

Qualidade física de um Luvissole cultivado com sistemas agroflorestais e convencional no semi-árido cearense

GIOVANA LOPES DA SILVA

MAIO – 2008  
FORTALEZA – CEARÁ  
BRASIL

Qualidade física de um Luvissole cultivado com sistemas agroflorestais e convencional no semi-árido cearense

GIOVANA LOPES DA SILVA

Dissertação submetida  
à Coordenação do Curso de Pós-Graduação  
em Agronomia, Área de Concentração em  
Solos e Nutrição de Plantas, da  
Universidade Federal do Ceará - UFC,  
como parte das exigências para a obtenção  
do título de Mestre.

**MAIO - 2008**  
**FORTALEZA - CEARÁ**  
**BRASIL**

S58q

Silva, Giovana Lopes da

Qualidade física de um luvissole cultivado com sistemas agroflorestais e convencional no semi-árido cearense [manuscrito] / Giovana Lopes da Silva  
68 f. : il. color. ; enc.

Orientador: Teógenes Senna de Oliveira

Co-orientador: Herdjania Veras de Lima

Área de concentração: Solos e nutrição de plantas

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008

1. Ecologia agrícola 2. Solos – Estrutura 3. Curva de retenção de água 4. Intervalo hídrico ótimo 5. Índice S I. Oliveira, Teógenes Senna de (orient.)  
II. Universidade Federal do Ceará – Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas III. Título

CDD 631.4

Esta Dissertação foi submetida como parte dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Agronomia, Área de Concentração em Solos e Nutrição de Plantas, outorgado pela Universidade Federal do Ceará. Uma via do presente estudo encontra-se à disposição dos interessados na Biblioteca de Ciência e Tecnologia da referida Universidade.

A citação de qualquer trecho desta dissertação é permitida, desde que seja feita de conformidade com as normas da ética científica.

---

Giovana Lopes da Silva

Dissertação aprovada em 30/05/2008

---

Prof. Teógenes Senna de Oliveira – Doutor  
(Orientador)

---

Prof. Herdjanía Veras de Lima – Doutora  
(Co-orientadora)

---

Prof. Francisco Marcus Lima Bezerra – Doutor  
(Examinador)

---

Maria Eugenia Ortiz Escobar – Doutora  
(Examinadora)

*Dedico às pessoas de maior importância em minha vida: Meus pais, José Maria e Maria Amazonita, por todo amor e educação que me deram, à minha irmã, Maria Luíza por toda sua graça e carinho a cada amanhecer e ao meu namorado, Geocleber por me dar tanto amor e carinho.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, acima de tudo e de todos.

À Universidade Federal do Ceará, pela oportunidade que me foi dada para obtenção do Título de Mestre em Solos e Nutrição de Plantas.

Ao Departamento de Ciências do Solo e aos seus funcionários.

À coordenação do Curso de Pós-graduação, principalmente ao Professor Ricardo, por seu bom humor, sorrisos e descontração, por suas aulas tão dinâmicas e alegres, por toda sua atenção nos momentos mais delicados desta caminhada e ao Professor Assis Júnior, por seus grandes ensinamentos nas curtas conversas. Saiba que admiro sua inteligência, sua calma e seu equilíbrio. Agradeço por me mostrar “O solo da física e a física do solo”.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ), pois a maior parte das análises foram realizadas em seu Laboratório de Física do Solo pertencente ao Departamento de Solos e Nutrição de Plantas.

À Fundação Cearense de Apoio à Pesquisa (FUNCAP) pelo concedimento da bolsa, através desta pude custear as despesas diárias necessárias para o desenvolvimento deste estudo.

Agradeço aos professores que tive oportunidade de ser aluna durante o curso de mestrado, aos ensinamentos e lições que me foram dadas, cada um à sua maneira de ensinar, mas o mais importante, é que as suas mensagens foram passadas.

Ao idealizador deste trabalho, meu orientador, Professor Teógenes Senna de Oliveira. Agradeço pela sua orientação, ensinamentos, conselhos, puxões de orelhas, enfim, por ter me feito melhorar como estudante e como profissional.

À Professora Herdjanía Veras de Lima da Universidade Federal Rural da Amazônia, por sua co-orientação neste trabalho, a qual foi fundamental para minha maior compreensão e também pela sua amizade, carinho e atenção. Não posso deixar de agradecer ao Paulo, esposo da Herd, tanto pela sua atenção, como pelos seus conselhos.

Ao meu Geo, meu amor, por todo seu carinho, companheirismo e ternura. Tudo isso foi fundamental para que eu melhorasse meu desempenho e me tornasse uma pessoa mais feliz. Este espaço é muito pequenininho para demonstrar todo meu sentimento de amor e gratidão por essa pessoa tão especial que conheci no decorrer desta caminhada.

Aos amigos e amigas bolsistas e estudantes do Departamento.

Às amigas Eveline, Juliana, Ana Paula e Nílvia Nara pela amizade e por todo apoio e incentivo.

À Elinete, minha amiga de mestrado e companheira de estudos, quem esteve sempre comigo, nos momentos alegres e tristes.

À Rafaella por todo esse tempo de amizade, pela força e estímulo que me deu e pela sua colaboração no trabalho com a elaboração do mapa da área experimental.

À Joedna, que deixou saudades, pela amizade e simpatia, por colaborar comigo durante o curso de mestrado.

Espero que este momento não seja somente o fim de um trabalho, mas o começo de muitos outros!

## ÍNDICE

<b>LISTA DE FIGURAS</b> .....	<b>ix</b>
<b>LISTA DE TABELAS</b> .....	<b>xi</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>xii</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xiv</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>3</b>
<b>2.1. Sistemas agroflorestais (SAFs)</b> .....	<b>3</b>
<b>2.2. Curva de retenção de água no solo (CRA)</b> .....	<b>5</b>
<b>2.3. Qualidade física do solo</b> .....	<b>7</b>
<b>2.4. Intervalo hídrico ótimo (IHO)</b> .....	<b>8</b>
<b>2.5. Índice S</b> .....	<b>10</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>15</b>
<b>3.1. Localização das áreas</b> .....	<b>15</b>
<b>3.2. Descrição dos tratamentos</b> .....	<b>15</b>
<b>3.3. Coleta e análises</b> .....	<b>19</b>
<b>3.3.1. Análise granulométrica</b> .....	<b>19</b>
<b>3.3.2. Carbono orgânico total (COT)</b> .....	<b>19</b>
<b>3.3.3. Densidade de partículas</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3.4. Determinação da curva de retenção de água no solo</b> .....	<b>20</b>
<b>3.3.5. Resistência à penetração (RP)</b> .....	<b>21</b>
<b>3.3.6. Densidade do solo (Ds)</b> .....	<b>21</b>
<b>3.3.7. Intervalo hídrico ótimo (IHO)</b> .....	<b>22</b>
<b>3.3.8. Cálculo do índice S</b> .....	<b>24</b>
<b>3.3.9. Análises estatísticas</b> .....	<b>25</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>26</b>
<b>4.1. Intervalo hídrico ótimo</b> .....	<b>26</b>
<b>4.2. Índice S</b> .....	<b>38</b>
<b>5. CONCLUSÃO</b> .....	<b>45</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	<b>46</b>

