidade do solo e porosidade total que foram obtidos com as cinco amostras coletadas na camada de 0-0,1 m, além daquelas pertinentes aos tratamentos, foram considerados em conjunto com os obtidos também na mesma camada considerando os tratamentos, totalizando, portanto, dados de 25 amostras. Foram descartados sete dados deste conjunto. Em seguida, foram realizadas análises de regressão e correlação entre o índice S_{relativo} (variável dependente) – obtido por TFSA, com dispersão em água e com adição de hidróxido de sódio 1N (com e sem lavagem) – e cada um de ambos os atributos supracitados (variável independente). Às retas obtidas aplicou-se o teste t de Student ao nível de significância de 20% para verificar a inclinação e o intercepto. Utilizou-se o programa Microsoft Excel[®] para o processamento dos dados.

Foram aplicadas técnicas multivariadas de análise de dados, com a finalidade de evidenciar a interação entre os atributos físicos do solo de forma simultânea. Os atributos considerados foram: areia, silte, argila, densidade do solo, porosidade total, macroporosidade, microporosidade, índice S, índice S_{relativo} , permeabilidade intrínseca do solo ao ar, índices N e K_1 (de continuidade de poros) nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m e 0,0- 0,3 m em todas as situações de solo. O conjunto de dados, com distribuição normal, foi padronizado ($\mu = 0$; $\sigma^2 = 1$) para se dar o mesmo peso a cada variável. Após este procedimento, utilizou-se a técnica de análise dos componentes principais (ACP) e a análise de agrupamentos (AA), utilizando o software XLSTAT, versão gratuita (XLSTAT, 2014).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Textura do solo e grau de flocculação das argilas

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados da composição granulométrica dos solos em estudo e sua classificação textural por profundidades. Constatou-se que a textura é franco-arenosa na profundidade de 0,0-0,1 m e franco-argilo-arenosa nas demais profundidades para todos os tratamentos analisados. Estes fatos estão associados tanto ao incremento de argila como à redução no teor de areia em profundidade, resultando em distinções na classe textural. Comportamentos semelhantes foram observados por Mota *et al.* (2008, 2013, 2014) analisando atributos físicos também em um Cambissolo na Chapada do Apodi.

Os tratamentos que utilizaram sistema de irrigação apresentaram maiores quantidades de argila natural quando comparados à mata nativa, corroborando os resultados encontrados por Dantas *et al.* (2012) e Mota *et al.* (2014), indicando haver uma forte influência da água de irrigação – provavelmente rica em sódio – na dispersão de coloides do solo.

Tabela 2 - Características físicas do solo (granulometria, argila natural e classe textural).

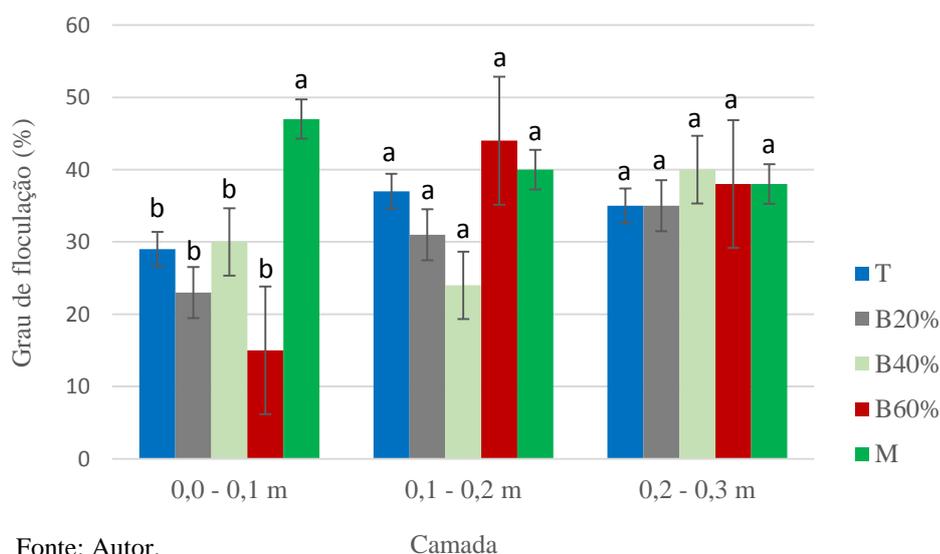
Sistemas de uso e manejo	Camada m	Granulometria			Argila natural	Classe textural
		Areia	Silte	Argila		
Testemunha	0,0 – 0,1	539	269	192	131	Franco-arenosa
	0,1 – 0,2	518	252	230	145	Franco-argilo-arenosa
	0,2 – 0,3	466	254	280	184	Franco-argilo-arenosa
Biofertilizante (20%)	0,0 – 0,1	517	288	195	126	Franco-arenosa
	0,1 – 0,2	508	265	227	163	Franco-argilo-arenosa
	0,2 – 0,3	460	271	269	187	Franco-argilo-arenosa
Biofertilizante (40%)	0,0 – 0,1	525	281	194	143	Franco-arenosa
	0,1 – 0,2	495	264	241	156	Franco-argilo-arenosa
	0,2 – 0,3	475	250	275	188	Franco-argilo-arenosa
Biofertilizante (60%)	0,0 – 0,1	542	261	197	158	Franco-arenosa
	0,1 – 0,2	488	244	268	152	Franco-argilo-arenosa
	0,2 – 0,3	460	257	283	193	Franco-argilo-arenosa
Mata	0,0 – 0,1	748	156	96	50	Franco-arenosa
	0,1 – 0,2	625	154	221	132	Franco-argilo-arenosa
	0,2 – 0,3	507	168	325	186	Franco-argilo-arenosa

Fonte: Autor.

No que se refere ao grau de flocculação das argilas (Gráfico 1), houve diferença estatística significativa entre os tratamentos sob cultivo e a testemunha da mata nativa para a

camada de 0,0-0,1 m, esta apresentando maior grau de floculação quando comparada aos demais tratamentos, seguramente em decorrência do conteúdo de material orgânico encontrado nesta camada e do não revolvimento do solo. Todos os valores observados indicam elevado grau de dispersão, ou seja, muita da argila do solo é facilmente mobilizada quando em contato com água, o que resulta na maioria dos casos em obstrução dos poros com conseqüente diminuição na permeabilidade à água e ao ar. Resultados semelhantes foram constatados por Mota (2010), também na Chapada do Apodi, que associou a redução da condutividade hidráulica do solo saturado com a elevada quantidade de argila dispersa em água. Vale destacar que em todos os tratamentos, com exclusão da testemunha, houve aporte de material orgânico via aplicação do biofertilizante, além da vegetação espontânea, fatores que concorrem para a floculação das argilas. Contudo, possíveis valores elevados do íon Na^+ , que atua na dispersão dos coloides do solo, oriundos do biofertilizante (Tabela 1), da água de irrigação e do próprio solo, explicam parte dos baixos valores de argila floculada. É importante salientar a natureza mineral das argilas dos Cambissolos da Chapada do Apodi, predominantemente caulíníticas (MOTA et al., 2008), portanto do tipo 1:1, com menos cargas de superfície, o que as predispõe facilmente à dispersão.

Gráfico 1 - Grau de floculação, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.



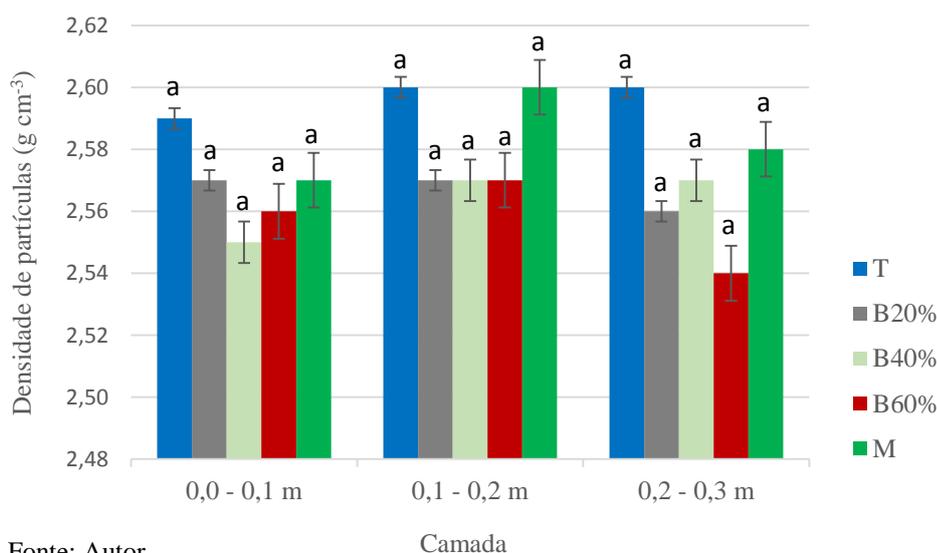
Fonte: Autor.

Camada

4.2 Densidade de partículas e do solo

A análise estatística referente à densidade de partículas não apresentou diferença significativa entre os tratamentos sob cultivo e a situação de mata nativa em nenhuma camada analisada (Gráfico 2). Este resultado é devido ao fato de a densidade de partículas ser um atributo com pouca variação no espaço e no tempo (FERREIRA, 2010), e depender da natureza mineralógica do solo em estudo (RÜHLMANN *et al.*, 2006). Resultados semelhantes foram encontrados por Mota *et al.* (2014), estudando qualidade física do solo sob cultivo de abacaxi irrigado na Chapada do Apodi. É importante destacar que os valores dos tratamentos encontram-se abaixo do que é frequentemente utilizado para representar todos os solos minerais, $2,65 \text{ g cm}^{-3}$, considerando que na maioria dos solos de regiões tropicais o quartzo predomina em relação aos outros minerais (SKOOP, 2002). Dessa forma, existem partículas no solo em estudo, inclusive de natureza orgânica, menos densas que o mineral quartzo, que estão contribuindo para a diminuição do valor de densidade de partículas para abaixo de $2,65 \text{ g cm}^{-3}$.

Gráfico 2 - Densidade de partículas, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.



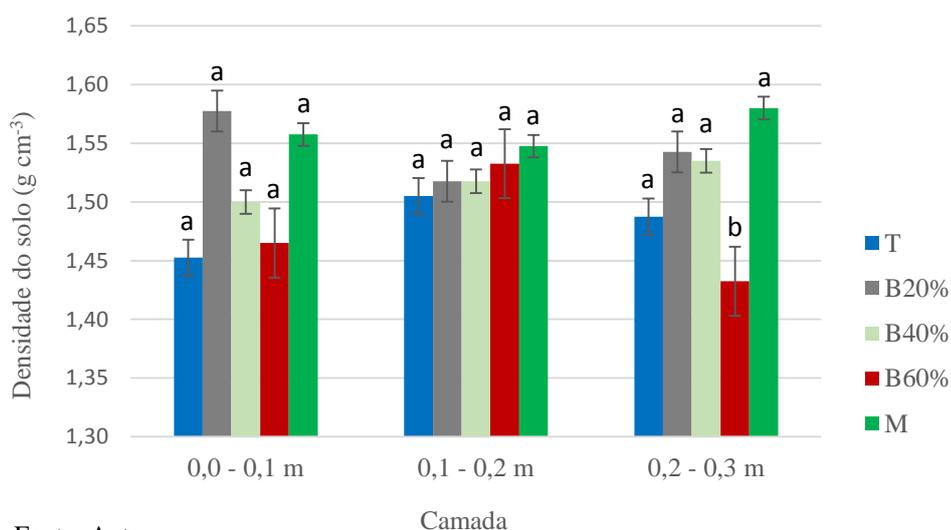
Fonte: Autor.

No que se refere à densidade do solo, Gráfico 3, os valores para todos os sistemas avaliados sob cultivo nas camadas superficiais (0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m) não apresentaram diferença significativa em comparação à situação de solo sob mata nativa, de forma semelhante

aos resultados encontrados por Nogueira (2009), estudando influência da aplicação de biofertilizante em propriedades físicas de um Cambissolo na Chapada do Apodi. Ao se comparar os sistemas na camada de 0,2-0,3m, a aplicação de biofertilizante 60% possibilitou menor valor de densidade do solo em relação à mata. A justificativa para este resultado é de que houve maior desenvolvimento das raízes de figo nessa profundidade, pois, conforme Silva (2012), neste mesmo experimento, quando da aplicação de biofertilizante 60% houve melhor adequação nutricional à planta, com melhor desenvolvimento foliar e consequente aumento de produtividade. Para Correchel, Silva e Tormena (1999), maior volume de raízes contribui para melhorar a condição estrutural do solo com consequente redução de sua densidade.

Os valores de densidade do solo para área em estudo variaram entre $1,43 \text{ g cm}^{-3}$ e $1,58 \text{ g cm}^{-3}$ em todas as profundidades analisadas, acima do valor ideal estabelecido por USDA (1999) para as texturas encontradas – menor que $1,40 \text{ g cm}^{-3}$. Porém, os valores obtidos não ultrapassam o valor de densidade do solo que restringe o crescimento das raízes das culturas, cujo valor é acima de $1,75 \text{ g cm}^{-3}$ para a situação em análise. Resultados semelhantes foram encontrados por Mota *et al.* (2008), Mota (2010), Freire (2012) e Mota *et al.* (2014), em estudos de Cambissolos na mesma região.

Gráfico 3 - Densidade do solo, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.



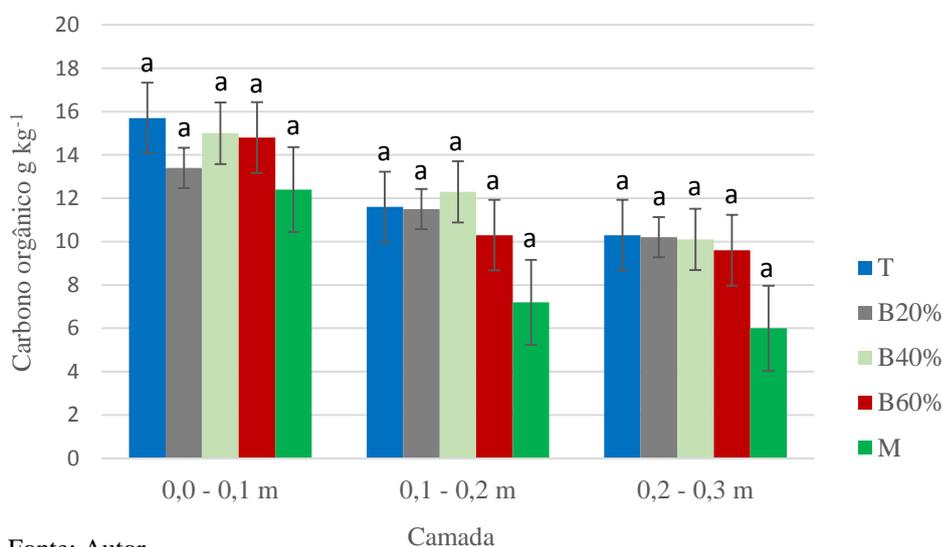
Fonte: Autor.

4.3 Carbono orgânico

Quanto ao teor de carbono orgânico no solo, Gráfico 4, os sistemas com e sem aplicação do biofertilizante não diferiram estatisticamente da mata nativa, pelo fato de o

biofertilizante aplicado ter baixa quantidade de carbono na sua composição (Tabela 1), devido às perdas por digestão e na liberação de CO_2 e CH_4 no processo de biodigestão (MEDEIROS; LOPES, 2006). Outra causa para o resultados não diferirem estatisticamente está relacionada com a baixa relação C:N do biofertilizante (Tabela 1), que favorece a rápida mineralização da matéria orgânica adicionada ao solo (CAS, 2009); no sistema com mata nativa, as condições ambientais do semiárido não favorecem um grande aporte de biomassa vegetal ao solo (MOTA, 2010). Resultados encontrados por Nogueira (2009) corroboram os aqui observados.

Gráfico 4 - Teores de carbono orgânico, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.