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** (A) Exemplo de uma curva de retenção de água mostrando o ponto de inflexão e a inclinação, da tangente da curva no ponto de inflexão ( $\tan \omega$ ). (B) Curvas de retenção de água de um solo franco-areno-argiloso em duas diferentes densidades de solo. Adaptado de Dexter (2004a).....12
- Figura 2.** Caracterização da área experimental no município de Sobral-CE.....16
- Figura 3.** Variação do conteúdo de água com a Ds nos níveis críticos da capacidade de campo ( $\psi = -0,01$  MPa), ponto de murcha permanente ( $\psi = 1,5$  MPa), porosidade de aeração de 10% e resistência à penetração de 3,5 MPa no sistema agrissilvipastoril na camada de 0 a 5 cm. A área hachurada representa o IHO do solo. A densidade em que a porosidade de aeração substitui a capacidade campo como limite superior do IHO é demonstrada em (a) e densidade crítica (Dsc) em (b). ■ =  $\theta_{RP}$ ; ● =  $\theta_{CC}$ ; ▲ =  $\theta_{PMP}$  e ▼ =  $\theta_{PA}$ .....29
- Figura 4.** Variação do conteúdo de água com a Ds nos níveis críticos da capacidade de campo ( $\psi = -0,01$  MPa), ponto de murcha permanente ( $\psi = 1,5$  MPa), porosidade de aeração de 10% e resistência à penetração de 3,5 MPa no sistema silvipastoril na camada de 0 a 5 cm. A área hachurada representa o IHO do solo. A densidade em que a porosidade de aeração substitui a capacidade campo como limite superior do IHO é demonstrada em (a) e densidade crítica (Dsc) em (b). ■ =  $\theta_{RP}$ ; ● =  $\theta_{CC}$ ; ▲ =  $\theta_{PMP}$  e ▼ =  $\theta_{PA}$ .....30
- Figura 5.** Variação do conteúdo de água com a Ds nos níveis críticos da capacidade de campo ( $\psi = -0,01$  MPa), ponto de murcha permanente ( $\psi = 1,5$  MPa), porosidade de aeração de 10% e resistência à penetração de 3,5 MPa no sistema vegetação natural na camada de 0 a 5 cm. A área hachurada representa o IHO do solo. A densidade em que a porosidade de aeração substitui a capacidade campo como limite superior do IHO é demonstrada em (a) e densidade crítica (Dsc) em (b). ■ =  $\theta_{RP}$ ; ● =  $\theta_{CC}$ ; ▲ =  $\theta_{PMP}$  e ▼ =  $\theta_{PA}$ .....31

<b>Figura 6.</b>	<p>Variação do conteúdo de água com a Ds nos níveis críticos da capacidade de campo (<math>\psi = -0,01</math> MPa), ponto de murcha permanente (<math>\psi = 1,5</math> MPa), porosidade de aeração de 10% e resistência à penetração de 3,5 MPa no sistema cultivo intensivo em pousio na camada de 0 a 5 cm. A área urada representa o IHO do solo. A densidade em que a porosidade de aeração substitui a capacidade campo como limite superior do IHO é demonstrada em (a) e densidade crítica (Dsc) em (b). ■ = <math>\theta_{RP}</math>; ● = <math>\theta_{CC}</math>; ▲ = <math>\theta_{PMP}</math> e ▼ = <math>\theta_{PA}</math>.....32</p>
<b>Figura 7.</b>	<p>Variação da densidade do solo nas amostras coletadas, em função da densidade do solo crítica (Dsc), no Luvisolo sob sistemas agroflorestais, convencional e vegetação natural na camada de 0 a 5 cm na fazenda Crioula no CNPC, Sobral - CE. <b>AGP:</b> Agrissilvipastoril; <b>SILV:</b> Silvipastoril; <b>CIP:</b> Cultivo intensivo em pousio; <b>VN:</b> Vegetação natural.....35</p>
<b>Figura 8.</b>	<p>Variação do IHO em função da densidade do solo (Ds) em Luvisolos sob sistemas agroflorestais, convencional e vegetação natural na camada de 0 a 5 cm na Fazenda Crioula no CNPC, Sobral - CE. <b>AGP:</b> Agrissilvipastoril; <b>SILV:</b> Silvipastoril; <b>CIP:</b> Cultivo intensivo em pousio; <b>VN:</b> Vegetação natural.....38</p>
<b>Figura 9.</b>	<p>Índice S em função dos teores de carbono orgânico total (COT) no Luvisolo sob sistemas agroflorestais, convencional e vegetação natural.....41</p>
<b>Figura 10.</b>	<p>Índice S em função da densidade do solo (Ds) no Luvisolo sob sistemas agroflorestais, convencional e vegetação natural.....42</p>
<b>Figura 11.</b>	<p>Distribuição do tamanho de poros determinado pela derivação da equação de ajuste da curva de retenção (eq. 10) em relação ao logaritmo do raio do poro no Luvisolo sob sistemas agroflorestais, convencional e vegetação natural na camada de 0 a 5 cm na fazenda Crioula no CNPC, Sobral – CE.....43</p>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b>	Características físicas e químicas da camada de 0-6 cm do solo sob as quatro áreas estudadas na Fazenda Crioula no CNPC, Sobral – CE no ano de 2003 (adaptado de Maia, 2006).....	18
<b>Tabela 2.</b>	Contrastes ortogonais (C) utilizados na comparação entre os diferentes sistemas de manejo.....	25
<b>Tabela 3.</b>	Estimadores dos parâmetros para as variáveis físicas do solo determinadas nas amostras com estrutura indeformada, conteúdo de água volumétrico da água do solo, densidade do solo e resistência à penetração do solo.....	26
<b>Tabela 4.</b>	Modelos de regressão ajustados para o conteúdo de água volumétrico da água do solo ( $\theta = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em função da densidade ( $D_s = \text{Mg m}^{-3}$ ) e do potencial mátrico ( $\psi = \text{cm}$ ) e para a resistência à penetração do solo (RP = MPa), em função do conteúdo de água volumétrico ( $\theta = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) e densidade do solo ( $D_s = \text{Mg m}^{-3}$ ) utilizadas na delimitação do IHO, para todos os tratamentos em estudo.....	28
<b>Tabela 5.</b>	Distribuição das partículas por tamanho e classificação textural do solo submetido a diferentes sistemas de manejo na camada de 0 a 5 cm, na Fazenda Crioula – CNPC, Sobral – CE.....	36
<b>Tabela 6.</b>	Parâmetros referentes à equação de van Genuchten (1980) e índice de qualidade física do solo (S) no Luvisolo sob sistemas agroflorestais, convencional e vegetação natural, na fazenda Crioula no CNPC, Sobral – CE.....	39
<b>Tabela 7.</b>	Médias e significância de contrastes ( $P < 0,05$ ) de carbono orgânico total (COT) e densidade do solo ( $D_s$ ) no Luvisolo sob sistemas agroflorestais, convencional e vegetação natural na camada de 0 a 5 cm na fazenda Crioula no CNPC, Sobral – CE.....	40

## RESUMO

A introdução de sistemas agrícolas no ecossistema natural altera o equilíbrio do solo, com reflexos na sua qualidade, cujos impactos dependerão do tipo de manejo utilizado e da capacidade de suporte do solo. Uma das alternativas é a adoção dos sistemas agroflorestais, pois tais sistemas promovem a proteção do solo e são capazes de manter a sua qualidade em condições semelhantes a do solo sob vegetação natural, já que as árvores favorecem as propriedades físicas do solo. Assim foi desenvolvido um estudo com o objetivo de avaliar a qualidade física e estrutural em um Luvissole no semi-árido cearense cultivado com sistemas de manejo agroflorestal (SAFs) e convencional, utilizando o Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) e o Índice S. A área em estudo localiza-se na Fazenda Crioula em Sobral – CE, pertencente à EMBRAPA – CNPC. Os tratamentos selecionados, para tal estudo foram: Agrissilvipastoril (AGP), Silvipastoril (SILV), Vegetação Natural (VN) e Cultivo Intensivo em Pousio (CIP). As amostras foram submetidas a um gradiente de tensão de água sendo posteriormente utilizadas nas determinações de densidade do solo (Ds), resistência à penetração de raízes (RP) e umidade volumétrica ( $\theta$ ). Em seguida, os resultados foram utilizados para os ajustes das curvas de retenção de água (CRA) e de resistência à penetração (CRP). Através da CRA e da CRP, foi possível quantificar o IHO e a densidade do solo crítica (Dsc). Determinou-se também os valores dos parâmetros da equação de van Genuchten, para determinação do índice S. Os SAFs apresentaram melhores condições físicas e estruturais para o crescimento das plantas, tanto pela avaliação do IHO, como pelo

índice S. O CIP, apresentou o menor IHO e o menor valor de S, indicando uma maior degradação física e estrutural para o solo deste tratamento.