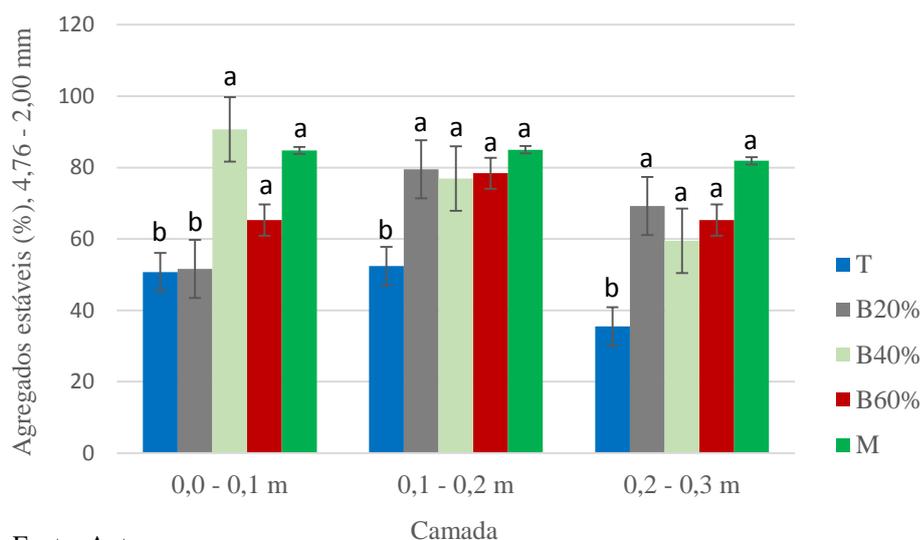
Fonte: Autor.

4.4. Agregados do solo

No tocante à agregação do solo, verifica-se que na camada de 0,0-0,1 m os solos sob aplicação das maiores doses do biofertilizante (40% e 60%) e mata nativa têm maior estabilidade de agregados de tamanho entre 2,00 e 4,76 mm, quando comparados aos sistemas sem aplicação do biofertilizante e com aplicação na dosagem correspondente a 20% (Gráfico 5). O biofertilizante 20%, por possuir uma menor quantidade de material orgânico em sua composição, quando associado com a textura franco-arenosa na camada de 0,0-0,1 m (Tabela 2) não evidenciou ação pronunciada na agregação do solo. No que tange as camadas de 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m, foi perceptível a ação do biofertilizante na agregação em todas as doses analisadas, devido a maior interação com a fração argilosa pela provável ação de óxidos de

ferro. Com relação aos óxidos de ferro, Mota et al. (2008) classificaram um Cambissolo da Chapada do Apodi como mesoférrico.

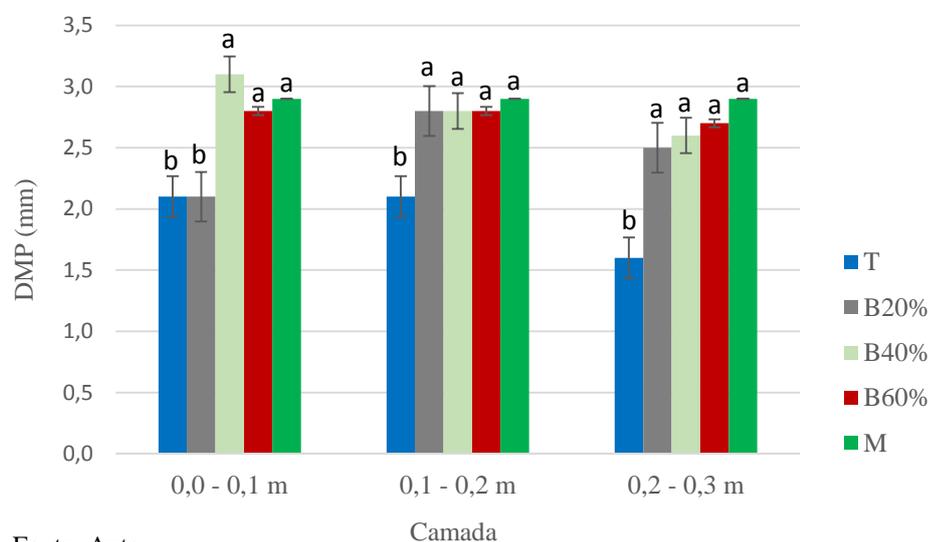
Gráfico 5 - Estabilidade de agregados (4,76-2,00 mm) em água, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.



Fonte: Autor.

Em se tratando de diâmetro médio ponderado (DMP), Gráfico 6, observam-se resultados semelhantes aos da estabilidade de agregados quando se avalia a ação dos sistemas de uso e manejo impostos ao solo, uma vez que o DMP é um atributo dependente dos agregados estáveis por classe. Os valores de DMP encontrados estão acima de 0,5 mm, o que, de acordo com Kiehl (1979), é considerado o limite de tamanho de agregado mais resistente ao esboroamento e dispersão. De forma geral, a aplicação do biofertilizante influenciou positivamente o aumento do tamanho dos agregados. A justificativa para o resultado é que com o aumento da concentração do biofertilizante aplicado ao solo houve ganho de biomassa vegetal e maior crescimento das raízes do figo (SILVA, 2012). De acordo com Castro Filho et al. (1998), Silva et al. (1998) e Palmeira et al. (1999), maior concentração de raízes no solo atua acelerando o processo de agregação por meio da liberação de exsudatos orgânicos e pela pressão exercida durante seu crescimento atuando na aproximação das partículas minerais.

Gráfico 6 - Diâmetro médio ponderado, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.



Fonte: Autor.

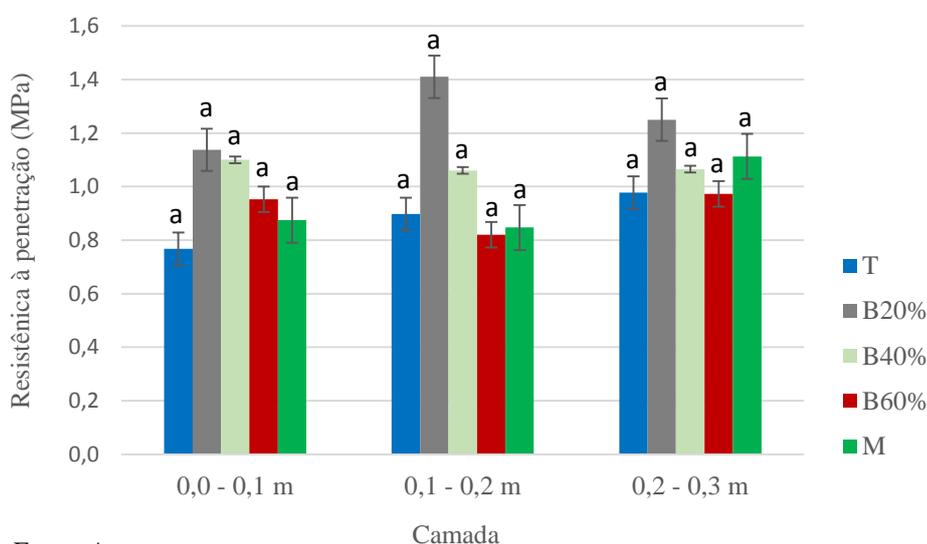
4.5 Resistência do solo à penetração

De acordo com o Gráfico 7, os valores de resistência à penetração na umidade correspondente à capacidade de campo não diferiram estatisticamente entre os sistemas cultivados nas diferentes profundidades e a mata nativa. A aplicação do biofertilizante não produziu efeitos sobre a resistência à penetração, o que também foi encontrado por Dias *et al.* (2011) ao estudarem a resistência à penetração de um solo de textura arenosa tratado com biofertilizante bovino. Deve-se observar que tanto o solo da mata nativa quanto o cultivado sem adição de biofertilizante, naturalmente, já apresentavam baixa resistência à penetração de raízes, fato que pode ter inibido o efeito benéfico do biofertilizante. Neste caso, resta a perspectiva de outros estudos para averiguar o efeito de biofertilizante em situações em que o solo já apresente elevada resistência à penetração de raízes. No caso do trabalho de Dias *et al.* (2011), de igual modo, os possíveis efeitos benéficos do biofertilizante não puderam ser comprovados porque, na maioria dos casos, solos arenosos, por apresentarem maior macroporosidade, não oferecem elevada resistência à penetração de raízes.

Os valores de resistência à penetração variaram entre 0,77 e 1,41 MPa, portanto não limitantes ao crescimento das raízes das plantas, uma vez que o valor considerado crítico, 2 MPa, não foi atingido (SILVA; KAY; PERFECT, 1994). Portanto, o solo em todos os sistemas avaliados não apresenta problemas de resistência à penetração quando mantido na capacidade

de campo, condição em que normalmente se busca manter o solo quando sob cultivos mantidos por irrigação. É importante ressaltar que, apesar do elevado teor de água na zona de solo irrigada, o que aumenta a sensibilidade à compactação do solo e/ou acomodação natural das partículas no processo de adensamento, há o efeito benéfico dos sucessivos ciclos de molhamento e secagem do solo causado pelas alternâncias de irrigação, possibilitando a formação de agregados estáveis e com maior porosidade entre as unidades estruturais, o que contribui para evitar a elevação da resistência do solo à penetração de raízes.

Gráfico 7 - Resistência do solo à penetração, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.



Fonte: Autor.

4.6 Permeabilidade intrínseca do solo ao ar e continuidade de poros

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 –, revelou diferença significativa entre os tratamentos na camada de 0,0-0,1 m (Gráfico 8), com o solo cultivado com figo sem aplicação de biofertilizante apresentando maior área disponível ao fluxo de gases em relação à mata nativa.

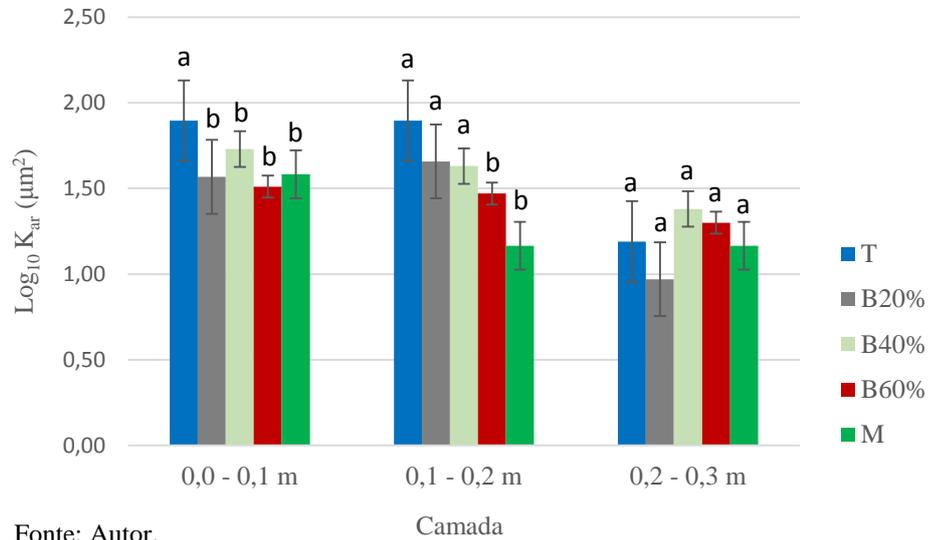
Uma contribuição importante, e particular, sobre a permeabilidade do solo ao ar decorre dos ciclos de umedecimento e secagem ocasionados pela irrigação, que, segundo Dalal e Bridge (1996), participam da gênese de agregados estáveis, criando poros entre agregados, aumentando a área de fluxo de gases nos tratamentos irrigados. Observações feitas por Costa *et*

al. (2014) corroboram os resultados verificados nesta pesquisa. É pertinente que sejam feitas algumas especulações ou inferências a respeito do biofertilizante aplicado ao solo. Sabe-se que os biofertilizantes possuem resíduos sólidos em suspensão e, portanto, a sua aplicação no solo deve ter obstruído ou diminuído o diâmetro dos macroporos (por deposição nas paredes no entorno dos poros), ao longo do tempo, principalmente nas camadas mais superficiais, com poros importantes para o fluxo de gases, reduzindo a permeabilidade intrínseca do solo ao ar em comparação com a testemunha sem adição de biofertilizante. Para fundamentar o que se pressupõe ter ocorrido, ao final do experimento a quantidade de matéria orgânica adicionada ao solo por meio do biofertilizante 20%, 40% e 60% foi de aproximadamente 0,41 kg, 0,82 kg e 1,24 kg por área disponível à planta, respectivamente, o que fez com que os tratamentos com aplicação do biofertilizante apresentassem maiores valores de microporosidade, como será visto adiante na discussão das curvas características de água no solo. Ora, se a microporosidade foi aumentada, a hipótese da obstrução ou redução do diâmetro dos poros pelos resíduos orgânicos não deve ser descartada.

Na camada de 0,1-0,2 m (Gráfico 8), o efeito da obstrução dos poros pelo resíduo oriundo do biofertilizante foi identificado em menor escala, sendo perceptível pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade apenas no tratamento com maior quantidade de biofertilizante aplicado ao solo. Para a camada de 0,2-0,3 m não houve diferença significativa entre a condição de cultivo e a situação de mata nativa, evidenciando que a obstrução/redução no diâmetro de poros deve ocorrer predominantemente nas camadas mais próximas de onde o biofertilizante é aplicado.

Ao comparar as áreas cultivadas com a mata nativa, verificou-se que o cultivo não degradou a rede porosa, visto que os valores K_{ar} são semelhantes ou superiores aos encontrados na área de mata nativa. Ressalte-se que as práticas culturais adotadas em solos cultivados alteram o espaço poroso, influenciando o ambiente de trocas gasosas na zona radicular (BRAUNACK; DEXTER, 1989; TORMENA; SILVA; LIBARDI, 1998; RODRIGUES *et al.*, 2011). Freire (2012) e Alves (2013) também constataram que a permeabilidade de Cambissolos da Chapada do Apodi foi melhorada quando o solo foi submetido ao cultivo.

Gráfico 8 - Permeabilidade intrínseca do solo ao ar, com os erros da média, para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.

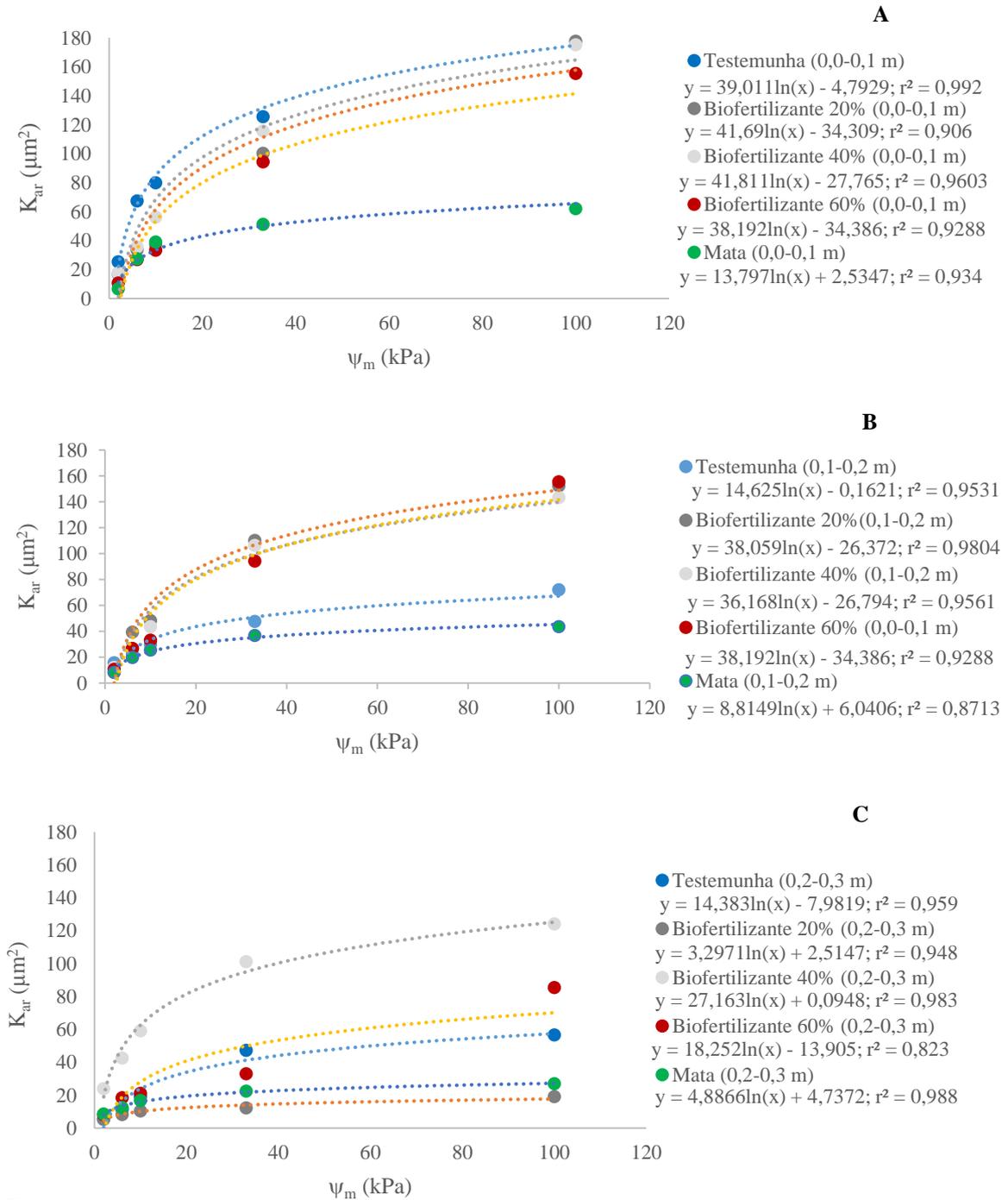


Fonte: Autor.

O Gráfico 9 representa a relação entre a K_{ar} e as tensões aplicadas (τ) nas amostras de solo com estrutura indeformada nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m. A K_{ar} apresentou correlação positiva com ajuste logarítmico em relação às tensões para todas as situações de manejo analisadas. Assim, a aplicação de tensões mais elevadas permite a retirada de uma maior quantidade de água do solo resultando 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). Apesar de a relação ser inversa, o fato de ser logarítmica indica que o secamento do solo não causa aumento de sua permeabilidade ao ar na mesma proporção com que varia a tensão da água, isto é, os incrementos de K_{ar} são cada vez menores para a mesma variação da tensão da água no solo.

Outro fato a ser observado é que em todas as tensões avaliadas os valores de K_{ar} foram superiores a $1 \mu\text{m}^2$ ($\text{Log } K_{ar} = 0$), valor que, segundo McQueen e Shepherd (2002), é considerado crítico para definir a porosidade não funcional, ou seja, aquela em que os poros responsáveis pela aeração se encontram bloqueados e não fazem parte do transporte convectivo de ar. Tal condição não foi encontrada nos manejos avaliados, em nenhuma tensão aplicada desde 2 até 100 kPa, evidenciando que mesmo em condição próxima à saturação a permeabilidade do solo ao ar não chega a ser limitante ao funcionamento do metabolismo das culturas.

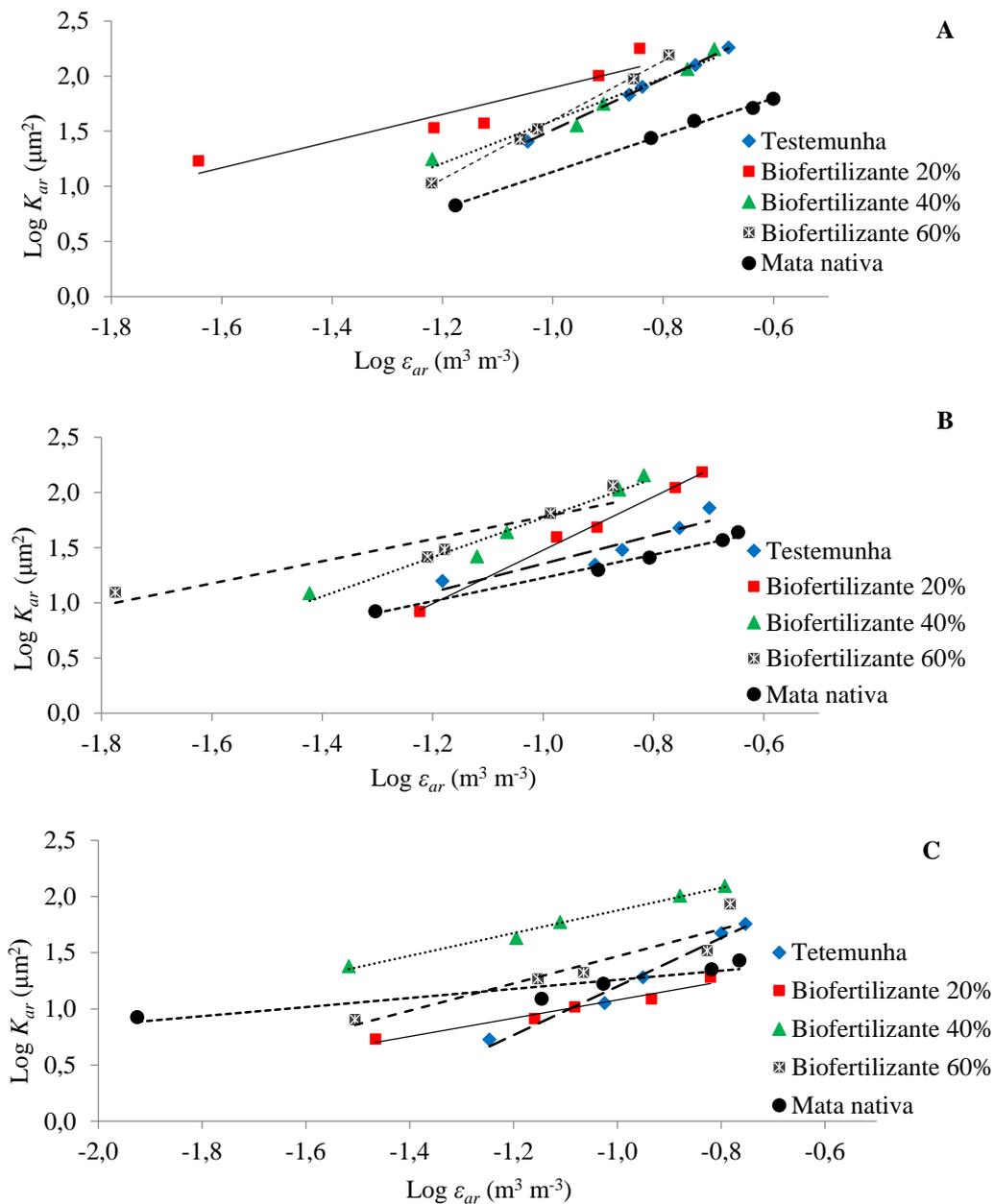
Gráfico 9 - Relação entre a permeabilidade intrínseca do solo ao ar (K_{ar}) e as tensões aplicadas (ψ_m), para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B) e 0,2-0,3 m (C).



O comportamento da relação entre a permeabilidade do solo ao ar (K_{ar}) e a porosidade de aeração (ε_{ar}) pode ser visualizado no Gráfico 10. Constatou-se correlação positiva e bom ajuste (com r , dentre as situações analisadas, com valor de no mínimo de 0,92) entre as variáveis para todos os sistemas analisados e camadas em estudo. Os tratamentos com biofertilizante 20%, 60% e 40% nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m,

respectivamente, apresentam maiores valores de K_{ar} para a ε_{ar} considerada crítica ao desenvolvimento de plantas, relatada por Silva *et al.* (1994) como sendo $\varepsilon_{ar} = 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ ou $\text{Log } \varepsilon_{ar} = -1,0 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$. Destaque-se que, diferentemente da situação discutida no Gráfico 8, em que se considerou a tensão de 10 kPa isoladamente, aqui a relação linear entre K_{ar} e ε_{ar} trata as observações em uma perspectiva conjunta, considerando todas as tensões aplicadas, a partir do modelo de Ahuja *et al.* (1984). Os resultados corroboram o verificado na análise anterior, de que o solo sob cultivo, seja com ou sem a aplicação de biofertilizante, tem a qualidade de sua rede porosa mantida ou melhorada em relação à condição sob mata nativa.

Gráfico 10 - Relação logarítmica entre K_{ar} e ε_{ar} para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m (A), 0,1-0,2 m (B) e 0,2-0,3 m (C).



Fonte: Autor.

Outra abordagem pode ser feita a partir da razão entre K_{ar} e ε_{ar} , que define o índice de continuidade de poros K_I , Tabela 3 (GROENEVELT; KAY; GRANT, 1984). Os valores de K_I indicam que, de modo geral, as áreas cultivadas apresentam maior continuidade de poros em relação à mata secundária para as profundidades analisadas, situação semelhante à encontrada por meio do parâmetro N . Vale destacar que embora as áreas cultivadas tenham aumentado a quantidade de microporos no solo, a conectividade de tais poros foi melhorada, o que de acordo com Freire (2012) é de fundamental importância para uma adequada troca gasosa entre o solo e a atmosfera.

Tabela 3 - Índice de continuidade de poros (K_I) para as áreas sob cultivo de abacaxi e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m, para a tensão de 10 kPa.

Sistemas de uso e manejo	Camadas		
	0,0-0,1 m	0,1-0,2 m	0,2-0,3 m
	----- $\log_{10} K_I, \text{mm}^2$ -----		
Testemunha	2,74	2,33	2,29
Biofertilizante 20%	2,69	2,57	2,09
Biofertilizante 40%	2,65	2,70	2,88
Biofertilizante 60%	2,55	2,66	2,39
Mata	2,33	2,22	2,25

Fonte: Autor.

Os valores de N , que correspondem ao índice de continuidade de poros, são apresentados na Tabela 4. Ao se avaliar os valores de N , tem-se que, em geral, as áreas cultivadas apresentaram poros mais eficazes ao fluxo de ar em relação à área sob mata nativa, o que, segundo Streck (2007), é de grande importância para o adequado processo de trocas gasosas entre o solo e a atmosfera. Aqui é importante ressaltar que o principal mecanismo de aeração nos solos é por difusão, um fenômeno cinético-molecular, que depende não necessariamente do tamanho dos poros do solo, mas da conexão entre eles (BRAUNACK; DEXTER, 1989). De acordo Schjønning *et al.* (1999), valores elevados de N são indicativos de solo com estrutura complexa. De modo geral, os valores de N referendaram as percepções a partir de outros indicadores a respeito da porosidade do solo (K_{ar} , K_I na tensão de 10 kPa) de que a qualidade da rede porosa é notadamente melhor na camada superficial de todos os sistemas considerados, a despeito dos comentários feitos sobre a possibilidade da obstrução/redução do diâmetro de poros nos casos em que se aplicou o biofertilizante.

Os sistemas cultivados apresentaram maiores volumes de poros bloqueados (ε_b) em relação à mata, indicando dessa forma que as áreas com cultivo de figo possuem um maior volume de poros não funcionais, que não estão disponíveis ao fluxo de gases no solo. Os

tratamentos com aporte do biofertilizante nas doses crescentes, conforme se discutiu anteriormente, provavelmente obstruíram os poros nas camadas superficiais. No caso do solo cultivado com figo sem aplicação do biofertilizante, o revolvimento ocasionou a migração de argila em profundidade, sendo depositada na camada subsuperficial, o que fez com que a conexão entre poros fosse melhorada nas camadas superficiais.

Tabela 4 - Parâmetros da equação de regressão de $\log K_{ar} = \log M + N \log \varepsilon_{ar}$ e porosidade bloqueada (ε_b) para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária, nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m.

Sistemas de uso e manejo	Camadas m	Log M ----- μm^2 -----	N	r^2	ε_b %
Testemunha	0,0-0,1	3,83	2,32	0,99	0,1
	0,1-0,2	2,64	1,29	0,85	0,8
	0,2-0,3	3,36	2,16	0,98	2,7
Biofertilizante 20%	0,0-0,1	3,10	1,21	0,88	0,2
	0,1-0,2	3,90	2,42	0,99	2,4
	0,2-0,3	1,90	0,81	0,96	0,4
Biofertilizante 40%	0,0-0,1	3,53	1,93	0,95	1,5
	0,1-0,2	3,55	1,78	0,96	1,0
	0,2-0,3	2,88	1,01	0,99	0,1
Biofertilizante 60%	0,0-0,1	4,28	2,68	0,99	2,5
	0,1-0,2	2,78	1,00	0,87	0,2
	0,2-0,3	2,68	1,21	0,87	0,6
Mata	0,0-0,1	2,80	1,67	0,99	2,1
	0,1-0,2	2,28	1,06	0,99	0,7
	0,2-0,3	1,66	0,40	0,87	0,0

Fonte: Autor.

4.7 Curva característica de água no solo e frequência acumulada de poros

As curvas características de água no solo para os sistemas avaliados nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m estão contidas nos Gráficos 11, 12 e 13, respectivamente. Analisando-se a faixa de tensão em que de acordo com Klein e Libardi (2002) a água está retida nos macroporos (0 a 6 kPa), os tratamentos apresentaram-se semelhantes em relação à capacidade de retenção de água.

No Gráfico 11, a faixa de tensão na qual, segundo Klein e Libardi (2002), a água se encontra nos microporos (6 a 1500 kPa), indica que os sistemas com aplicação do biofertilizante 20%, 40% e 60% obtiveram maior retenção de água, fato associado à maior quantidade de microporos (81%, 74% e 78% da porosidade total, respectivamente), inclusive, como discutido anteriormente, com a possibilidade de estes, em parte, serem decorrentes da obstrução/diminuição do diâmetro pelo resíduo oriundo do biofertilizante, e por deposição de material provenientes do revolvimento do solo, acarretando, assim, incremento na retenção de

água. O solo sob mata nativa apresenta menor retenção para esta faixa de tensão, por conter uma menor quantidade de microporos (63% da porosidade total).

Ao se analisar a frequência acumulada de poros para os tratamentos em estudo (Gráfico 11), com ênfase na tensão correspondente à capacidade de campo utilizada no intervalo hídrico menos limitante (10 kPa), que segundo Andrade e Stone (2011) é de grande importância para os processos de drenagem, disponibilidade de água para as culturas e manejo adequado do sistema de irrigação, observou-se que o solo sob cultivo apresentou menor volume de poros preenchidos com ar quando comparado à mata secundária. Desta forma, ao aplicar a tensão de 10 kPa, estarão disponíveis ao fluxo de ar entre 22% e 32% dos poros no solo cultivado, em contraste com 44% no solo sob mata nativa.

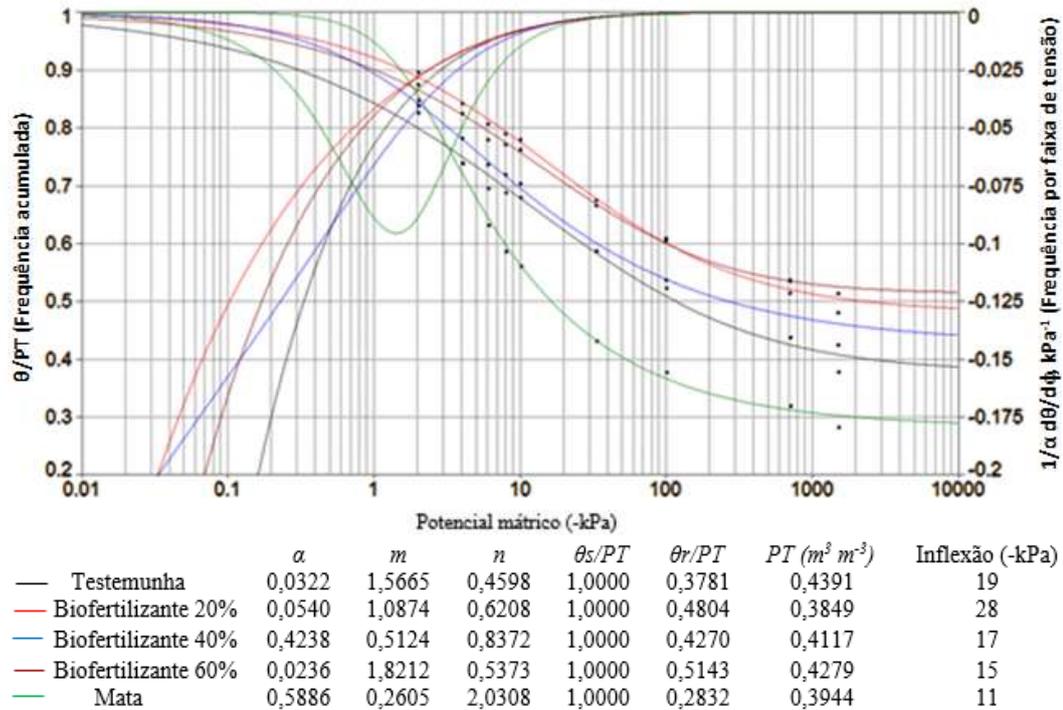
No tocante ao ponto de inflexão, que segundo Dexter e Bird (2001) é o ponto de umidade ótima para o cultivo, ou seja, a capacidade de campo, observou-se que os valores de tensão em todos os sistemas se encontraram abaixo do valor que rotineiramente se considera para solo argiloso – 33 kPa (AMARO FILHO; ASSIS JÚNIOR; MOTA, 2008; STUMPF, 2011; SOUZA *et al.*, 2013). Este resultado indica a necessidade de se revisitar o conceito de capacidade de campo, de um lado quanto aos valores normalmente arbitrados na literatura para distintas texturas do solo, por outro quanto à veracidade de que ocorre no entorno do ponto de inflexão da curva característica de água no solo, haja vista a discrepância observada nos casos em análise.