**Palavras-chave:** *agroecologia, estrutura, índice S, intervalo hídrico ótimo, retenção de água*

## SUMMARY

The introduction of agricultural systems in the natural ecosystem changes the balance of the soil, with reflections on their quality, whose impact will depend on the type of management used and the capacity to support the ground. One of the alternatives is the adoption of agroforestry systems, because these systems promote the protection of soil and are able to maintain their quality under similar conditions, the soil under natural vegetation, since the trees, encourage the soil physical properties. So a study was carried out to evaluate the quality of physical and structural Luvisolo in the semi-arid of Ceará cultivated with agroforestry systems (SAFs) and conventional, using the Least Limiting Water Range (LLWR) and the Index S. The area under study is located on the farm in Crioula Sobral - CE and belongs to the EMBRAPA - CNPC. The treatments selected for this study were: Agrosilvipasture (AGP), Silvipasture (SILV), Natural Vegetation (VN) and Intensive Cropping (CIP). The samples were subjected to a voltage gradient of water and then used in determination of soil density (Ds), resistance to penetration of roots (RP) and volumetric moisture ( $\theta_v$ ). Then, the results were used for the adjustment of the retention curve of water (CRA), and resistance to penetration (CRP). Through the CRA and the CRP, it was possible to quantify the LLWR and soil critic density (Dsc). There is also the determinate the values of the van Genuchten parameters, for determining the index S. The SAFs showed better physical and structural conditions for plants growth, both for the evaluation of the IHO, and the index S. The CIP, presented

the lowest IHO and the lowest value of S, indicating greater physical and structural degradation to soil this treatment.

**Key words:** *agroecology, structure, index S, least limiting water range, water retention*

## 1. INTRODUÇÃO

A necessidade crescente por alimentos tem levado o ser humano a uma exploração intensiva dos recursos naturais e como consequência torna-se iminente o esgotamento desses recursos. O solo, um desses recursos básicos dentro dos ecossistemas, encontra-se em adiantado estado de degradação em diversas regiões do mundo.

A introdução de sistemas agrícolas e pecuários para geração de alimentos, no ecossistema natural altera o equilíbrio do solo, com reflexos na sua qualidade, cujos impactos dependerão do tipo de manejo utilizado e da capacidade de suporte do solo. Do ponto de vista agrônomo, um solo apresenta alta qualidade quando suas funções permitem que o crescimento das plantas seja elevado e sustentado (Goedert & Oliveira, 2007).

O solo é um ambiente complexo onde interagem inúmeros processos relacionados aos aspectos químicos, físicos e biológicos (Tótola & Chaer, 2002). O manejo intensivo do solo pode prejudicar a interação desses processos e acelerar a sua degradação. A diminuição da qualidade química interfere nos teores de elementos no solo, essenciais à planta, na capacidade de troca de cátions, no pH e na matéria orgânica prejudicando a fertilidade do solo. A perda da qualidade física diminui o espaço poroso do solo, prejudicando o fornecimento de água e oxigênio afetando o desenvolvimento das plantas (Tormena et al., 1998a). Esses fatores acarretam no decréscimo do potencial produtivo dos solos.

A qualidade física do solo é conhecida como a capacidade do solo em promover ao sistema radicular condições físicas adequadas para o crescimento e desenvolvimento das plantas. As alterações causadas pelo manejo inadequado refletem em condições que dificultam o crescimento radicular, através do aumento da densidade e da redução da macroporosidade.

A região semi-árida do nordeste brasileiro é caracterizada por altas temperaturas, irregularidade pluviométrica, solos pouco intemperizados e pequena produção de fitomassa (Duque, 2004). Como resultado à soma destes fatores relacionados, esta região configura-se em um ambiente extremamente frágil (Bremen & Kessler, 1997). Neste contexto, opções racionais de uso do solo devem ser propostas e estudadas. Dentro de tais propostas, inclui-se a adoção de sistemas agroflorestais (SAFs). Esses sistemas são formas de uso da terra que através da diversidade de espécies e sua proximidade com as condições naturais propiciam um maior equilíbrio ecológico aos agroecossistemas. Apresentam inúmeras vantagens: favorecem o aporte contínuo de matéria orgânica, reduz a acidez e a salinidade no solo, melhoram a ciclagem de nutrientes e mantêm a estabilidade do meio físico, conseqüentemente, melhoram as condições de infiltração e retenção de água, que somadas à cobertura do solo, reduzem os danos causados pela erosão.

Várias abordagens têm sido feitas para a avaliação da qualidade física do solo, entre as quais o intervalo hídrico ótimo (IHO) e o índice S. O intervalo hídrico ótimo é um parâmetro que integra três fatores relacionados ao crescimento das plantas: aeração, água e resistência à penetração, sendo conhecido como indicador da qualidade física do solo. O índice S é um índice de qualidade física e estrutural do solo determinado a partir da curva de retenção de água que expressa fisicamente a distribuição do tamanho dos poros.

A qualidade física do solo tem sido, na atualidade, alvo de muitos estudos, porém existem poucas pesquisas envolvendo os sistemas agroflorestais e principalmente em regiões semi-áridas. A hipótese deste trabalho é de que os solos sob manejo agroflorestal apresentam uma melhor estrutura e maior capacidade de retenção de água favorecendo assim, a sua qualidade física. Neste contexto pretende-se com o presente trabalho avaliar a qualidade física e estrutural de um Luvissole no semi-árido cearense, cultivado com sistemas de manejo agroflorestal e convencional, utilizando o intervalo hídrico ótimo e o índice S.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. Sistemas Agroflorestais (SAFs)

A implementação do modelo de modernização da agricultura brasileira contribuiu, significativamente para a expansão da fronteira agrícola e o aumento da produção e da produtividade da agricultura e pecuária nacional (Rodigheri, 1997). Entretanto, esse desempenho causado pelo uso excessivo de cultivares e híbridos, adubos químicos e mecanização, faz com que o solo agrícola fique susceptível à degradação. Com isso o modelo atual da agricultura tem sido muito questionado do ponto de vista ambiental, buscando-se alternativas que interfiram o mínimo possível nos ecossistemas naturais.

Assim, dentro das atividades agropecárias, os SAFs surgem como alternativas sustentáveis aos sistemas intensivos de produção (Daniel et al., 2000), onde, uma das suas principais vantagens é o seu potencial para conservar o solo e manter sua fertilidade e produtividade (Nair, 1993).

Os sistemas agroflorestais são um conjunto de alternativas de uso da terra e tecnologias, no qual espécies produtoras de madeira e similares (árvores, arbustos, palmáceas, bambus etc.) são cultivadas na mesma unidade de área com plantas agrícolas e, ou, animais em um arranjo espacial e seqüência temporal pré-definidos (Nair, 1993).

Segundo Nair (1993), a presença das árvores promove os seguintes efeitos nos ecossistemas agrícolas: manutenção da matéria orgânica no solo; fixação de nitrogênio; absorção de nutrientes; exudação de substâncias promotoras do crescimento pela rizosfera; proteção do solo contra erosão; aumento da eficiência do uso de nutrientes pelas plantas; redução da acidez e salinidade do solo; melhoria da estrutura e porosidade do solo; retenção de água; diminuição das temperaturas na superfície pelo sombreamento e promoção de microclima favorável ao desenvolvimento dos microrganismos.

Entre os efeitos negativos dos SAFs, pode-se destacar a competitividade entre as plantas, além da dificuldade de manejo das culturas (Morgado & Rao 1986) comprometendo a sua flexibilidade. Outra dificuldade é o manejo das interações dos diversos componentes do sistema, por luz, água e nutrientes, em benefício do empreendimento agrícola como um todo (Goedert & Oliveira, 2007).

Carvalho et al. (2004) avaliaram a qualidade de um solo sob sistema agroflorestal a partir da quantificação de alguns atributos físicos. Estes autores constataram que o solo cultivado com este sistema apresentou menor densidade aparente, maior porosidade, menor resistência à penetração e maior estabilidade de agregados, quando comparado ao mesmo solo sob sistema de plantio convencional.

De acordo com Duque (2004), as condições climáticas nordestinas de 3000 horas anuais de luz solar, altas temperaturas, irregularidade pluviométrica e limitada capacidade de retenção de água nos solos, fazem com que a região semi-árida seja mais adequada para o cultivo de árvores e vegetais perenes, do que de plantas anuais ou herbáceas. Os SAFs têm sido utilizados em regiões áridas e semi-áridas do Chile visando a otimização da produção do solo e conseqüente aumento da rentabilidade (Severino, 1989).