Comparando-se os pontos de inflexão, é expressiva a variação entre os tratamentos, visto que o sistema com biofertilizante 20% apresentou ponto de inflexão em potencial mátrico mais negativo, fato ocasionado possivelmente pela maior microporosidade que atua retendo mais água e, conseqüentemente, diminuindo a inclinação da reta tangente ao ponto de inflexão, aspecto importante para a definição do índice S de Dexter (2004). Para corroborar estes resultados, fez-se a análise de regressão das variáveis potencial mátrico no ponto de inflexão (ϕ_m inflexão, variável dependente) e percentagem de microporos (variável independente), para as 60 curvas características de água no solo deste experimento, obtendo-se a função $y = 67,126 - 0,35x$, com coeficiente de correlação $r = 0,76$, coeficiente angular b diferente de zero, ambos significativos a 1% de probabilidade. Portanto, pelo exposto, fica evidente que aumento na microporosidade desloca o ponto de inflexão para potenciais mátricos mais negativos.

Analisando-se a curva diferencial no Gráfico 11, observa-se que o poro mais frequente para os solos sob cultivo situa-se próximo à saturação, enquanto para a condição sob mata secundária no entorno de 216 μm . Ressalte-se que, de acordo com Hillel (2004) e Libardi

(2012), a representação é de um diâmetro de poro equivalente, visto que a rede porosa do solo é complexa e irregular no aspecto morfológico e dimensional.

Gráfico 11 - Curva característica de água no solo e curva diferencial da curva característica de água no solo para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária na camada de 0,0-0,1 m.



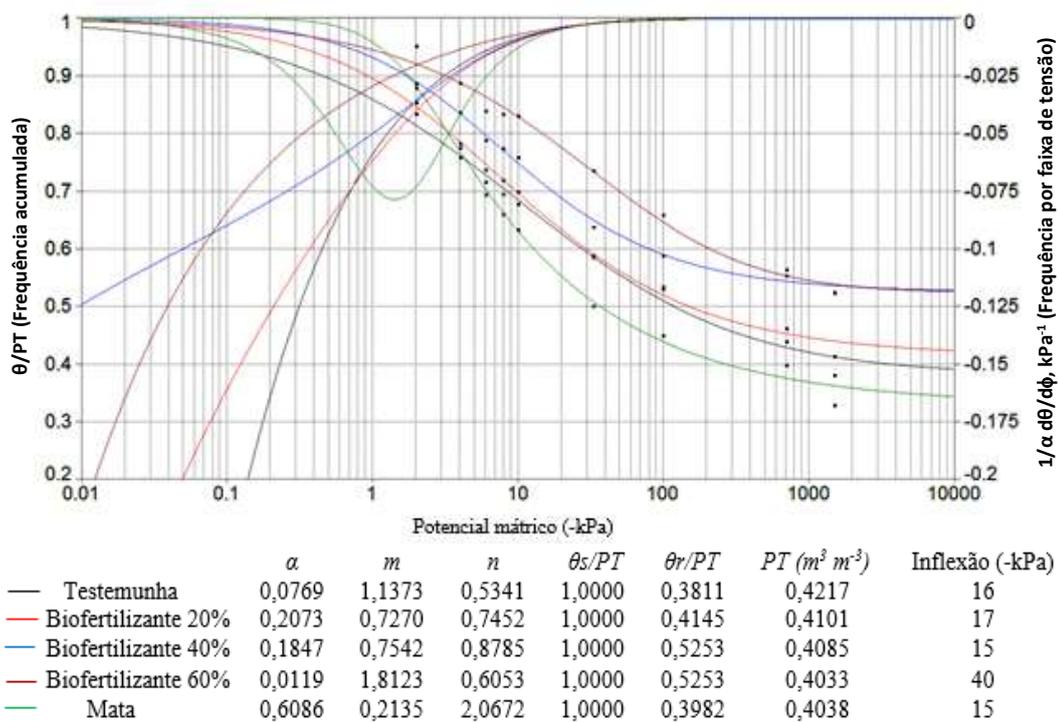
Fonte: Autor.

Ao se analisar o Gráfico 12, na faixa de tensão de 6 a 1500 kPa, referente à camada de 0,1-0,2 m, observa-se situação semelhante à camada superficial, em que os tratamentos com biofertilizante 20%, 40% e 60% apresentam maiores valores de microporosidade, 74%, 79% e 84% da porosidade total, respectivamente. A mata apresentou menor retenção de água para a tensão em análise, por possuir menor microporosidade (69% da porosidade total).

Assim como na profundidade de 0,0-0,1 m, o ponto de inflexão encontra-se também deslocado para potencial mátrico menos negativo em todos os sistemas analisados, fato que indica novamente a necessidade de se rever os conceitos atribuídos à determinação da capacidade de campo em laboratório, em potenciais mátricos arbitrados, ou a partir da curva característica de água no solo, em seu ponto de inflexão. A área com aplicação do biofertilizante 60%, por possuir maior quantidade de microporos, atingiu o ponto de inflexão em uma tensão superior às demais, fato já explicado a partir da correlação entre estas variáveis. A partir do Gráfico 12, ao se observar a frequência acumulada, tem-se que para a tensão de 10 kPa, os

sistemas sob cultivo apresentaram menores quantidades de poros disponíveis ao fluxo de ar, variando de 17% a 32%, enquanto que para a mesma tensão a mata secundária apresentou 37% de poros livres de água. O diâmetro do poro mais frequente para o solo com mata também foi de 216 μm , assim como o verificado na camada de 0,0-0,1 m; já para o solo sob cultivo, o poro mais frequente é encontrado muito próximo à saturação, semelhante ao observado para a camada superficial.

Gráfico 12 - Curva característica de água no solo e curva diferencial da curva característica de água no solo para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária na camada de 0,1-0,2 m.



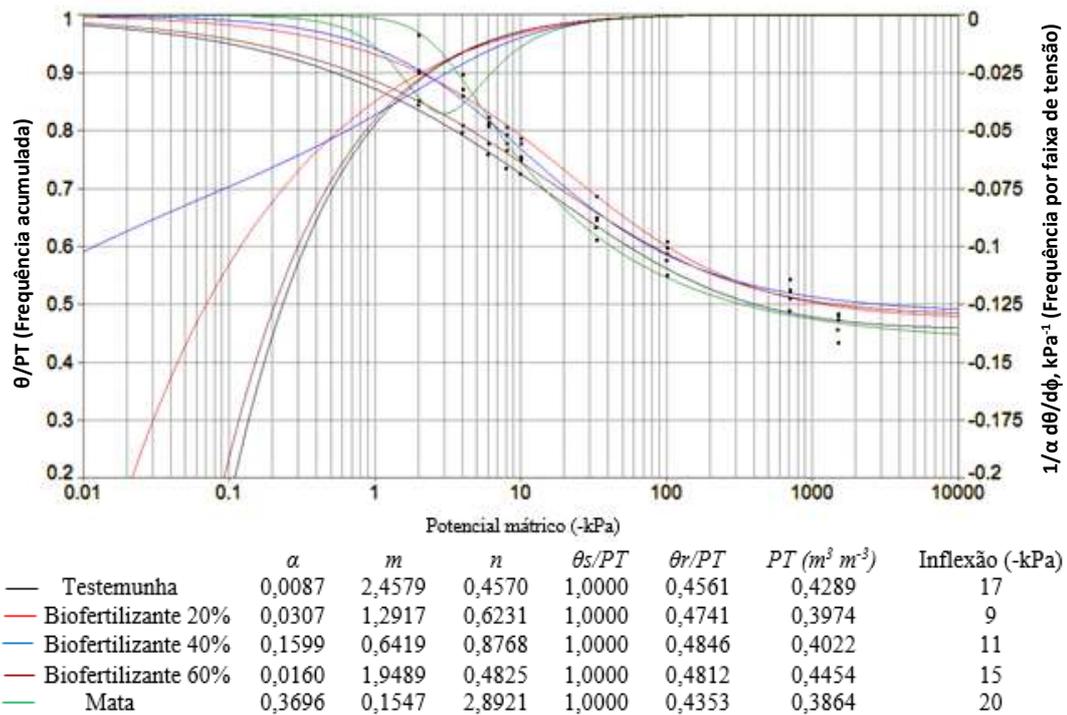
Fonte: Autor.

De acordo com o Gráfico 13, correspondente à camada de 0,2-0,3 m, é perceptível que houve uma redução no efeito do biofertilizante sobre a obstrução/redução do diâmetro dos poros, o que torna a retenção de água muito mais semelhante entre os tratamentos. O ponto de inflexão também continua deslocado para mais próximo da saturação, requerendo os mesmos cuidados no tocante à determinação da capacidade de campo.

Analisando a frequência acumulada na tensão de 10 kPa, observa-se diferença em relação às camadas anteriores, em que a testemunha apresenta 28% dos poros disponíveis para ocorrência de trocas gasosas, e os sistemas com biofertilizante e mata variando entre 21% e 24%. O diâmetro do poro mais frequente para o solo com mata foi em torno de 105 μm e para

o solo cultivado a tensão situou-se próximo à saturação, ou seja, poro de diâmetro maior em relação à mata.

Gráfico 13 - Curva característica de água no solo e curva diferencial da curva característica de água no solo para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária na camada de 0,2-0,3 m.

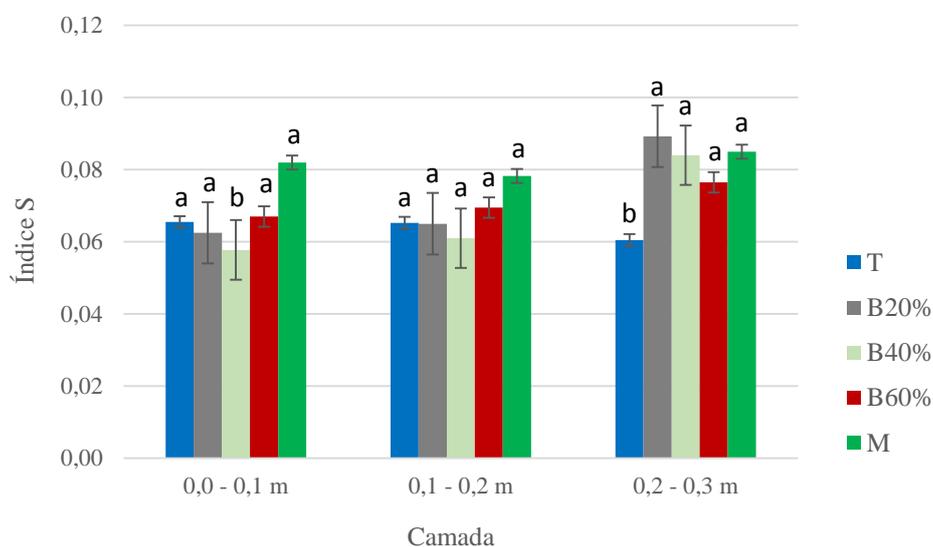


Fonte: Autor.

4.8 Índice S

No que tange ao índice S (Gráfico 14), os valores em todos os tratamentos encontram-se acima do valor 0,035, indicado por Dexter (2004) como limite para separar um solo com boa qualidade física, ou seja, que apresente condições estruturais adequadas, um funcionamento físico apropriado do solo como componente do ambiente com funções específicas e, conseqüentemente, com menor restrição ao crescimento das raízes das culturas (Maia, 2011; Streck *et al.*, 2008) de um solo com má qualidade. Vale 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).

Gráfico 14 - Índice S para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.



Fonte: Autor.

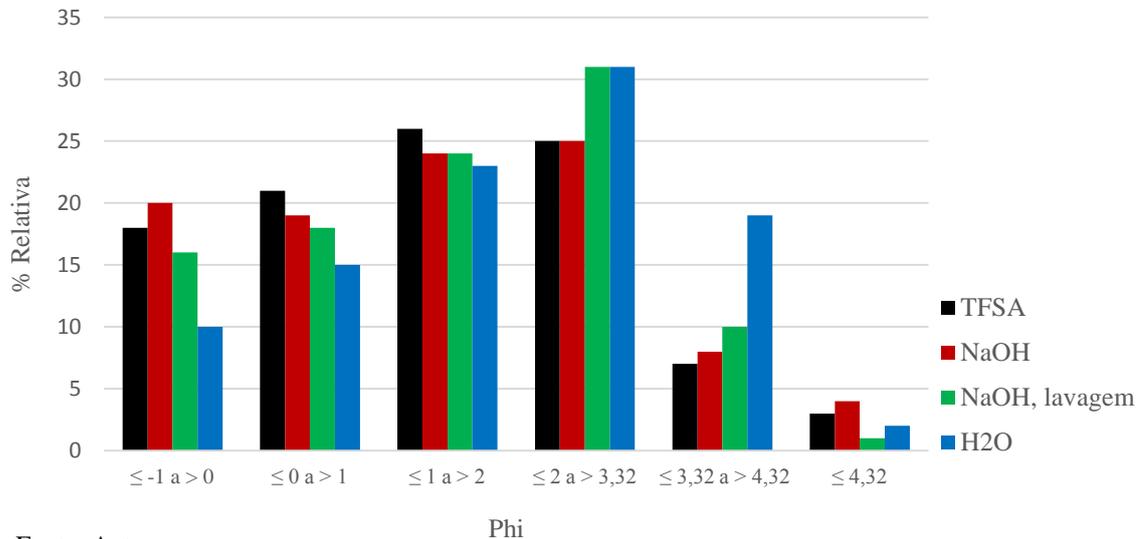
4.9 Índice S_{relativo}

De acordo com o Gráfico 15, é possível observar a distribuição das diferentes frações granulométricas nos materiais com os quais foram construídas as curvas-padrão de referência que deram origem aos distintos valores de S e, conseqüentemente, S_{relativo} na camada de 0,0-0,1 m. As concentrações das frações em determinadas classes de ϕ (phi) diferiram de acordo com o tratamento a que o material foi submetido. No método com terra fina seca ao ar (TFSA) as maiores quantidades relativas de material se concentraram nas frações de maior diâmetro (material mais grosseiro), enquanto que no método com material disperso em água as maiores concentrações se deram naquelas de menores diâmetros (material mais fino). Os resultados, de fato, evidenciam que o processo de dispersão, que atua na desagregação das partículas, aumenta a quantidade de frações de menor diâmetro e, portanto, quando acomodadas resultam em porosidade o mais próximo da textural.

Todos os materiais para a construção das curvas-padrão de referência para os diferentes métodos foram classificadas como pobremente selecionados (Folk e Ward, 1957), por apresentarem os diferentes tamanhos de partículas dentro das classes definidas (1 mm; 0,5 mm; 0,25 mm; 0,105 mm, 0,053 mm), perfazendo seis classes de tamanho (≤ 2 mm a >1 mm; ≤ 1 mm a $>0,5$ mm; $\leq 0,5$ mm a $>0,25$ mm; $\leq 0,25$ mm a $>0,105$ mm; $\leq 0,105$ mm a $>0,053$ mm;

$\leq 0,053$ mm), mostrando com isso que o processo de dispersão não atuou no sentido de homogeneizar o tamanho das partículas, mas em dispersá-las, tornando-as individualizadas.

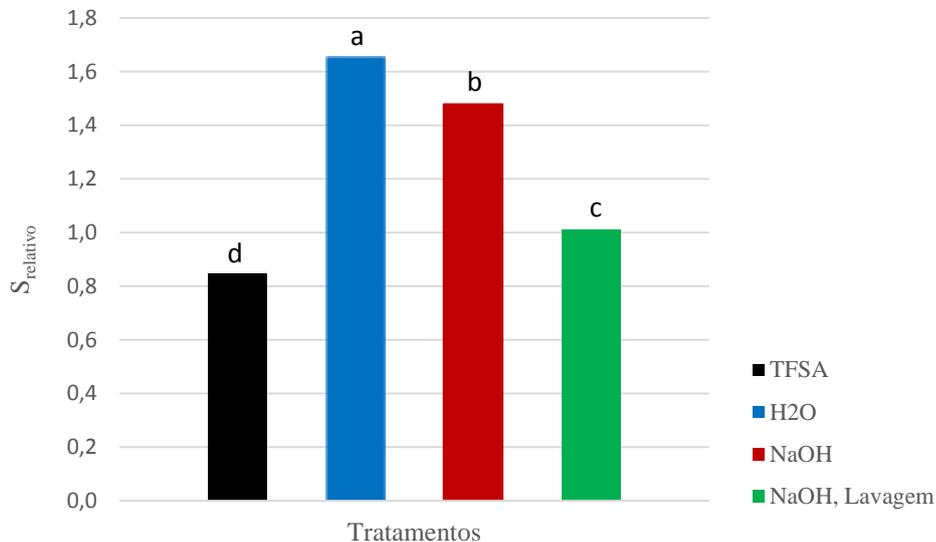
Gráfico 15 - Histograma de distribuição das frações granulométricas no material para a construção das curvas-padrão de referência nos métodos de obtenção do S_{relativo} .



Fonte: Autor.

Pelas observações no Gráfico 16, os métodos utilizados para obtenção do S_{relativo} apresentaram diferença significativa pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. O tratamento com dispersão em água apresentou maior sensibilidade na detecção de variações associadas à estrutura do solo; portanto, para obtenção de resultados confiáveis quando se utiliza o S_{relativo} como avaliador de qualidade física do solo, deve-se trabalhar com a curva-padrão de referência obtida por dispersão do solo em água, pelo fato de por este procedimento se obter melhor individualização das partículas do solo (Gráfico 15). Ficou provado que pelo método utilizando terra fina seca ao ar (TFSA) a magnitude das variações por que passa a estrutura do solo não pode ser plenamente mensurada, visto que as microestruturas no material para a obtenção da curva-padrão de referência concorrem para diminuir a sensibilidade do S_{relativo} obtido por tal procedimento.

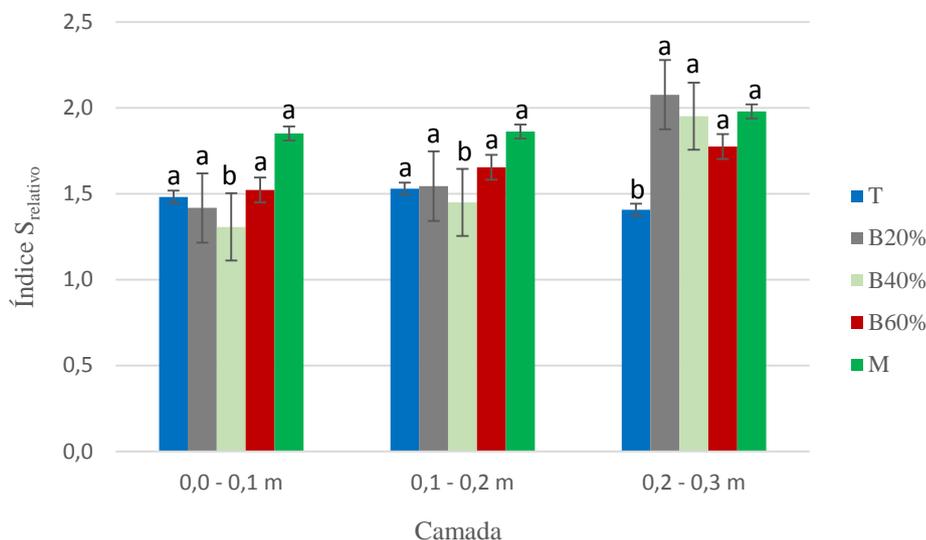
Gráfico 16 – Valores do índice S_{relativo} a partir dos métodos para a construção da curva-padrão de referência. Médias seguidas pela mesma letra não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.



Fonte: Autor.

Em se tratando de índice S_{relativo} obtido pelo método com dispersão em água (Gráfico 17), verificou-se diferença significativa entre os tratamentos com biofertilizante 40% e testemunha em relação à mata nativa, nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m, respectivamente, sendo diferente dos resultados obtidos pelo índice S , mostrando assim maior sensibilidade do S_{relativo} em distinguir sistemas de manejo, o que também foi constatado por Freire (2012) e Alves (2013). Em todos os tratamentos, os valores de índice S_{relativo} encontrados ficaram acima da unidade e, dessa forma, a estrutura do solo foi melhorada em relação à situação de referência. Nas camadas de 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m, o solo sob aplicação do biofertilizante 40% apresentou redução em sua qualidade estrutural de aproximadamente 29% e 22%, respectivamente; já na profundidade de 0,2-0,3 m a testemunha tem uma estrutura com qualidade 29% inferior em relação ao sistema tomado como referência, no caso a mata nativa.

Gráfico 17 - Índice S_{relativo} para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m, 0,2-0,3 m (T - Testemunha; B20% - Biofertilizante 20%; B40% - Biofertilizante 40%; B60% - Biofertilizante 60%; M - Mata nativa). Médias seguidas pela mesma letra na camada não diferem pelo teste de Dunnett a 5% de probabilidade.



Fonte: Autor.

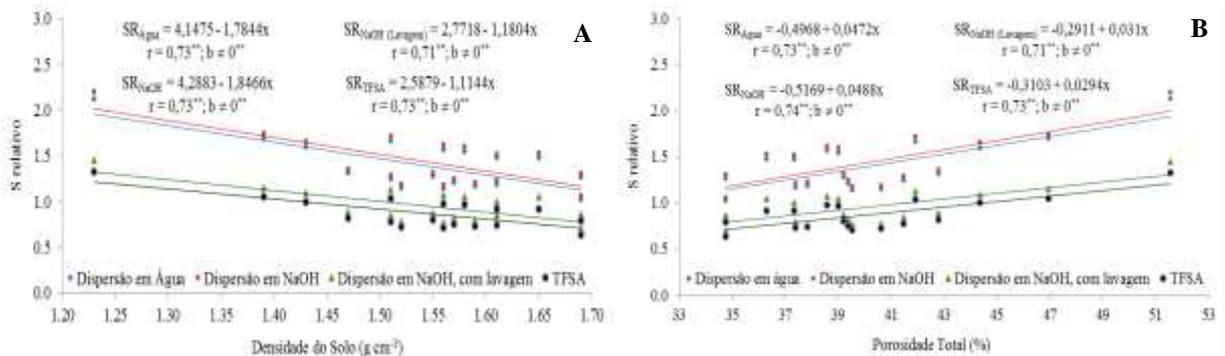
Com relação às análises de correlação e regressão relacionando os $S_{\text{relativos}}$ obtidos por diferentes procedimentos com atributos da fração porosa do solo, é perceptível que há boa relação entre o S_{relativo} e as variáveis densidade do solo (Gráfico 18A), porosidade total (Gráfico 18B) e índice S (Gráfico 18C), fato evidenciado pelos coeficientes de correlação significativos pelo teste t a 1% de probabilidade. Tais variáveis apresentaram coeficiente angular (b) diferente de zero, isto é, as retas não são paralelas ao eixo das abscissas, e, desse modo, variações em qualquer destes atributos influenciam as alterações do S_{relativo} .

A variação nos atributos densidade do solo e porosidade total explica cerca de 73% da variância do índice S_{relativo} em todos os cenários analisados considerando S_{relativo} obtido por TFSA, dispersão em água e com adição de hidróxido de sódio 1 N, com e sem remoção do sódio por lavagem. O S_{relativo} apresenta relação negativa com a densidade do solo, significando que aumentos dos valores deste atributo correspondem a redução nos valores de S_{relativo} . O índice se relaciona positivamente com a porosidade do solo, indicando que aumento da quantidade de poros no solo representa elevação no valor do S_{relativo} . Resultados encontrados por Alves (2013) corroboram os aqui verificados. Como se prevê, já que são dependentes, o índice S apresenta perfeita correlação positiva com o S_{relativo} (Gráfico 16C).

De acordo com a análise de paralelismo de retas e de intercepto, utilizando o teste t de Student a 20% de probabilidade, tem-se que para a relação S_{relativo} x densidade do solo (Gráfico 18A) as retas de SR_{H_2O} e SR_{NaOH} evidenciam maior sensibilidade, por apresentarem

diferentes inclinações em relação às demais, isto é, que pequenas variações na densidade do solo acarretam maiores variações nos valores de S_{relativo} . As duas retas mencionadas, por apresentarem mesmo intercepto e inclinação, são classificadas como paralelas. O significado deste comportamento é que se pode utilizar qualquer uma entre as duas funções matemáticas a elas associadas para representar a relação entre ambas as variáveis. Com relação ao Gráfico 18B, as retas também apresentaram diferenças, sendo que a reta SR_{NaOH} diferiu em inclinação das retas SR_{TFSA} e $SR_{\text{NaOH (lavagem)}}$, mas foi paralela a $SR_{\text{H}_2\text{O}}$, com todas as retas apresentando o mesmo intercepto. Diante destes resultados, com diferenças significativas entre as retas para todas as relações analisadas e maiores sensibilidades constatadas para o $SR_{\text{H}_2\text{O}}$ e SR_{NaOH} , o fato de a obtenção do $SR_{\text{H}_2\text{O}}$ ser mais simples sugere que este indicador é que deve ser utilizado para a avaliação da qualidade estrutural do solo.

Gráfico 18 - Regressão e correlação entre o S_{relativo} e atributos relacionados com a fração porosa do solo, para a camada de 0,0-0,10 m. ** - significativo pelo teste t de Student a 1% de probabilidade; ns - não significativo pelo teste t de Student a 5% de probabilidade.



Atributos	Métodos	Inclinação		Intercepto	
		t obs	t tab	t obs	t tab
$S_{\text{relativo}} \times$ Densidade do solo	$SR_{\text{TFSA}} \times SR_{\text{Água}}$	1,673	1,306	-0,328	1,306
	$SR_{\text{TFSA}} \times SR_{\text{NaOH}}$	1,457	1,306	-0,357	1,306
	$SR_{\text{TFSA}} \times SR_{\text{NaOH (Lavagem)}}$	0,168	1,306	-0,039	1,306
	$SR_{\text{Água}} \times SR_{\text{NaOH}}$	0,188	1,306	-0,030	1,306
	$SR_{\text{Água}} \times SR_{\text{NaOH (Lavagem)}}$	-1,430	1,306	0,289	1,306
	$SR_{\text{NaOH}} \times SR_{\text{NaOH (Lavagem)}}$	-1,281	1,306	0,289	1,306
$S_{\text{relativo}} \times$ Porosidade total	$SR_{\text{TFSA}} \times SR_{\text{Água}}$	-0,760	1,306	0,057	1,306
	$SR_{\text{TFSA}} \times SR_{\text{NaOH}}$	-1,482	1,306	0,063	1,306
	$SR_{\text{TFSA}} \times SR_{\text{NaOH (Lavagem)}}$	-0,157	1,306	-0,006	1,306
	$SR_{\text{Água}} \times SR_{\text{NaOH}}$	-0,064	1,306	0,006	1,306
	$SR_{\text{Água}} \times SR_{\text{NaOH (Lavagem)}}$	0,684	1,306	-0,063	1,306
	$SR_{\text{NaOH}} \times SR_{\text{NaOH (Lavagem)}}$	1,315	1,306	-0,063	1,306

Fonte: Autor.

4.10 Estatística multivariada

A análise multivariada é uma ferramenta importante para avaliar a correlação existente entre variáveis e, dessa forma, facilitar a compreensão do conjunto de atributos analisados e a interação destes com os usos do solo, sendo possível identificar qual atributo os discrimina, além de detectar resultados não mostrados na análise univariada (MOTA *et al.*, 2014).

A matriz de dados para análise de componentes principais (ACP) foi composta por 12 variáveis. Foram obtidos 10 componentes que são apresentados na Tabela 5, juntamente com seus respectivos autovalores e variabilidade explicada. Os componentes principais foram escolhidos levando-se em conta o critério de Kaiser (1958), no qual são selecionados autovalores acima da unidade, por indicarem informações importantes que não devem ser desconsideradas. Desta forma, foram selecionados os componentes principais CP1, CP2 e CP3, por estarem de acordo com as condições exigidas. Tais componentes, unidos, explicam cerca de 87,14% da variância dos dados, sendo 40,87%, 32,48% e 13,79% da variância explicada pelos fatores 1,2 e 3, respectivamente (Tabela 5).

Tabela 5 - Autovalores e porcentagem explicada por cada componente.

Componentes Principais	Autovalores	Variabilidade explicada (%)	Variabilidade explicada acumulada (%)
1	4,905	40,87	40,87
2	3,897	32,48	73,35
3	1,655	13,79	87,14
4	0,517	4,31	91,45
5	0,468	3,90	95,35
6	0,303	2,53	97,88
7	0,181	1,50	99,38
8	0,058	0,48	99,86
9	0,011	0,09	99,95
10	0,005	0,05	100,00

Fonte: Autor.

De acordo com Santos (2010), valores de correlação entre os componentes principais e as variáveis acima de 0,6, em módulo, significam que tais variáveis são as que têm maior contribuição para o referido componente. De modo a facilitar a compreensão e visualização na Tabela 6, é apresentada a contribuição em percentual de cada variável para o respectivo componente principal. Analisando-se o CP1, as variáveis que melhor explicaram ou mais contribuíram foram silte, densidade do solo, K_{ar} , K_I , N , índice S e índice $S_{relativo}$. Já para o

CP2, foram areia, argila, macroporosidade e microporosidade. Em se tratando de CP3 a porosidade total foi a variável mais significativa.

Tabela 6 - Correlação entre as variáveis e componentes principais e sua respectiva contribuição para cada componente.

Variável	CP1	CP2	CP3	CP1(%)	CP2(%)	CP3(%)
Areia	0,164	0,961	0,013	0,545	23,681	0,010
Silte	-0,670	-0,550	-0,218	9,154	7,774	2,883
Argila	0,321	-0,855	0,158	2,101	18,748	1,504
Densidade do solo	0,696	0,221	-0,655	9,891	1,255	25,956
Porosidade total	-0,679	-0,161	0,700	9,391	0,663	29,602
Macroporosidade	-0,316	0,829	0,408	2,041	17,616	10,042
Microporosidade	-0,175	-0,959	0,098	0,623	23,600	0,577
K_{ar}	-0,731	0,380	-0,281	10,888	3,708	4,771
K_l	-0,768	-0,158	-0,428	12,023	0,638	11,094
N	-0,761	0,297	0,227	11,793	2,260	3,124
Índice S	0,873	0,005	0,289	15,549	0,001	5,039
Índice S _{relativo}	0,886	-0,047	0,299	16,001	0,057	5,398

Fonte: Autor.

A partir dos Gráficos 19A e 19B, quanto maior a distância das variáveis em relação ao centro mais importante ela será para explicação da variância dos dados; além disso, o menor ou maior ângulo de inclinação da linha em relação a cada eixo significa que a variável está bem ou mal correlacionada com o componente principal, respectivamente. Diante do exposto, ao se analisar o Gráfico 19A, percebe-se que as variáveis estão mais distantes do centro, enquanto que no Gráfico 19B somente algumas estão distantes dele, ou seja, apenas as que apresentam boa contribuição aos componentes principais.

A partir do Gráfico 19A, que contém os componentes principais 1 e 2, constata-se que as variáveis densidade do solo e porosidade total, por estarem situadas em quadrantes opostos, apresentam correlação negativa, fato já esperado, porém não evidenciado nas análises univariadas. Situação semelhante foi observada para as variáveis areia e microporosidade, indicando que o aumento de uma implica diminuição na outra. A mesma interpretação deve ser dada para a correlação entre as variáveis argila e macroporosidade, demonstrando que a textura tem influência no sistema poroso do solo (KIEHL, 1979).

Em se tratando da discriminação que os atributos do solo têm sobre as situações de uso e manejo para cada profundidade avaliada, tem-se que o poder é tanto mais forte quanto mais próximo estiverem no mesmo quadrante. Diante disso, analisando o Gráfico 19A, percebe-se que os sistemas com mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m foram semelhantes, pois permaneceram no mesmo quadrante, e as variáveis que influenciaram para discriminar tais sistemas foram areia e densidade do solo. Já para o solo sob mata secundária,

os tratamentos biofertilizante 20%, 40% e 60%, associados às camadas de 0,2-0,3 m, 0,2-0,3 m, 0,2-0,3 m e 0,1-0,2 m, respectivamente, foram distinguidos pela influência da argila, fato decorrente do incremento dessa fração por translocação no perfil de camadas analisadas.