Lima (1988) descreveu alguns SAFs desenvolvidos no semi-árido brasileiro, destacando que muitas das associações isoladas existentes no Nordeste, enquadram-se nos sistemas agrissilviculturais, nos quais árvores são associadas a culturas agrícolas (sistema silviagrícola), à pecuária (silvipastoril) e a ambos (agrissilvipastoril, conforme Daniel, (1999)). Segundo este autor é necessário avaliar, quantitativamente, os rendimentos das culturas existentes nos sistemas em uso no Nordeste e seus alcances com relação ao uso do solo.

Maia et al. (2007), estudando as fontes de carbono orgânico em Luvissoilo cultivado com sistemas agroflorestais e convencional no semi-árido cearense,

observaram que os SAFs apresentaram maior entrada de resíduos orgânicos que o sistema tradicional, o cultivo intensivo e até mesmo, a área de mata nativa.

No Brasil, os SAFs encontram-se em expansão e constituem uma alternativa de manejo para recomposição de áreas degradadas, resultantes do uso irracional do solo (Goedert & Oliveira, 2007).

## **2.2. Curva de retenção de água no solo (CRA)**

O conhecimento da retenção de água pelo solo é essencial para o estudo de muitos processos, como por exemplo, a disponibilidade de água para as plantas (Walczak et al., 2006). Esta característica é medida experimentalmente sendo representada graficamente por uma curva, denominada curva de retenção de água (Hillel, 1998), a qual é expressa pela relação entre o potencial mátrico ( $\psi$ ) e o conteúdo de água ( $\theta$ ) do solo (Tormena et al., 2007), à base de massa ou volume.

A água retida pela matriz do solo, ou seja, pelas partículas minerais e substâncias orgânicas, encontra-se nos poros de diversos tamanhos existentes no solo. Segundo Libardi (2005), duas forças são responsáveis pela retenção da água no solo, sendo: forças capilares e de adsorção, as quais compõem as forças mátricas e que dão origem ao potencial mátrico.

No processo de determinação da CRA, primeiramente ocorre o esvaziamento dos poros maiores e, em seguida, dos menores (Hillel, 1998). Durante este processo, à medida que a água do solo vai sendo drenada, ocorre um aumento gradual do potencial mátrico, no qual as forças capilares são dominantes e, à medida que o solo seca, as forças de adsorção agem mais intensidade (Libardi, 2005).

Dentre as propriedades físico-hídricas, a CRA é de difícil caracterização por ser um procedimento trabalhoso e demorado, tanto na obtenção das amostras de solo no campo, como nos procedimentos laboratoriais (Cichota & Jong van Lier, 2004), além do alto custo (Machado, 2006). Sabe-se que quanto maior o número de pontos na confecção da CRA mais representativa ela será, no entanto, o seu levantamento torna-se mais oneroso (Silva et al., 2006). Essas dificuldades têm conduzido a pesquisas que definam o número mínimo e a melhor combinação de pontos (Silva et al., 2006) e a formulações de equações empíricas para a realização do ajuste da CRA (van Genuchten, 1980; Gardner, 1986; Walczak et al., 2006).

Existem muitos fatores relacionados com o potencial da água no solo e o conteúdo de umidade (Brady, 1989). Segundo Klar (1988), Brady (1989), Reichardt (1990) e Costa et al. (2003), a textura do solo é uma propriedade física que afeta a capacidade de retenção de água e, portanto, sugere curvas de retenção de água com diferentes formas. Solos mais argilosos têm uma maior retenção de água e uma inclinação mais gradual na CRA enquanto que os arenosos, por possuírem maior quantidade de macroporos, esvaziam seus poros rapidamente (Hillel, 1998).

A estrutura do solo é outra característica que influencia na forma da CRA. Pode-se esperar que o efeito da compactação (que destrói a estrutura) reduz a porosidade total e a macroporosidade (Hillel, 1998; Tormena et al., 1998b; Klein & Libardi, 2002).

A matéria orgânica também apresenta propriedades de retenção de água (Reichardt, 1990) e influencia na porosidade total do solo por ser um material poroso e dificultar o arranjo piramidal das partículas (Kiehl, 1979). A curva de retenção de água pode ser afetada pelas mudanças de matéria orgânica que ocorrem no solo devido ao clima e às práticas de manejo (Rawls et al., 2003). Esses autores concluíram que o aumento de carbono orgânico no solo resulta em maior da retenção de água em solos de todas as texturas. Barzegar et al. (2002) verificaram que o aumento na concentração de matéria orgânica aumentou o conteúdo de água do solo nos potenciais maiores que -100 kPa. Silva et al. (1986) observaram que um solo cultivado apresentou menor retenção de água que um solo sob floresta e verificou que este tinha maior teor de matéria orgânica. Carvalho et al. (1999) observaram o mesmo comportamento em solos com sistemas de plantio direto.

A curva de retenção de água do solo pode sofrer modificações em função dos sistemas de cultivo que proporcionam aumento da densidade ou causem degradação da estrutura do solo, provocando alterações na distribuição de diâmetro de poros (Hill et al., 1985). Klein & Libardi (2002) verificaram diferenças nas curvas de retenção de água em sistemas de sequeiro e irrigado em comparação com a mata, observando-se a redução da porosidade e a alteração do diâmetro dos poros causada pelo manejo. Marques et al. (2004) constataram que em um Latossolo Amarelo na região amazônica, cultivado com sistema agroflorestal, tinha capacidade de reter elevado teor de umidade, mesmo quando submetido a altas tensões.

### 2.3. Qualidade física do solo

Nas últimas décadas surgiu uma preocupação intensa com a preservação do ambiente e com a produtividade sustentável, pois a escassez dos recursos naturais pode causar o declínio da produção Agropecária. O solo é um dos recursos naturais básicos para a geração de alimentos às populações futuras, o que leva à busca de sistemas que preservem o seu potencial de produção, ou seja, que o mantenham com uma qualidade desejável o equilíbrio ecológico para a produção agrícola. A qualidade do solo é a sua capacidade de exercer várias funções, dentro dos limites de ecossistemas naturais ou manejados, para sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e contribuir para a saúde das plantas, dos animais e do homem (Doran & Parkin, 1994). Dexter (2004a) observa que a qualidade do solo é considerada sob três aspectos: o físico, o químico e o biológico, contudo afirma que as propriedades físicas afetam fortemente os processos químicos e biológicos do solo. Neste contexto vários pesquisadores (Tormena et al., 1999a; Klein & Libardi, 2002; Costa et al., 2003; Li & Shao, 2006) têm usado as propriedades físicas do solo como indicadores da qualidade do solo.

Conforme Tormena et al. (1998a), a qualidade física do solo é sua capacidade em promover ao sistema radicular condições físicas adequadas ao crescimento e desenvolvimento das plantas. Essas condições podem ser alteradas pelas práticas de manejo, diminuindo a qualidade do solo e prejudicando a sua produtividade sustentável (Silva et al., 1994). Porém, Dexter (2004a) afirma que a textura do solo quase não é afetada por essas práticas, já a estrutura é bastante sensível ao preparo do solo e às práticas culturais, influenciando, conforme Tormena et al. (1998a), a produtividade agrícola por meio de modificações na disponibilidade de água, na difusão de oxigênio e na resistência à penetração das raízes.

Li & Shao (2006) observaram em área de lavouras, piores condições físicas do solo: maior densidade do solo e menor porosidade total quando comparada a áreas de pastagens e com vegetação natural, tanto na camada superficial como na mais profunda. Barzegar et al. (2002) concluíram que o manejo associado ao aumento da matéria orgânica no solo melhorou significativamente a estabilidade estrutural, porosidade total, taxa de infiltração, além de aumentar o rendimento do grão e da palha do trigo numa região semi-árida.

A compreensão e a quantificação dos impactos do uso e manejo do solo na sua qualidade física são fundamentais no desenvolvimento dos sistemas agrícolas sustentáveis (Dexter & Youngs, 1992). Várias abordagens têm sido feitas para a avaliação da qualidade física do solo, entre as quais o intervalo hídrico ótimo (IHO) e o índice S. O intervalo hídrico ótimo é um parâmetro que integra três fatores relacionados ao crescimento das plantas: aeração, água e resistência à penetração, sendo conhecido como indicador da qualidade física do solo. O índice S, também proposto como indicador da qualidade física e estrutural do solo é determinado a partir da curva de retenção de água, a qual expressa fisicamente a distribuição do tamanho dos poros.