Os tratamentos testemunha na camada de 0,2-0,3 m, biofertilizante 20% (0,0-0,1 m), 40% (0,1-0,2 m) e 60% (0,0-0,1 e 0,2-0,3 m), situaram-se em outro quadrante, portanto, sendo influenciados por outras variáveis, particularmente a porosidade total, microporosidade, silte e $\log K_I$. Os sistemas com a testemunha (0,0-0,1 e 0,1-0,2 m), biofertilizante 20% (0,1-0,2 m) e 40% (0,0-0,1 m) sofreram influência da permeabilidade intrínseca do solo ar e do índice de continuidade de poros N .

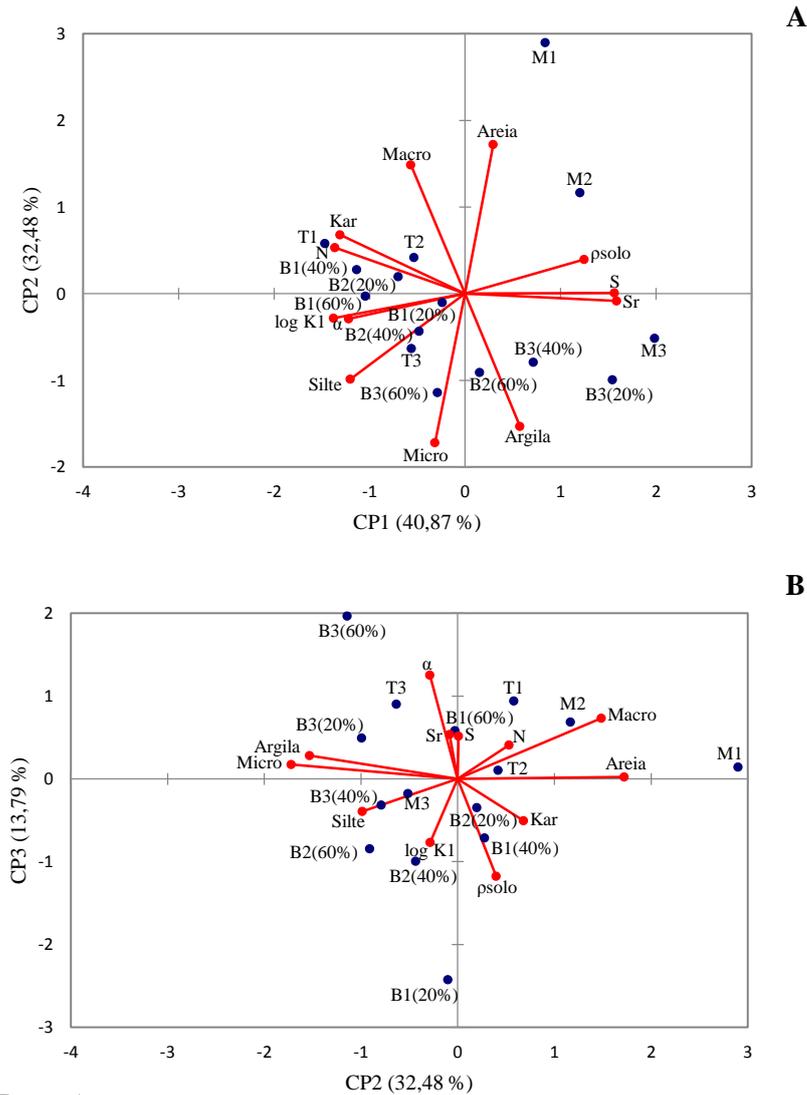
Ainda no Gráfico 19A, é perceptível que a camada superficial dos solos cultivados apresenta correlação com variáveis associadas à fração porosa, enquanto que a camada superficial da mata secundária é mais associada à influência da textura do solo. A camada subsuperficial dos solos apresenta correlação com a variável argila, devido a seu incremento em profundidade em todos os tratamentos avaliados.

De acordo com o Gráfico 19B, que trata dos componentes principais 2 e 3, observa-se alta correlação, neste caso positiva, entre as variáveis argila e microporosidade, denunciando que a elevação de uma no solo resulta também em incremento da outra (Klein, 2005). Assim como no Gráfico 19A, as variáveis densidade do solo e porosidade total apresentaram correlação negativa por estarem em quadrantes opostos. Outra correlação negativa visualizada envolve as variáveis silte e macroporosidade, ratificando dessa forma a influência da textura na rede porosa do solo.

Vale-se destacar a correlação existente entre a camada subsuperficial dos solos com os tratamentos testemunha, biofertilizante 20% e 60%, que foram semelhantes, sendo discriminadas pelas variáveis argila, microporosidade e porosidade total, uma vez que em tais sistemas ocorre um incremento de argila em profundidade (Tabela 2), o que acarretou aumento da quantidade microporos, com efeito na porosidade total.

Os tratamentos com a testemunha (0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m) e mata secundária (0,0-0,1 m e 0,1-0,2 m) foram diferentes dos demais por influência da macroporosidade e do índice de continuidade de poros. Já para os sistemas com biofertilizante 20% e 40% nas camadas de 0,1-0,2 m e 0,0-0,1 m, respectivamente, as variáveis que tiveram maior peso para discriminá-los foram densidade do solo e K_{ar} . Os solos da mata secundária (0,2-0,3 m), biofertilizante 40% (0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m) e 60% (0,1-0,2 m) sofreram influência do $\log K_I$ e da fração silte.

Gráfico 19 - Dispersão dos atributos físicos para as áreas sob cultivo de figo e mata secundária nas camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m. ρ solo: densidade do solo; N e log K1: índices de continuidade de poros; Kar: permeabilidade intrínseca do solo ao ar; α : porosidade total; Micro: microporos; Macro: macroporos; S: índice S; Sr: índice $S_{relativo}$; T1, T2, T3 correspondem ao tratamento testemunha (cultivado, porém sem adição de biofertilizante), B1(20%), B2(20%), B3(20%) ao solo cultivado, com adição de biofertilizante 20%, B1(40%), B2(40%), B3(40%) ao com biofertilizante 40%, B1(60%), B2(60%), B3(60%) ao com biofertilizante 60% e M1, M2, M3 à mata secundária, todos, respectivamente, às camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m.

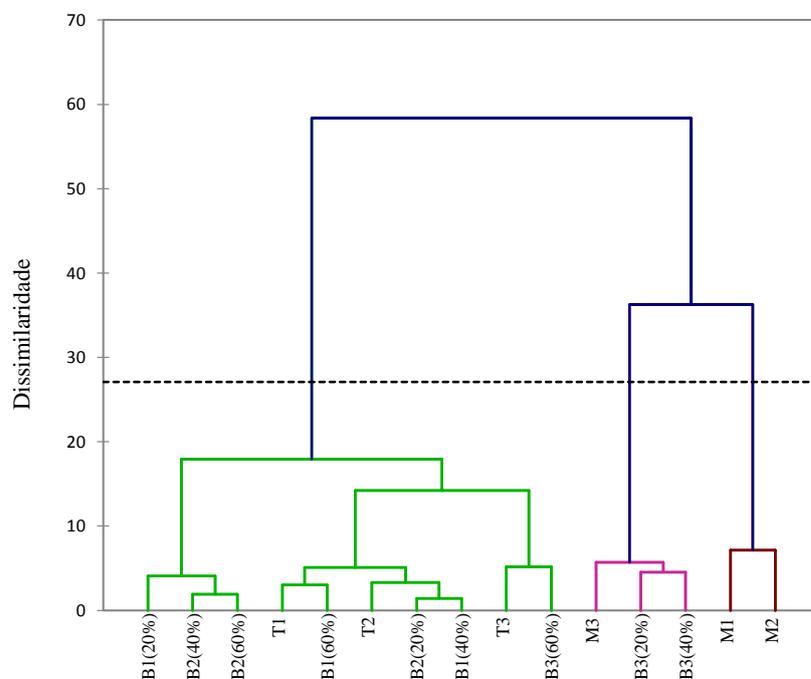


Fonte: Autor.

De acordo com o dendrograma (Gráfico 20), observa-se a formação de três grupos distintos. É importante ressaltar que no procedimento da análise de agrupamento se buscam as características de um mesmo grupo que os tornam semelhantes, ao tempo em que diferem do comportamento dos outros grupos (VALLADARES *et al.*, 2008). O primeiro grupo foi formado entre as camadas superficiais e as de 0,1-0,2 m dos tratamentos cultivados, como também as camadas de 0,2-0,3 m para a testemunha e biofertilizante 20%. As camadas subsuperficiais dos

solos tratados com biofertilizante 20% e 40% e mata secundária formaram outro grupo. Finalmente, outro grupo foi constituído pelas camadas superficial e 0,1-0,2 m da mata secundária. Desta forma, ficou evidenciada a discriminação das camadas superficiais dos sistemas cultivados em relação à da mata secundária, como também a similaridade das camadas subsuperficiais dos tratamentos com biofertilizante 20%, 40% e mata secundária.

Gráfico 20 - Dendrograma representando a dissimilaridade entre os grupos da testemunha e do cultivo de figo. T1, T2, T3 correspondem ao sistema com a testemunha, B1(20%), B2 (20%), B3 (20%) ao sistema com biofertilizante 20%, B1(40%), B2 (40%), B3 (40%) ao com biofertilizante 40%, B1(60%), B2 (60%), B3 (60%) ao com biofertilizante 60% e M1, M2, M3 à mata secundária, todos, respectivamente, às camadas de 0,0-0,1 m, 0,1-0,2 m e 0,2-0,3 m.



Fonte: Autor.

5. CONCLUSÕES

A qualidade da rede porosa é melhorada, senão mantida, quando o solo é cultivado sob as condições descritas neste experimento;

Quando cultivado, a aplicação de biofertilizante melhora ou, no mínimo, mantém a qualidade dos atributos físicos do solo em todas as camadas consideradas, com exceção da permeabilidade intrínseca do solo ao ar na camada de 0,0-0,1 m;

Em relação ao solo de mata nativa, a aplicação de biofertilizante melhora ou, pelo menos, mantém a qualidade dos atributos físicos do solo em todas as camadas consideradas, exceto quanto ao grau de flocculação das argilas na camada de 0,0-0,1 m;

Os casos em que houve piora da qualidade do atributo físico avaliado em decorrência dos tratamentos aplicados, ainda que eles não sejam considerados críticos ao desenvolvimento de plantas, são indicativos de que há a necessidade de adoção de práticas de manejo específicas para evitar a degradação do solo;

A maioria dos indicadores de qualidade física do solo selecionados é eficiente em quantificar as alterações impostas à estrutura do solo;

O índice S_{relativo} obtido a partir do método da dispersão de solo em água é mais sensível às alterações físicas do solo do que o S_{relativo} obtido por terra fina seca ao ar.

REFERÊNCIAS

- AMARO FILHO, J.; ASSIS JÚNIOR, R. N. de; MOTA, J. C. A. **Física do solo: conceitos e aplicações**. 1. ed. Fortaleza - CE: Imprensa Universitária, v. 1, 2008. 290 p.
- 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**, Campina Grande, v. 13, p. 382-388, 2009.
- ANDRADE, I.P.S; CARVALHO, D.F; ALMEIDA, W.S; SILVA, J.B.G; SILVA, L.D.B. Water requirement and yield of fig trees under different drip irrigation management. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, p. 17-27, 2014.
- ANDRADE, R.S.; STONE, L.F. Estimativa da umidade na capacidade de campo em solos sob Cerrado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, p. 111-116, 2011.
- AHUJA, L.R.; NANEY, J.W.; GREEN, R.E.; NIELSEN, D.R. Macroporosity to characterize spatial variability of hydraulic conductivity and effects of land management. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, p. 699-702, 1984.
- ALVES, G.S.; SANTOS, D.; SILVA, J.A.; NASCIMENTO, J. A.M.N.; CAVALCANTE, L.F.; DANTAS, T.A.G. Estado nutricional do pimentão cultivado em solo tratado com diferentes tipos de biofertilizantes. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 31, p. 661-665, 2009.
- ALVES, C.V.O. **Índice S relativo como avaliador da qualidade física e sua relação com atributos da fração porosa de um Cambissolo**. 2013. 72 p. (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2013.
- ARSHAD, M.A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agroecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 88, p. 153-160, 2002.
- BALL, B.C.; LANG, R.W.; ROBERTSON, E.A.G.; FRANKLIN, M.F. Crop performance and soil conditions on imperfectly drained loams after 20 and 25 years of conventional tillage or direct drilling. **Soil & Tillage Research**, v. 31, p. 97-118, 1994.
- BARRAL, M.T.; ARIASA, M.; GUÉRIF, J. Effects of iron and organic matter on the porosity and structural stability of soil aggregates. **Soil & Tillage Research**, v. 46, p. 261-272, 1998.
- BARROS, C.M.B. **Substratos e adubação foliar com biofertilizante na produção de mudas de maracujazeiro e mamoeiro**. 2011. 71 p. (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Estadual do Centro-Oeste, Guarapuava. 2011.
- BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Física de suelos. Mexico**. U.T.E.H.A. 1973, 529 p.
- BAVER, L.D. **The mechanical composition of soil physic**. New York: John Willey, 1956. p. 48-79.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre, Gênese, 1999. 508 p.

BENGHOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: A review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, v. 41, p. 341-358, 1990.

BERGAMIN, A.C.; VITORINO, A.C.T.; FRANCHINI, J.C.; SOUZA, C.M.A.; SOUZA, F.R. Compactação em um Latossolo Vermelho Distroférico e suas relações com o crescimento radicular do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, p. 681-691, 2010.

BETTIOL, W.; TRATCH, R.; GALVÃO, J. A. H. **Controle de doenças de plantas com biofertilizantes**. Jaguariúna: EMBRAPA-CNPMA, 1998. 22p. (EMBRAPA-CNPMA. Circular Técnica, 02).

BEUTLER, A.N.; SILVA, N.L.N.; CURI, N.; FERREIRA, M.M.; CRUZ, J.N. & PEREIRA FILHO, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 167-177, 2001.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SOUZA, Z.M.; ANDRIOLI, I. & ROQUE, C.G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 829-834, 2002.

BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; SILVA, A.P.; ROQUE, C.G. & FERRAZ, M.V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade do arroz sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, p. 575-580, 2004.

BLACKWELL, P.S.; RINGROSE-VOASE, A.J.; JAYAWARDANE, N.S.; OLSSON, K.A.; MCKENZIE, D.C. & MASON, W.K. The use of air-filled porosity and intrinsic permeability to air to characterize structure of macropore space and saturated hydraulic conductivity of clay soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 41, p. 215- 228, 1990.

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p. 363-375, 1986a. (Agronomy Monography, 9).

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Particle density. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p. 377-382, 1986b. (Agronomy Monography, 9).

BRANCALIÃO, S.R.; MORAES, M.H. Alterações de alguns atributos físicos e das frações húmicas de um Nitossolo Vermelho na sucessão milheto-soja em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 393-404, 2008.

BRAUNACK, W.A.; DEXTER, A.R. Soil aggregation in the seedbed: a review. II. Effect of aggregate sizes on plant growth. **Soil Tillage Research**, v. 14, p. 281-98, 1989.

BRASIL. Divisão de Pesquisa Pedológica. **Levantamento Exploratório: Reconhecimento de Solos do Estado do Ceará**. Recife, 1973. v. 1. (DNPEA. Boletim Técnico, 28; SUDENE. Série Pedologia, 16).

BRODERSEN, K. Leaching due to hygroscopic water uptake in cemented waste containing soluble salts. **Waste Management**, v. 12, p. 261-269, 1992.

BORMANN, H.; KLAASSEN, K. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils. **Geoderma**, v. 145, p. 295-302, 2008.

BUSSCHER, W.J.; BAUER, P.J.; CAMP, C.R.; SOJKA, R.E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil & Tillage Research**, v. 43, p. 205-217, 1997.

CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, p. 121-126, 1995.

CARVALHO, J.C.R.; SOUSA, C.S.; SOUSA, C.S. **Fertilizantes e Fertilização**. Cruz das Almas – BA, 2005. 159 p.

CAS, V.L.S. **Mineralização do carbono e do nitrogênio no solo com o uso do lodo de esgoto e palha de aveia**. 2009. 69 p. (Mestrado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2009.

CÁSSARO, F.A.M.; PIRES, L.F.; SANTOS, R.A.; GUIMÉNEZ, D.; REICHARDT, K. Funil de Haines modificado: curvas de retenção de solos próximos à saturação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p.2555-2562, 2008.

CASTRO FILHO, C.; LOGAN, T.J. Liming effects on the stability and erodibility of some Brazilian Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 1407-1413, 1991.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSH, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico em um Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.527- 538, 1998

CAVALIERI, K.M.V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; LEÃO, T.P.; DEXTER, A.R. e HÅKANSSON, I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 103, p. 158-164, 2009.

CELEDÔNIO, C.A. **Crescimento da figueira em três ambientes de cultivo, sob a aplicação de fertirrigação com biofertilizante bovino**. 2011. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Rural do Semiárido, Mossoró, 2011.

CHILDS, E.C. The use of soil moisture characteristics in soil studies. **Soil Science**, Baltimore, v. 50, p. 239-252, 1940.

CORRECHEL, V.; SILVA, A.P.; TORMENA, C.A. Influência da posição relativa à linha de cultivo sobre a densidade do solo em dois sistemas de manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 165-173, 1999.

COSTA, P.A.; MOTA, J.C.A.; ROMERO, R.E.; FREIRE, A.G.; FERREIRA, T.O. Changes in soil pore network in response to twenty-three years of irrigation in a tropical semiarid pasture from northeast Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 137, p. 23-32, 2014.

CRESCIMANNO, G.; LOVINO, M.; PROVENZANO, G. Influence of Salinity and Sodicy on Soil Structural and Hydraulic Characteristics. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 59, p.1701-1708, 1995.

CUNHA, E.Q.; STONE, L.F.; MOREIRA, J.A.A.; FERREIRA, E.P.B.; DIDONET, A.D.; LEANDRO, W.M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. I – Atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 589-602, 2011.

DALAL, R.C.; BRIDGE, B.J. Aggregation and organic matter storage in sub-humid and semi-arid soils. In: carter, M.R.; Stewart, B.A. (Eds.), **Structure and Organic Matter Storage in Agricultural Soils**. CRC Press, Boca Raton, FL, p. 263-307, 1996.

DANIELSON, R.E.; SUTHERLAND, P.L. Porosity. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 443-461, 1986. (Agronomy Monography, 9).

DANTAS, J.D.A.N.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONCA, E.S.; ASSIS, C.P. Qualidade de solo sob diferentes usos e manejos no Perímetro Irrigado Jaguaribe/Apodí, CE. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 18-26, 2012.

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.; BIRD, N.R.A. Methods for predicting the optimum and the range of water contents for tillage based on the water retention curve. **Soil & Tillage Research**, v.57, p. 203–212, 2001.

DEXTER, A.R.; CZYZ, E.A. Applications of S-theory in the study of soil physical degradation and its consequences. **Wiley Interscience**, 2007.

DIAS, T.J.; CAVALCANTE, L.F.; LEON, M.J.; SANTOS, G.P.; ALBUQUERQUE, R.P.F. Produção de maracujazeiro e resistência mecânica do solo com biofertilizante sob irrigação com águas salinas. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, p.644-651, 2011.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; LOPES, P.P. **Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo van Genuchten. Soil Water Retention Curve, SWRC (version 3.0 beta)**. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.

FAOSTAT – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS STATISTICS. **Statistics Database**. 2013. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/>>. Acesso em: 20 Junho 2013.

FERREIRA, M.M. **Caracterização física do solo**. In: VAN LIER, Q.J. (ed.) Física do Solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. cap. 1, p. 1-27.

FILGUEIRA, F. A. R. **Manual de olericultura: Agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2008. 402p.

FISH, A.N.; KOPPI, A.J. The use of a simple field air permeability as a rapid indicator of functional soil pore space. **Geoderma**, Amsterdam, v. 63, p. 255-264, 1994.

FOLK, R.L.; WARD, W.C. Brazos river bar: A study on the significance of grain-size parameters. **Journal of Sedimentary Petrology**, v. 27, p. 3-26, 1957.

FREIRE, A.G. **Índices de qualidade física para um Cambissolo em sistemas de manejo**. 2012. 83 p. (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2012.

GAMA-RODRIGUES, E.F.; GAMA-RODRIGUES, A.C. Biomassa microbiana e ciclagem de nutrientes. In: SANTOS, G.A.; SILVA, L.S.; CANELLAS, L.P. & CAMARGO, F.A.O., eds. **Fundamentos da matéria orgânica do solo ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole, p. 159-170, 2008.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, pt. 1, p. 383-411, 1986. (Agronomy Monography, 9).

GIALBIATTI, J.A.; GARCIA, A.; SILVA, M.L.O.; MASTROCOLA, M.A.; CALDEIRA, D.S. A. Efeitos de diferentes doses e épocas de aplicação de efluente de biodigestor e da adubação mineral em feijoeiro-comum (*Phaseolus vulgaris* L.) submetido a duas lâminas de água por meio de irrigação por sulco. **Científica**, São Paulo, v. 24, n.1, p. 63-74, 1996.

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

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

HILLEL, D. **Soil and water: physical principles and processes**. 3. ed. New York: Academic, 1972. 288 p.

HILLEL, D. **Introduction to environmental soil physics**. San Diego: Elsevier Academic Press, 2004, 494 p.

HUNTINGTON, T.G.; JOHNSON, C.E.; JOHNSON, A.H.; SICCANA, T.G.; RYAN, D.F. Carbon, organic matter, and bulk density relationships in a forested Spodosol. **Soil Science**, Baltimore, v. 148, p. 380-386, 1989.

INGARAMO, O.E. **Indicadores físicos de la degradación del suelo**. 2003. 298 f. Tese (Doutorado em Edafologia) - Universidade da Coruña, La Coruña, 2003.

ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Soil quality indicator properties in mid-Atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, v. 55, p. 69-78. 2000.

JONG VAN LIER, Q. **Física do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2010. v. 1. 298 p.

JONG VAN LIER, Q.; VIDAL-TORRADO, P. PHI: Programa de microcomputador para análise estatística da granulometria de sedimentos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 16, p. 277-281, 1992.

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.

JORGE, J.A.; CAMARGO, O.A.; VALADARES, J.M.A.S. Condições físicas de um Latossolo Vermelho-Escuro quatro anos após aplicação de lodo de esgoto e calcário. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 15, p. 237-240, 1991.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v. 23, p. 187-200, 1958.

KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R.F.; SCHUMAN, G.E. Soil quality: a concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 4-10, 1997.

KAY, B.D.; VANDENBYGAART, A.J. Conservation tillage and depth stratification of porosity and soil organic matter. **Soil & Tillage Research**, v. 66, p. 107-118, 2002.

KELLER, T.; HAKANSSON, I. Estimation of reference bulk density from soil particle size distribution and soil organic matter content. **Geoderma**, v. 154, p. 398-406, 2010.

KEMPER, W.D.; W.S. CHEPIL. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.499-510.

KEMPER, W.D. Aggregate stability. In: BLACK, C.A., ed. **Methods of soil analysis**. Madison, American Society of Agronomy, 1965. p.511-519.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. pt. 1, p. 425-442. (Agronomy Monography, 9).

KIEHL, E.J. **Manual de edafologia: Relações solo-planta**. Piracicaba: Ceres, 1979. 264 p.

KIMATURA, A.E.; ALVES, M.C.; SUZUKI, L.G.A.S.; GONZALEZ, A.P. Recuperação de um solo degradado com a aplicação de adubos verdes e lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 405-416, 2008.

KIRKHAM, D. Field method for determination of air permeability of soil in its undisturbed state. **Proceedings - Soil Science Society of America**, v. 11, p. 93-99, 1946.

KIRKHAM, D.; POWERS, W.L. **Advanced soil physics**. 2.ed. New York: Interscience, 1972. 548 p.

KLEIN, V.A. **Propriedades dos solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira**. Passo Fundo: ed. UPF, 2005. 61 p.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, p. 945-953, 2002.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: KLUTE, A. (ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, **Soil Science Society of America**, 1986. pt. 1, p. 635-662. (Agronomy Monography, 9).

LARSON, W.E.; GUPTA, S.C.; USECHE, R.A. Compression of agricultural soils from eight soil orders. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 450-457, 1980.

LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. **Defining soil quality for the sustainable environment**. Madison, **Soil Science Society of America**, 1994. (Publication Special, 35).

LEONEL, S.; DAMATTO JUNIOR, E.R. Efeitos do esterco de curral na fertilidade do solo, no estado nutricional e na produção da figueira. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 30, p. 534-539, 2008.

LEONEL, S.; TECCHIO, M.A. Épocas de poda e uso da irrigação em figueira 'Roxo de Valinhos' na região de Botucatu, SP. **Bragantia**, Jaboticabal, v. 69, n. 3, p. 571- 580, 2010.

LEY, G.J., LARYEA, K.B. Spatial variability in penetration resistance of a hardsetting tropical alfisol. **Soil & Tillage Research**. v.29, p. 367-381, 1994.

LIBARDI, P.L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2012, 346 p.

LIPIEC, J.; GLINSKI, J. **Field soil compaction: effects on soil physical properties and stomatal resistance of wheat**. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM "SOIL, HUMAN AND ENVIRONMENT INTERACTIONS", Beijing, 1997. Proceedings... Beijing, China Science and Technology Press, 1997. p. 422-427.

LOLL, P.; MOLDRUP, P.; SCHJONNING, P. & RILEY, H. Predicting saturated hydraulic conductivity from air permeability: Application in stochastic water infiltration modeling. **Water Resources Research**, v. 35, p. 2387-2400, 1999.

LUCAS, J.F.R.; TAVARES, M.H.F; CARDOSO, D.L.; CÁSSARO, F.A.M. Curva de retenção de água no solo pelo método o papel-filtro. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1957-1973, 2011.

LUCIANO, R.V.; ALBUQUERQUE, J.A.; COSTA, A.; BATISTELLA, B.; WARMLING, M.T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do Brasil **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 36, p. 1733-1744, 2012.

MACHADO, J.L.; TORMENA, C.A.; FIDALSKI, J.; SCAPIM, C.A. Inter- elações entre as propriedades físicas e os coeficientes da curva de retenção de água de um latossolo sob diferentes sistemas de uso. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 495-502, 2008.

MAIA, C.E. Índice S para avaliação da qualidade física de solos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1959-1965, 2011.

MAURI, J.; RUIZ, H.A.; FERNANDES, R.B.A.; KER, J.C.; REZENDE, L.R.M. Dispersantes químicos na análise granulométrica de latossolos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 1277-1284, 2011.

McQUEEN, D.J.; SHEPHERD, T.G. Physical changes and compaction sensitivity of a fine-textured, poorly drained soil (Typic Endoaquept) under varying durations of cropping, Manawatu Region, New Zealand. **Soil & Tillage Research**, v. 25, p. 217-230, 2002.

MEDEIROS, M.B.; LOPES, J.S. Biofertilizantes líquidos e sustentabilidade agrícola. **Bahia Agrícola**, Salvador, v. 7, p. 24-26, 2006.

MEDEIROS, D.C.; LIMA B.A.B.; BARBOSA, M.R.; ANJOS R.S.B.; BORGES, R.D.; Cavalcante Neto J. G.; Marques, L. F. Produção de mudas de alface com biofertilizantes e substratos. **Horticultura Brasileira**, Vitória da Conquista, v. 25, p. 433-436, 2007.

MEROTTO JR., A.; MUNDSTOCK, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 197-202, 1999.

MESQUITA, M.G.B.F.; MORAES, S.O. A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 963-969, 2004.

MODOLO, A.J.; FERNANDES, H.C.; SCHAEFER, G.C.E.; SILVEIRA, J.C.M. Efeito da compactação do solo sobre a emergência de plântulas de soja em sistema plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, p. 1259-1265, 2008.

MORET, D.; ARRÛE, J.L. Characterizing soil water-conducting macro- and mesoporosity as influenced by tillage using tension infiltrometry. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 71, p. 500–506, 2007.

MOTA, J.C.A.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; AMARO FILHO, J. & LIBARDI, P.L. Algumas propriedades físicas e hídricas de três solos na Chapada do Apodi, RN, cultivados com melão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 49-58, 2008.

MOTA, J.C.A. **Componentes do balanço de água em um Cambissolo cultivado com meloeiro irrigado por gotejamento, com e sem cobertura da superfície**. Piracicaba: ESALQ, 2010. 122 p. (Tese de Doutorado)

MOTA, J.C.A.; FREIRE, A.G. & ASSIS JÚNIOR, R.N. Qualidade física de um Cambissolo sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1196-1206, 2013.

MOTA, J.C.A.; ALVES, C.V.O.; FREIRE, A.G.; ASSIS JÚNIOR, R.N. Uni and multivariate analyses of soil physical quality indicators of a Cambisol from Apodi Plateau – CE, Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.140, p. 66-73, 2014.

MUNKHOLM, L.J.; SCHJØNNING, P. & KAY, B.D. Tensile strength of soil cores in relation to aggregate strength, soil fragmentation and pore characteristics. **Soil & Tillage Research**, v. 64, p. 125-135, 2002.

NEVES, C.M.N.N.; SILVA, M.L.N.; CURI, N.; CARDOSO, E.L.; MACEDO, R.L.G.; FERREIRA, M.M. & SOUZA, F.S. Atributos indicadores da qualidade do solo em sistema agrossilvopastoril no noroeste do Estado de Minas Gerais. **Scientia Forestalis**, v. 74, p. 45-53, 2007.

NOGUEIRA, F.A. **Influência da aplicação de um biofertilizante e matéria orgânica em algumas propriedades físicas de um Cambissolo da Chapada do Apodi-CE**. 2009. 68 p. (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. 2009.

NORTCLIFF, S. Standardization of soil quality attributes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 88, p. 161–168, 2002.

PAGLIAI, M.; PEZZAROSSA, B.; ZERBI, G.; ALVINO, A.; PINT, R.; VIGNA GUIDI, G. Soil Porosity in a Peach Orchard as Influenced by Water Table Depth. **Agricultural Water Management**, v. 16, p. 63-73, 1989.

PAGLIAI, M.; VITTORI ANTISARI, L. Influence of waste organic matter on soil micro and macrostructure. **Bioresource Technology**, v. 43, p. 205-213, 1993.

PALMEIRA, P.R.T.; PAULETTO, E.A.; TEIXEIRA, C.F.A.; GOMES, A.S.; SILVA, J.B. Agregação de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.23, p.189-195, 1999.

PEDROTTI, A.; PAULETTO, E.A.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M.M.; DIAS JUNIOR, M.S.; GOMES, A.S. & TURATTI, A.L. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 521-529, 2001.

PEDROTTI, A.; MELLO JÚNIOR, A.V. **Avanços em Ciência do Solo: a física do solo na produção agrícola e qualidade ambiental**. São Cristóvão: Editora da Universidade Federal de Sergipe, 2009. 212 p.

PENTEADO, S.R.; FRANCO, J.A.M. **Figó (Ficus carica L.)**. Manual técnico das culturas. Campinas: SAA/CATI/DCT, 1997. p. 127-139.

PIRES, L.F.; VILLANUEVA, F.C.; DIAS, N.M.P.; BACCHI, O.O.S.; REICHARDT, K. Chemical migration during soil water retention curve evaluation. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 83(3), p. 1097-1107, 2011.

RAWLS, W.J. Estimating soil bulk density from particle size analysis and organic matter content. **Soil Science**, Baltimore, v. 136, p. 48-55, 1983.

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.

RESSURECCION, A.C.; KAWAMOTO, K.; KOMATSU, T.; MOLDRUP, P.; OZAKI, N. & ROLSTON, D.E. Gas transport parameters along field transects of a volcanic soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 172, p. 3-16, 2007.

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.

RIGITANO, O. **A figueira cultivada no Estado de São Paulo**. 1955. 59 f. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 1955.

RODRIGUES, C. **Avaliação de dispersantes químicos e pré tratamento na determinação de argila de solos de mineralogia distintas**. 2008. 95 p. (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia. 2008.

RODRIGUES, S. **Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob plantio direto e preparo convencional**. 2009. 67 p. (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba. 2009.

RODRIGUES, S.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B.; ROSA, J.A., 2011. Permeabilidade ao ar em Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 35, p. 105-114, 2011.

RÜHLMANN, J.; KÖRSCHENS, M.; GRAEFE, J. A new approach to calculate the particle density of soils considering properties of the soil organic matter and the mineral matrix. **Geoderma**, v. 30, p. 272-283, 2006.

SANTOS, P.R. **Atributos do solo em função dos diferentes usos em perímetro irrigado do sertão de Pernambuco**. 2010. 113f. Tese (Doutorado em Ciências do Solo) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2010.

SANTOS, L.N.S.; PASSOS, R.B.; SILVA, L.V.M.; OLIVEIRA, P.P. GARCIA, G.O.; CECÍLIO, R.A. Avaliação de alguns atributos físicos de um Latossolo vermelho-amarelo sob diferentes coberturas vegetais. **Bioscience journal**, Uberlândia, v. 26, n. 6, p. 940-947, 2010.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI.M.; CONCEIÇÃO, P.C.; FABRÍCIO, C.A.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, L.D. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em mato grosso do sul. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 11-21, 2008.