#### **2.4. Intervalo hídrico ótimo (IHO)**

O conceito de um único parâmetro que descreve a variação no conteúdo de água e incorpora sua limitação para o crescimento das plantas relacionado à aeração, resistência do solo à penetração e disponibilidade de água, foi introduzido por Letey (1985), sendo denominado de *Non Limiting Water Range* (NLWR) (Silva et al., 1994; Betz et al., 1998; Zou et al., 2000).

Vários trabalhos (Zou et al., 2000; Silva & Kay, 2004; Beutler et al., 2005) fazem menção ao trabalho de Letey (1985), o qual define o NLWR como sendo a faixa de conteúdo de água no solo em que o crescimento da planta não é restringido pelas limitações impostas pelo potencial mátrico, aeração e resistência à penetração. De acordo com Tormena et al. (1998a), isto evidencia que o crescimento radicular ocorre normalmente entre os limites do NLWR e é completamente impedido fora deste.

Assim, Silva et al. (1994) afirmaram que o NLWR não era um termo adequado, pois, o crescimento radicular varia de uma forma contínua com o potencial mátrico, com a resistência à penetração e com a aeração. Então, esses autores apontaram que o crescimento das raízes é menos restrito dentro desses limites, aumentando suas restrições fora destes, aprimorando o conceito de NLWR, caracterizando-o de *Least Limiting Water Range* (LLWR). Este conceito foi introduzido no Brasil por Tormena et al. (1998a) como *Intervalo Hídrico Ótimo* (IHO).

A faixa de água do IHO está dentro de dois limites: o superior, caracterizado pelo conteúdo de água no solo na capacidade de campo ou, a porosidade de aeração e o inferior pelo ponto de murcha permanente ou o conteúdo de água quando a resistência à penetração atinge 2,0 MPa (Letey, 1985). A umidade na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), no

ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) e na umidade de resistência à penetração ( $\theta_{RP}$ ) de 2 Mpa, foram estimadas através de equações de pedotransferência descritas no trabalho de Silva et al. (1994). A umidade na porosidade de aeração igual a 10% ( $\theta_{PA}$ ) foi calculada como sendo a umidade de saturação subtraída de 0,1. Assim, para cada densidade do solo ( $D_s$ ), o IHO é igual à diferença entre o limite superior e o limite inferior, sendo que o superior é a menor umidade na  $\theta_{cc}$  ou na  $\theta_{pa}$  e o limite inferior é a maior umidade na  $\theta_{pmp}$  ou na  $\theta_{rp}$ .

O intervalo hídrico ótimo foi calculado por Silva et al. (1994) para cada densidade do solo medida, utilizando os valores dos limites superior e inferior, ou seja, a faixa ótima de umidade do solo para o crescimento das plantas depende do valor de densidade. Geralmente, o aumento da densidade do solo resulta na redução do IHO em direção a valores de densidade em que o IHO é igual a zero (Tormena et al., 2007). A densidade do solo em que o IHO é nulo é chamada de densidade crítica do solo ( $D_{sc}$ ) (Silva et al., 1994; Silva e Kay, 1997a).

Quando  $D_s > D_{sc}$ , há indicações de severa degradação estrutural do solo, restringindo o crescimento das plantas (Tormena et al., 2007). Os valores de  $D_{sc}$  variam com o tipo de solo e as condições de manejo (Silva et al., 1994). Contudo, potencialmente sistemas de manejo que proporcionam maior frequência de  $D_s < D_{sc}$  oferecem menores restrições físicas às plantas. Beutler et al. (2004) em um Latossolo Vermelho de textura média cultivado com arroz de sequeiro, encontraram  $D_{sc} = 1,63 \text{ Mg m}^{-3}$ , a partir da qual produtividade da cultura decresce. Freddi et al. (2007) observaram decréscimo da produtividade do milho a partir do valor de  $D_{sc} = 1,46 \text{ Mg m}^{-3}$ , para o mesmo solo.

Na maioria dos sistemas agrícolas em que o IHO foi estudado, verificou-se que a resistência à penetração, em comparação com a aeração do solo é a variável que mais frequentemente reduz o IHO (Silva et al., 1994; Zou et al., 2000; Leão et al., 2005; Klein & Camara, 2007). No entanto, o impacto da resistência à penetração no IHO depende do valor de resistência à penetração do solo crítica adotado. Por exemplo, valores de resistência entre 2 e 3 MPa podem causar redução de cerca de 50% no crescimento das raízes (Benghough & Mullins, 1990), e para valores  $\geq 3$  MPa o crescimento radicular pode ser fortemente impedido (Horn & Baumgartl, 2000). No entanto, Ehlers et al. (1983) relatam que é possível o crescimento prolífico de raízes com resistência à penetração  $\geq 3,5$  MPa, associado à presença de bioporos, que atuam como rotas alternativas para o crescimento das raízes.

Os resultados obtidos por Beutler et al. (2004), Leão et al. (2006), Tormena et al. (2007) demonstram um decréscimo do IHO com o aumento da densidade do solo enquanto que Silva & Kay (1997a,b) mostram uma correlação positiva do IHO com o conteúdo de matéria orgânica. Os sistemas de manejo também alteram a amplitude do IHO, por interferir no aporte de material orgânico no solo e por alterar as suas propriedades físicas.

Silva & Kay (1996), comparando sistemas de manejo, observaram que o solo do plantio direto apresentou IHO mais amplo que o preparo convencional. Tormena et al. (2007) encontraram maior IHO em sistema de plantio direto escarificado, que em sistemas de plantio direto em sucessão e rotacionado. Klein & Câmara (2007) também observaram maior IHO em plantio direto escarificado quando comparado com sistema de plantio direto não escarificado, ambos cultivados com soja. Leão et al. (2006) verificaram um aumento no IHO no cerrado nativo e um decréscimo nas áreas de pastejo contínuo e rotacionado.

Alguns trabalhos têm sido desenvolvidos para validar o IHO com relação ao crescimento e produtividade das culturas (Silva & Kay, 1996; Beutler et al., 2004; Beutler et al., 2005; Beutler et al., 2006; Klein & Câmara, 2007; Freddi et al., 2007). Silva & Kay (1996) encontraram uma correlação direta entre o crescimento do milho e o IHO, o mesmo foi observado para a produtividade de arroz de sequeiro por Beutler et al. (2004). Beutler et al. (2005) obtiveram significativos decréscimos no rendimento da soja, ao final do IHO.

O intervalo hídrico ótimo integra num único parâmetro os efeitos de aeração, resistência à penetração e características da retenção de água no solo sob crescimento vegetal (Silva & Kay, 1996). Tais particularidades fazem do deste parâmetro um indicador adequado para avaliar a qualidade estrutural do solo e o impacto das práticas de manejo sobre a degradação do solo. Vários trabalhos comprovam a eficácia do IHO como indicador da qualidade física do solo (Tormena et al., 1999a; Leão et al., 2004; Leão et al., 2006; Tormena et al., 2008).