SAYGIN, S.D.; CORNELIS, W.M.; ERPUL, G.; GABRIEL, D. Comparison of different aggregate stability approaches for loamy sand soils. **Applied Soil Ecology**, v. 54, p. 1-6, 2012.

SCHJØNNING, P.; THOMSEN, I.K.; MØBERG, J.P.; JONGE, H.; KRISTENSEN, K. & CHRISTENSEN, B.T. Turnover of organic matter in differently textured soils. I. Physical characteristics of structurally disturbed and intact soils. **Geoderma**, v. 89, p.177-198, 1999.

SHUKLA, M.K.; LAL, R.; EBINGER, M. Determining soil quality indicators by factor analysis. **Soil & Tillage Research**, v. 87, p. 194-204, 2006.

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

SILVA, M.L.N.; BLANCANEAUX, P.; LIMA, N.C.J.M.; MARQUES, J.J.G.S.M.; CARVALHO, A. M. Estabilidade e resistência de agregados de latossolo vermelho-escuro cultivado com sucessão milho-adubo verde. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v.33, p. 97-103, 1998.

SILVA, A.P.; TORMENA, A.C.; FIDALSKI, J.; IMHOFF, S. Funções de pedotransferência para as curvas de retenção de água e de resistência do solo à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 1-10, 2008.

SILVA, A.P.; LEÃO, T.P.; TORMENA, C.A.; GONÇALVES, A.C.A. Determinação da permeabilidade ao ar em amostras indeformadas de solo pelo método da pressão decrescente. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1535-1545, 2009.

SILVA, F.L. **Ambiência e biofertilização no cultivo orgânico de figo, em condições semiáridas**. 2012. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

SILVEIRA, L.R.; BRITO, A.S.; MOTA, J.C.A.; MORAES, S.O.; LIBARDI, P.L. Sistema de aquisição de dados para equipamento de medida da permeabilidade intrínseca do solo ao ar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 429-436, 2011.

SILVEIRA JUNIOR, S.D.; SILVA, A.P.; FIGUEIREDO, G.C.; TORMENO, C.A.; GIAROLA, N.F.B. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob plantio direto submetido à descompactação mecânica e biológica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, p. 1854-1867, 2012.

SKOOP, J.M. **Physical properties of primary particles**. M.E. Summer (Ed.), Handbook of soil science, CRC Press, Boca Raton (2002), pp. A1–A16.

SORT, X.; ALCANIZ, J.M. Modification of soil porosity after application of sewage sludge. **Soil & Tillage Research**. v. 49, p. 337-345, 1999.

SOUZA, G.G. **Enciclopédia Agrícola Brasileira E-H**. São Paulo - SP: Imprensa Oficial do Estado de São Paulo, v. 3, 2000. 512 p.

SOUZA, E.J.; CUNHA, F.F.; MAGALHÃES, F.F.; SILVA, T.R.; BORGES, M.C.R.Z.; ROQUE, C.G. Métodos para estimativa da umidade do solo na capacidade de campo. **Revista de Ciências Agro-Ambientais**, Alta Floresta, v. 11, p. 43-50, 2013.

STONE, L.F.; SILVEIRA, P.M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, p. 395-401, 2001.

STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. & HORN, R. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 2603-2612, 2008.

STRECK, C.A. **Índice S e fluxo de água e ar em solos do Sul do Brasil**. 2007. 95p. (Tese de Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

STUMPF, L. **Atributos físicos e mecânicos de um solo construído em área de mineração de carvão em Candiota-RS, cultivado com diferentes espécies**. 2011. 124 p. (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Pelotas, Fortaleza. 2011.

TABLE CURVE 2D. **Table Curve 2D (Trial Version 5.01)**, 2014. Disponível em: <<http://www.sigmaplot.com/products/tablecurve2d/tablecurve2d.php>>. Acesso em 19 de Maio de 2014.

TEJADA, M.; GONZALEZ, J.L.; GARCÍA-MARTÍNEZ, A.M.; PARRADO, J. Effects of different green manures on soil biological properties and maize yield. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 1758-1767, 2008.

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**, Viçosa, v. 22, p. 573-581, 1998.

TOTOU, A.R.; PEREIRA, C.A.; MACHADO, P.G.F.; BALTAR, C.A.M. Efeito da dispersão em polpas de minérios itabiríticos. **Revista Escola de Minas**, Ouro Preto, v. 64, p. 227-232, 2011.

TRATCH, R.; BETTIOL, W. Efeitos de biofertilizantes sobre o crescimento micelial e a germinação de esporos de alguns fungos fitopatogênicos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.32, p.1131-1139, 1997.

URACH, F.L. **Estimativa da retenção de água em solos para fins de irrigação**. 2007. 78 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

USDA - UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE. **Natural Resources Conservation Service**. Soil quality test kit guide. Washington, 1999. 82 p.

VALLADARES, G.S., GOMES, E.G., MELLO, J.C.C.B.S., PEREIRA, M.G., ANJOS, L.H.C., EBELING, A.G., BENITES, V.M. Análise dos componentes principais e métodos multicritério ordinais no estudo de Organossolos e solos afins. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 285-296, 2008.

VAN BAVEL, C. H. M. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. **Proceedings - Soil Science Society of America**, v. 14, p. 20-23, 1949.

VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 44, p. 892-897, 1980.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, p. 213-223, 2011.

VIDAL-BEAUDET, L.; CHARPENTIER, S. Percolation theory and hydrodynamics of soil-peat mixtures. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, p. 827-835, 2000.

VON LUTZOW, M.; LIEFELD, J.; KAINZ, M.; KOGEL-KNABER, I.; MUNCH, J.C. Indications for soil organic matter quality in soils under different management. **Geoderma**, v. 105, p. 243-258, 2002.

WILSON, M.J.; MALISZEWSKA-KORDYBACH, B. (Eds.), 2000. **Soil quality, sustainable agriculture and environmental security in central and eastern Europe**. NATO Science Series 2, Environmental Security, vol. 69. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, p. 375.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the rocky mountains: guide for selection of practices for soil and water conservation. Washington, **Agricultural Research Service**, 1965. 47 p. (Agriculture Handbook, 282).

XLSTAT. **Xlstat 2013 add-in for Excel (Trial Version)**. New York, 2013. Disponível em: <<http://www.xlstat.com>>. Acesso em 25 de Março de 2014.

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.

ZALIDIS, G.; STAMATIADIS, S.; TAKAVAKOGLU, V.; ESKRIDGE, K.; MISOPOLINOS, N. Impacts of agricultural practices on soil and water quality in the Mediterranean region and proposed assessment methodology. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 88, p. 137-146, 2002.

ZHANG, H.; HARTGE, K.J.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactibility. **Soil Science Society of America Journal**, v. 61, p. 239-245, 1997.

APÊNDICES

APÊNDICE A – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA GRAU DE FLOCULAÇÃO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,0-0,1 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	2195,70200	548,92550	14,6466**
Resíduo	15	562,17000	37,47800	
Total	19	2757,87200		
MG = 28,82000		CV (%) = 21,24		

Fonte: Autor.

APÊNDICE B – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA GRAU DE FLOCULAÇÃO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,1-0,2 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	960,01300	240,00325	2,5743 ^{ns}
Resíduo	15	1398,43250	93,22883	
Total	19	2358,44550		
MG = 35,21500		CV (%) = 27,42		

Fonte: Autor.

APÊNDICE C – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA GRAU DE FLOCULAÇÃO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,2-0,3 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	91,07200	22,76800	0,1785 ^{ns}
Resíduo	15	1913,71750	127,58117	
Total	19	2004,78950		
MG = 37,40500		CV (%) = 30,20		

Fonte: Autor.

APÊNDICE D – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA DENSIDADE DE PARTÍCULAS, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,0-0,1 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,00360	0,00090	2,2594 ^{ns}
Resíduo	15	0,00598	0,00040	
Total	19	0,00958		
MG = 2,56750		CV (%) = 0,78		

Fonte: Autor.

APÊNDICE E – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA DENSIDADE DE PARTÍCULAS, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,1-0,2 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,00498	0,00125	1,9453 ^{ns}
Resíduo	15	0,00960	0,00064	
Total	19	0,01458		
MG = 2,58100		CV (%) = 0,98		

Fonte: Autor.

APÊNDICE F – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA DENSIDADE DE PARTÍCULAS, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,2-0,3 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,00900	0,00225	1,6383 ^{ns}
Resíduo	15	0,02060	0,00137	
Total	19	0,02960		
MG = 2,57000		CV (%) = 1,44		

Fonte: Autor.

APÊNDICE G – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA DENSIDADE DO SOLO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,0-0,1 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,04897	0,01224	1,2706 ^{ns}
Resíduo	15	0,14453	0,00964	
Total	19	0,19349		
MG = 1,51050		CV (%) = 6,50		

Fonte: Autor.

APÊNDICE H – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA DENSIDADE DO SOLO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,1-0,2 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,00428	0,00107	0,1083*
Resíduo	15	0,14820	0,00988	
Total	19	0,15248		
MG = 1,52400		CV (%) = 6,52		

Fonte: Autor.

APÊNDICE I – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA DENSIDADE DO SOLO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,2-0,3 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,05177	0,01294	3,0275 ^{ns}
Resíduo	15	0,06413	0,00428	
Total	19	0,11590		
MG = 1,51550		CV (%) = 4,31		

Fonte: Autor.

APÊNDICE J – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA CARBONO ORGÂNICO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,0-0,1 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	28,09700	7,02425	1,2041 ^{ns}
Resíduo	15	87,50500	5,83367	
Total	19	115,60200		
MG = 14,23000		CV (%) = 16,97		

Fonte: Autor.

APÊNDICE K – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA CARBONO ORGÂNICO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,1-0,2 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	65,92300	16,48075	1,6389 ^{ns}
Resíduo	15	150,84250	10,05617	
Total	19	216,76550		
MG = 10,56500		CV (%) = 30,02		

Fonte: Autor.

APÊNDICE L – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA CARBONO ORGÂNICO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,2-0,3 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	54,93700	13,73425	2,5731 ^{ns}
Resíduo	15	80,06500	5,33767	
Total	19	135,00200		
MG = 9,23000		CV (%) = 25,03		

Fonte: Autor.

APÊNDICE M – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA ESTABILIDADE DE AGREGADOS, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,0-0,1 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	5486,23232	1371,55808	5,4270 ^{**}
Resíduo	15	3790,94570	252,72971	
Total	19	9277,17802		
MG = 68,62700		CV (%) = 23,17		

Fonte: Autor.

APÊNDICE N – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA ESTABILIDADE DE AGREGADOS, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,1-0,2 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	2572,76300	643,19075	4,6511 [*]
Resíduo	15	2074,33500	138,28900	
Total	19	4647,09800		
MG = 74,41000		CV (%) = 15,80		

Fonte: Autor.

APÊNDICE O – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA ESTABILIDADE DE AGREGADOS, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,2-0,3 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	4673,38300	1168,34575	3,3278 [*]
Resíduo	15	5266,34500	351,08967	
Total	19	9939,72800		
MG = 62,26000		CV (%) = 30,10		

Fonte: Autor.

APÊNDICE P – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA DIÂMETRO MÉDIO PONDERADO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,0-0,1 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	3,69797	0,92449	7,9782**
Resíduo	15	1,73815	0,11588	
Total	19	5,43612		
MG = 2,60200		CV (%) = 13,08		

Fonte: Autor.

APÊNDICE Q – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA DIÂMETRO MÉDIO PONDERADO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,1-0,2 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	1,88357	0,47089	4,4957*
Resíduo	15	1,57115	0,10474	
Total	19	3,45472		
MG = 2,68200		CV (%) = 12,07		

Fonte: Autor.

APÊNDICE R – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA DIÂMETRO MÉDIO PONDERADO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,2-0,3 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	4,14485	1,03621	9,1145**
Resíduo	15	1,70533	0,11369	
Total	19	5,85017		
MG = 2,45750		CV (%) = 13,72		

Fonte: Autor.

APÊNDICE S – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,0-0,1 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,38093	0,09523	0,9133 ^{ns}
Resíduo	15	1,56413	0,10428	
Total	19	1,94506		
MG = 0,96650		CV (%) = 33,41		

Fonte: Autor.

APÊNDICE T – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,1-0,2 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,95112	0,23778	2,1650 ^{ns}
Resíduo	15	1,64744	0,10983	
Total	19	2,59857		
MG = 1,00685		CV (%) = 32,92		

Fonte: Autor.

APÊNDICE U – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,2-0,3 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,20857	0,05214	0,6768 ^{ns}
Resíduo	15	1,15573	0,07705	
Total	19	1,36429		
MG = 1,07550		CV (%) = 25,81		

Fonte: Autor.

APÊNDICE V – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA PERMEABILIDADE INTRÍSECA DO SOLO AO AR, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,0-0,1 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,38857	0,09714	8,3816 ^{**}
Resíduo	15	0,17385	0,01159	
Total	19	0,56242		
MG = 1,65700		CV (%) = 6,50		

Fonte: Autor.

APÊNDICE W – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA PERMEABILIDADE INTRÍSECA DO SOLO AO AR, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,1-0,2 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	1,16278	0,29069	10,4248 ^{**}
Resíduo	15	0,41827	0,02788	
Total	19	1,58105		
MG = 1,56350		CV (%) = 10,68		

Fonte: Autor.

APÊNDICE X – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA PERMEABILIDADE INTRÍSECA DO SOLO AO AR, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,2-0,3 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	1,35440	0,33860	7,9771 ^{**}
Resíduo	15	0,63670	0,04245	
Total	19	1,99110		
MG = 1,27500		CV (%) = 16,16		

Fonte: Autor.

APÊNDICE Y – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA ÍNDICE S, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,0-0,1 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,00133	0,00033	2,1866 ^{**}
Resíduo	15	0,00228	0,00015	
Total	19	0,00362		
MG = 0,06695		CV (%) = 18,43		

Fonte: Autor.

APÊNDICE Z – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA ÍNDICE S, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,1-0,2 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,00069	0,00017	2,1292**
Resíduo	15	0,00228	0,00008	
Total	19	0,00191		
MG = 0,06780		CV (%) = 13,28		

Fonte: Autor.

APÊNDICE AA – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA ÍNDICE S, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,2-0,3 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,00206	0,00051	4,0564**
Resíduo	15	0,00190	0,00013	
Total	19	0,00396		
MG = 0,07905		CV (%) = 14,25		

Fonte: Autor.

APÊNDICE AB – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA ÍNDICE S_{RELATIVO}, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,0-0,1 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,67028	0,16757	2,1785**
Resíduo	15	1,15378	0,07692	
Total	19	1,82406		
MG = 1,51650		CV (%) = 18,29		

Fonte: Autor.

APÊNDICE AC – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA ÍNDICE S_{RELATIVO}, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,1-0,2 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	0,40798	0,10199	2,2589**
Resíduo	15	0,67728	0,04515	
Total	19	1,08526		
MG = 1,60850		CV (%) = 13,21		

Fonte: Autor.

APÊNDICE AD – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA ÍNDICE S_{RELATIVO}, EM ÁREAS SOB CULTIVO DE FIGO E MATA NATIVA NA CAMADA DE 0,2-0,3 m.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	1,11973	0,27993	4,0985*
Resíduo	15	1,02453	0,06830	
Total	19	2,14425		
MG = 1,83850		CV (%) = 14,22		

Fonte: Autor.

APÊNDICE AE – ANÁLISE ESTATÍSTICA PARA MÉTODOS DE OBTENÇÃO DO ÍNDICE S_{RELATIVO}.

FV	GL	SQ	QM	F
Tratamentos	4	2,70153	0,67538	2,7320 ^{ns}
Resíduo	15	3,70818	0,24721	
Parcelas	19	6,40971		
Trat-b (Tb)	2	0,18533	0,09266	0,9935 ^{ns}
Int. Ta x Tb	8	2,25460	0,28183	3,0215*
Resíduo-b	30	2,79818	0,09327	
Subparcels	59	11,64781		
Trat-c (Tc)	3	26,15290	8,71763	1893,1695**
Int. Ta x Tc	12	0,24170	0,02014	4,3741**
Int. Tb x Tc	6	2,65000	0,44167	95,9148**
Int.Ta x Tb x Tc	24	0,20908	0,00871	1,8919*
Resíduo-c	135	0,62165	0,00460	
Total	239	41,52314		

Fonte: Autor.