## **2.5. Índice S**

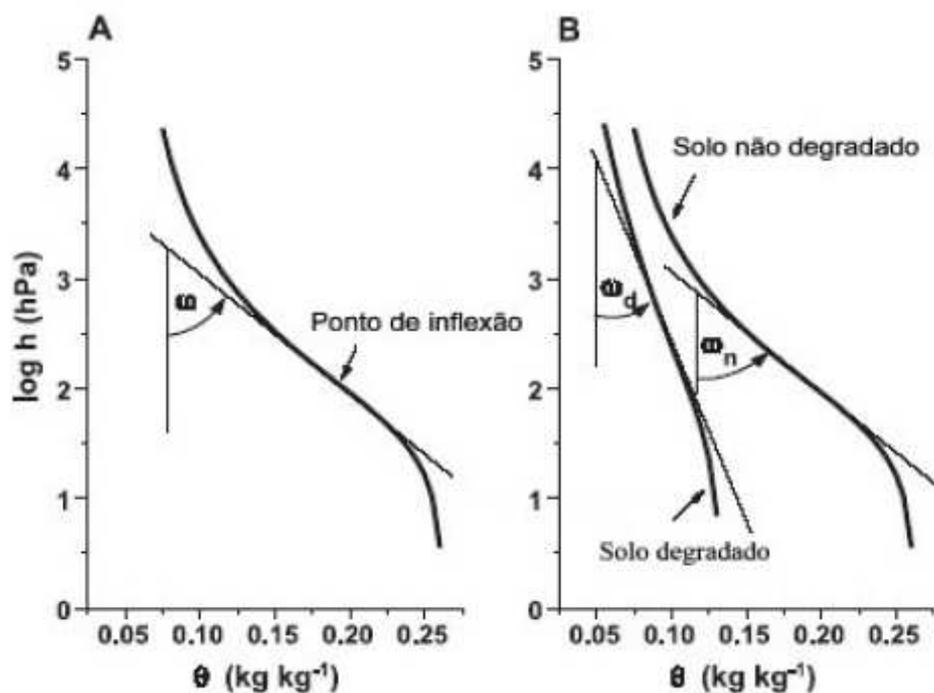
Recentemente, Dexter (2004a,b,c) propôs o conceito do índice S como indicador da qualidade física e estrutural do solo. O valor do índice S foi ilustrado pelo autor, com dados experimentais da Austrália, Inglaterra, Polônia, Espanha, Suécia,

Países Baixos e Estados Unidos, utilizando medidas reais de solos e estimativas obtidas através de funções de pedotransferências para aplicar os valores de qualidade física do solo,  $S$ . Nestes trabalhos, os valores do índice  $S$  foram calculados para vários tipos de solos e situações de conteúdos de matéria orgânica, grau de compactação, níveis de sodicidade, preparo do solo com diferentes conteúdos de água e de condutividade hidráulica.

O valor do índice  $S$  é fisicamente baseado na curva de retenção de água a qual reflete a distribuição de poros do solo. No desenvolvimento da teoria do índice  $S$ , Dexter (2004a) usou a CRA como a relação entre o conteúdo de água à base de massa ( $\theta_g$ ) e o logaritmo do potencial de água no solo ( $\psi$ , hPa). Desta forma, a curva de retenção de água tem um único ponto característico denominado de **ponto de inflexão**, no qual a curvatura é zero (Figura 1A). A curva no ponto de inflexão tem somente duas características: primeiro, a sua coordenada de posição ( $\theta_i$ ,  $\ln(\psi_i)$ ), onde  $i$  refere-se aos valores no ponto de inflexão), e segundo, a sua inclinação (Slope). Matematicamente a inclinação é calculada como sendo:  $S=d\theta/d(\ln\psi)$ . O parâmetro físico  $S$  é definido como o valor da inclinação da curva de retenção no seu ponto de inflexão.

Examinando a Figura 1B, nota-se que um solo degradado fisicamente gera uma alteração na forma da CRA. No qual a quantidade de água na saturação é bem menor, assim como a inclinação da curva de retenção de água no ponto de inflexão. Segundo Dexter (2004a) uma menor inclinação corresponde ao solo desestruturado, enquanto a melhor estruturação proporciona maior inclinação, neste caso o valor do índice  $S$  será maior.

Dexter (2004a) utilizou dados publicados por Jones (1983) para estimar os limites críticos de referência para o índice  $S$ . Jones (1983) revisou na literatura o crescimento das raízes na capacidade campo (-0,033 MPa) em solos com diferentes conteúdos de argila e densidades. A partir de funções de pedotransferência, Dexter (2004a) demonstrou que as raízes não crescem quando os valores de  $S < 0,020$ , crescem pouco quando  $0,020 < S < 0,030$  e crescem adequadamente quando  $S > 0,030$ .



**Figura 1.** (A) Exemplo de uma curva de retenção de água mostrando o ponto de inflexão e a inclinação, da tangente da curva no ponto de inflexão ( $\tan \omega$ ). (B) Curvas de retenção de água de um solo franco-areno-argiloso em duas diferentes densidades de solo. Adaptado de Dexter (2004a).

Dexter (2004a) destaca que em uma amostra de solo saturada sob drenagem, o esvaziamento dos poros é progressivo, iniciando com os maiores e em seguida, os menores. O autor estabelece uma diferenciação entre porosidade textural e estrutural. A porosidade textural refere-se às partículas minerais primárias do solo e é pouco afetada pelo seu manejo. A estrutural refere-se à microestrutura do solo (fendas, microfendas, bioporos e macroestrutura causada pelo manejo) sensíveis aos efeitos de uso e manejo do solo. Dexter (2004a) propõe que a maior inclinação ( $S$ ) da CRA no ponto de inflexão é em sua maioria devido à porosidade microestrutural e, portanto, esta inclinação reflete diretamente muitas das principais propriedades físicas. Os poros que drenam a água no ponto de inflexão da CRA podem em geral ser classificados como poros estruturais ou microfendas os quais podem ser vistos como poros distendidos numa seção bidimensional. É possível dizer que para a drenagem do solo entre a saturação e o ponto de inflexão ocorre o esvaziamento dos poros estruturais. No entanto, para a drenagem do solo abaixo do ponto de inflexão, ocorre esvaziamento dos poros texturais.

A textura e estrutura do solo e os aspectos relacionados ao seu manejo, tais como a quantidade de matéria orgânica e a densidade do solo, podem alterar o diâmetro dos poros do solo, refletindo nos valores do índice  $S$  e, conseqüentemente, na qualidade

física e estrutural do solo, influenciando o desenvolvimento das plantas. Dexter (2004a) estudou a relação entre os valores de S e o conteúdo de argila e observou que o valor de S reduziu com aumento de argila. Verificou-se que em solos com, aproximadamente, 30 a 50% de argila, ocorreram maiores valores do S, o que pode estar associado a uma estrutura mais desenvolvida.

A compactação do solo é a alteração no arranjo de suas partículas, de maneira que ocorre redução no volume de massa. Klein & Libardi (2002) relatam que a compactação do solo é considerada uma das principais formas de degradação física do solo, pois modifica a distribuição do tamanho de poros estabelecidos pela estrutura do solo. De acordo com Dexter (2004a), um aumento nos valores do índice S, ou seja, uma maior inclinação do ponto de inflexão na CRA, indica que parte da porosidade do solo está organizada numa faixa mais estreita de tamanho de poros, definidas pela microestrutura do solo, estabelecendo condições estruturais que determinam um adequado funcionamento físico do solo.

Alguns trabalhos têm evidenciado que com a diminuição da matéria orgânica ocorre depreciação da qualidade física do solo (Carvalho et al., 1999; Bertol et al., 2001; Araújo et al., 2004). Os sistemas de uso e manejo do solo que conduzem a um maior aporte de matéria orgânica, promovem a melhoria da qualidade física do solo, como mostrado por Dexter (2004a), utilizando o índice S. Estudando a qualidade física de um Latossolo cultivado com plantio direto e cultivo convencional, nas linhas e entre linhas de plantas, por meio do índice S, Tormena et al. (2008) observaram maiores valores de S ( $S > 0,035$ ) nas linhas. Verificaram também que, para o cultivo convencional, 72% das amostras obtiveram valores de  $S > 0,035$ , enquanto para o plantio direto esse valor foi de 55%. Segundo esses autores, esses resultados mostram o potencial do índice S para identificar variações na qualidade física do solo em função dos sistemas de manejo e da posição de amostragem (linhas e entre linhas). Aparício & Costa (2007) encontraram em sistemas de plantio direto, valores de S acima do limite de 0,035, como estabelecido por Dexter (2004a)

Ao fim da série de três trabalhos, Dexter (2004c) destaca que o valor do índice S pode ser determinado diretamente da curva de retenção de água, se esta for elaborada com muitos pontos, no mínimo oito pontos (Silva et al., 2006). O ajuste e uso de uma equação, como a de van Genuchten, é valioso para uma padronização metodológica na determinação do parâmetro S. Diversos trabalhos têm mostrado que a equação de van

Genuchten (1980) permite os melhores ajustes para os dados de CRA, além do que possui uma certa versatilidade de aplicação.

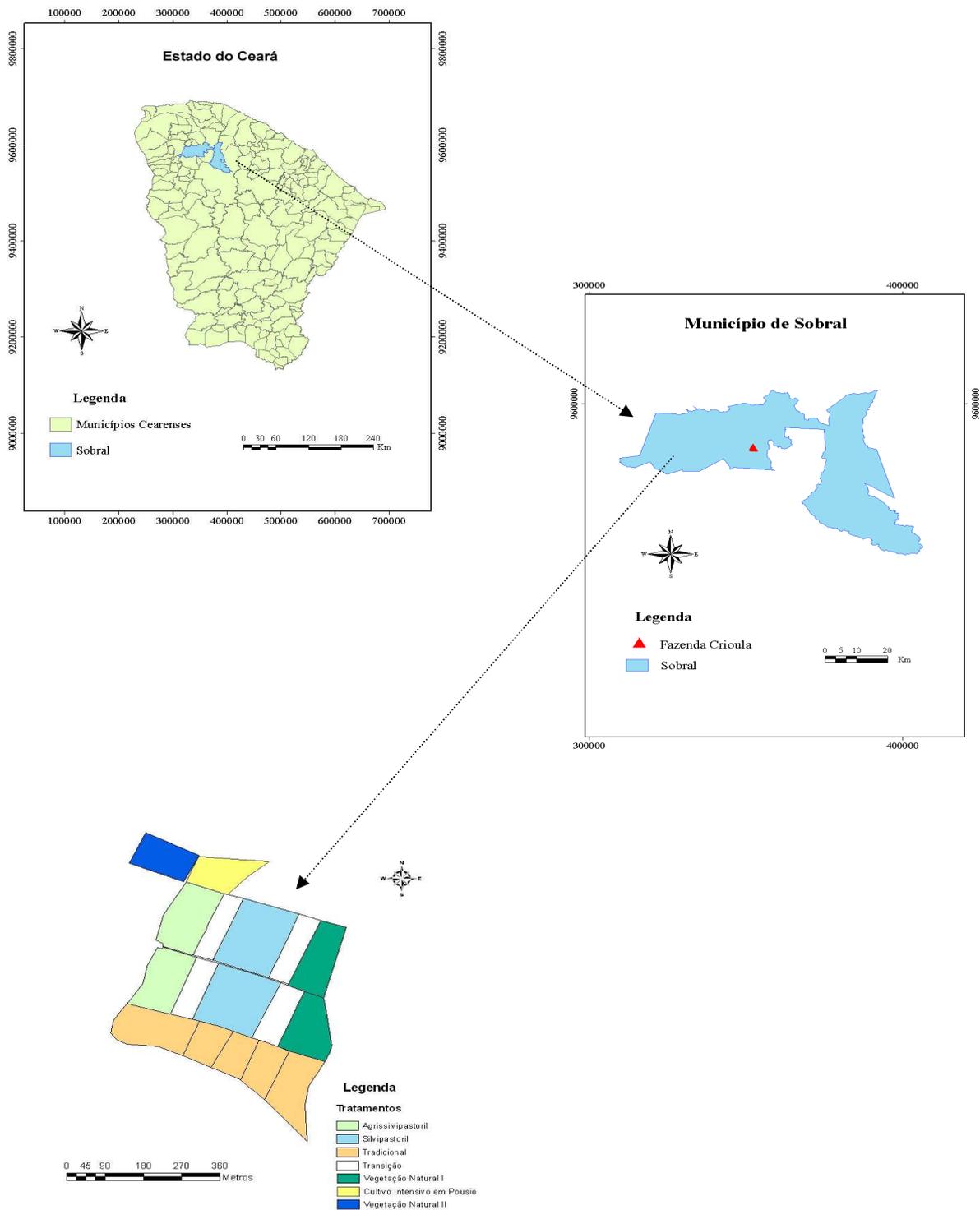
### **3. MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1. Localização das áreas**

A área em estudo localiza-se na Fazenda Crioula, pertencente ao Centro Nacional de Pesquisa de Caprinos (CNPQ)/EMBRAPA (Figura 2), situada no município de Sobral – CE. O município encontra-se na região semi-árida cearense e está localizado a 300 km de Fortaleza (3° 41' S e 40° 20' W), com altitude de 69 m. As médias anuais de temperatura e precipitação são de 30 °C e 798 mm, respectivamente. O solo da área em estudo é um Luvisolo Crômico Órtico típico, segundo Aguiar (2006).

#### **3.2. Descrição dos tratamentos**

No Centro Nacional de Pesquisa de Caprinos estão sendo avaliados sistemas agroflorestais e um sistema de cultivo intensivo. O sistema agroflorestal consiste de uma área de 8,0 ha, a qual foi dividida em três subparcelas de 1,6, 4,8 e 1,6 ha, destinadas, respectivamente à agricultura (sistema agrissilvipastoril), pecuária (sistema silvipastoril) e preservação da vegetação natural. Um rebanho de 20 matrizes ovinas utiliza as três parcelas da seguinte maneira: as áreas silvipastoril e de vegetação natural constituem os piquetes de manutenção durante o ano, enquanto que a área agricultável serve somente como banco de proteínas no período seco.



**Figura 2.** Localização da área experimental no município de Sobral-CE.

Para este estudo, além das áreas mencionadas foi selecionada uma área onde foi conduzido um sistema convencional com **cultivo intensivo** de milho e feijão praticado por cinco anos consecutivos (1997-2001), sendo que no período de coleta dos dados esta área estava em pousio (**CIP**).

**Sistema Agrissilvipastoril (AGP)** – Área de 1,6 ha. Tratamento oriundo do sistema agroflorestal, onde foi adotado o cultivo em aléias, ou seja, faixas de 3,0 m de largura cultivada com feijão e milho, que são separadas por fileiras de leucena, implantadas com espaçamento de 0,5 m entre plantas. Não existe aplicação de fertilizantes químicos e o preparo do solo é realizado manualmente por uma enxada, nos primeiros anos, atualmente com cultivados e tração animal. Para o estabelecimento das culturas, em 1999, a área teve a sua vegetação raleada preservando-se uma cobertura vegetal arbórea nativa de até 22%, o que equivale a aproximadamente 200 árvores por hectare. A madeira útil obtida do raleamento foi retirada para uso doméstico na fazenda e outra parte vendida. O material vegetal restante (folhas e ramos) foi enleirado perpendicularmente ao declive predominante na área. Durante o período chuvoso, a forragem produzida pelas leguminosas plantadas nas fileiras de separação das faixas de cultivo, é cortada de duas a três vezes e a massa verde incorporada ao solo, juntamente com a originada do corte da rebrota dos troncos e arbustos presentes na área. No período seco, esta parcela é utilizada como banco de proteína, onde o rebanho permanece por uma hora, diariamente, pela manhã. Todo o esterco recolhido do aprisco é aplicado a esta área.

**Sistema Silvipastoril (SILV)** – Área de 4,8 ha. Tratamento oriundo do sistema agroflorestal. Este tratamento consiste em uma área que teve sua vegetação lenhosa raleada e rebaixada, preservando-se uma cobertura vegetal arbórea de 38%, aproximadamente. O manejo desta área consta do controle das espécies lenhosas indesejáveis, o rebaixamento da copa das espécies arbustivas e arbóreas de valor forrageiro e a preservação de aproximadamente 260 árvores por hectare. Esta área é utilizada unicamente como piquete de manutenção dos animais. Todo material proveniente do raleamento e rebaixamento das espécies arbóreas é mantido sobre a superfície do solo.

**Vegetação Natural (VN)** – Área de 1,6 ha. É utilizada como reserva natural, onde poder-se-á fazer a retirada de madeira para consumo doméstico, confecção de cercas ou venda, de acordo com o potencial da vegetação, sendo também utilizada como piquete de manutenção do rebanho no período seco. Esta área é considerada o tratamento testemunha.

**Cultivo Intensivo em Pousio (CIP)** – Área de 1,5 há, cultivada intensivamente com milho e feijão entre os anos de 1997 a 2001, sem qualquer adição de adubos e corretivos sendo considerada exaurida, estando atualmente em pousio.

As características físicas e químicas do solo das áreas experimentais encontram-se na Tabela 1

**Tabela 1.** Características físicas e químicas da camada de 0-6 cm do solo sob as quatro áreas estudadas na Fazenda Crioula no CNPC, Sobral – CE no ano de 2003 (adaptado de Maia et al., 2006)

Variáveis	Tratamentos			
	AGP	SILV	CIP	VN
Areia grossa (g kg <sup>-1</sup> )	274,00	491,00	372,00	414,00
Areia fina (g kg <sup>-1</sup> )	348,00	204,00	328,00	211,00
Silte (g kg <sup>-1</sup> )	287,00	217,00	213,00	245,00
Argila (g kg <sup>-1</sup> )	105,00	75,00	90,00	130,00
Argila dispersa (g kg <sup>-1</sup> )	46,60	34,70	38,80	42,70
pH em água	7,30	6,70	6,80	7,00
pH em KCl	6,40	5,96	6,00	6,16
Ca <sup>2+</sup> trocável (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	20,80	11,30	13,50	22,00
Mg <sup>2+</sup> trocável (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	4,50	2,70	2,80	6,70
K <sup>+</sup> trocável (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	1,57	1,07	1,04	1,49
Na <sup>+</sup> trocável (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	0,19	0,10	0,12	0,17
CTC (cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> )	27,36	17,42	19,08	32,28
V (%)	98,70	86,70	91,60	93,70
CO (g kg <sup>-1</sup> )	2,23	3,48	2,16	3,62

**AGP:** Agrissilvipastoril, **SILV:** Silvipastoril; **VN:** Vegetação natural; **CIP:** Cultivo intensivo em pousio

### **3.3. Coleta e análises**

Para este estudo foram coletadas 40 amostras deformadas e 40 amostras indeformadas em cada uma das áreas (Figura 2). A amostragem foi feita a 5 cm de profundidade e ocorreu entre junho e agosto de 2005. A coleta das amostras foi feita em espaçamento regular de 5 metros, resultando numa malha quadriculada de 4 linhas e 10 colunas, totalizando 40 pontos, ou seja, 40 amostras por área. Utilizou-se na coleta das amostras indeformadas um amostrador de Uhland com anéis de 5 x 5 cm, sendo as amostras embaladas, identificadas e armazenadas para posteriores análises.

Em casa de vegetação as amostras deformadas foram secas ao ar por 24 horas, destorroadas com rolo de madeira e passadas em malha de 2,0 mm de diâmetro para a obtenção da terra fina seca ao ar (TFSA).

#### **3.3.1. Análise granulométrica**

As frações granulométricas do solo foram determinada com uso de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$   $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ ) e agitação horizontal com oscilação pendular a 120 rpm para as dispersões química e física, conforme EMBRAPA (1997) e Ruiz (2005), respectivamente. As frações areia grossa e fina foram determinadas pelo peneiramento e as frações silte e argila por sedimentação, realizando-se coleta adicional das frações silte + argila para a determinação da fração silte a partir da diferença entre as frações silte+argila e argila.

#### **3.3.2. Carbono orgânico total (COT)**

Para determinação do carbono orgânico total, utilizou-se a metodologia de Walkley-Black, com oxidação da matéria orgânica via úmida, descrita por Yeomans & Bremner (1988). Uma porção de TFSA foi moída em almofariz e, posteriormente, retirou-se 0,1 g dessa porção. Adicionou-se 5 mL da solução de dicromato de potássio ( $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ ) e 7,5 mL de ácido sulfúrico concentrado ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) para oxidar o carbono presente nas amostras. Para maximizar a oxidação do carbono pelo dicromato utilizou-se uma fonte externa de calor, colocando-se as amostras em bloco digestor e mantendo-as na temperatura de 170 °C por 30 minutos. Após a oxidação do carbono, adicionou-se

a solução indicadora ( $\text{FeSO}_4$ ) para posterior titulação com solução de sulfato ferroso amoniacal 0,5 N.

### 3.3.3. Densidade de partículas (Dp)

A densidade das partículas foi determinada seguindo a metodologia do balão volumétrico que consiste na determinação do volume de álcool etílico gasto para aferir um balão de 50 mL com 20 g de TFSA em seu interior (Blake & Hartge, 1986).

### 3.3.4. Determinação da curva de retenção de água

As amostras indeformadas foram utilizadas para obter a curva de retenção de água (CRA) e curva de resistência à penetração (CRP), as quais foram utilizadas nos cálculos do intervalo hídrico ótimo e do índice S. As amostras foram colocadas em uma bandeja para serem saturadas, através da elevação gradual de uma lâmina de água até atingir 2/3 da altura da amostra. Posteriormente determinou-se a curva de retenção de água, onde as amostras foram submetidas a diferentes potenciais mátricos ( $\Psi$ ), sendo: -0,001; -0,002; -0,003; -0,004; -0,005; -0,006; -0,007; -0,008; -0,009; -0,01; -0,02; -0,03; -0,04; -0,05; -0,06; -0,07; -0,08; -0,09; -0,1; -0,5; -1 e -1,5 MPa. Utilizou-se uma mesa de tensão até o potencial de -0,01 MPa e placas porosas (câmara de pressão de Richards), para as demais tensões, conforme Klute (1986). As amostras foram mantidas na mesa de tensão e na placa porosa, pelo tempo necessário até atingir o ponto de equilíbrio, o qual foi determinado pelo cessamento da drenagem de água.

A umidade volumétrica foi calculada pela fórmula:

$$\theta = \frac{\text{massa do solo úmido} - \text{massa do solo seco}}{\text{massa do solo seco}} * D_s$$

Na elaboração da CRA no solo foram utilizadas três repetições para cada potencial aplicado. A curva de retenção de água no solo foi ajustada pela equação de van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \left[ (\theta_s - \theta_r) / \left[ 1 + (\alpha \times \psi)^n \right]^m \right] \quad (1)$$

em que  $\theta$ : conteúdo de água ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $\psi$ : potencial mátrico (MPa);  $\theta_s$ : conteúdo de água na saturação ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $\theta_r$ : conteúdo de água residual ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );  $\alpha$  e  $n$ : são parâmetros do ajuste do modelo. Adotou-se a restrição para  $m = 1 - 1/n$  no ajuste do modelo.

### 3.3.5. Resistência à penetração (RP)

Após o equilíbrio na determinação da CRA, as amostras indeformadas foram pesadas e seguiu-se a determinação da RP, a qual foi realizada em três amostras indeformadas com três repetições por amostra. Para tal fim foi utilizado um penetrômetro desenvolvido no Laboratório de Física do Solo da ESALQ/USP, descrito por Tormena et al. (1998a).

A velocidade de penetração adotada foi de  $1 \text{ cm min}^{-1}$ , sendo as medidas realizadas entre 1 e 4 cm de profundidade em cada anel, perfazendo 266 leituras por repetição, as medidas obtidas na superfície das amostras foram descartadas, uma vez que a resistência aumenta até determinada profundidade e, então, torna-se constante. Os valores adquiridos em  $\text{kgf cm}^{-2}$  foram então transformados em MPa, sendo calculada a média aritmética dos valores para cada ensaio. Como foram realizados três ensaios por amostra, a média dos resultados desses ensaios correspondeu ao valor da RP média para cada amostra.

### 3.3.6. Densidade do solo (Ds)

Imediatamente após os ensaios descritos nos itens anteriores (Itens 3.3.4 e 3.3.5), as amostras foram pesadas e secas em estufa a  $105 \text{ }^\circ\text{C}$  até atingirem peso constante. A densidade do solo foi determinada pela relação entre a massa de solo seco e o volume da amostra considerado igual ao volume do anel (Grossman & Reinsch, 2002).

### 3.3.7. Intervalo hídrico ótimo (IHO)

Na determinação do IHO foram descritas matematicamente a CRP e a CRA. A CRP foi ajustada por meio de um modelo não linear (Busscher, 1990), descrito na equação (2):

$$RP = a \theta^b Ds^c \quad (2)$$

o qual, após transformação logarítmica, resulta na equação 3:

$$\text{Ln RP} = \ln a + b \ln \theta + c \ln Ds \quad (3)$$

em que a RP: resistência à penetração (MPa);  $\theta$ : umidade volumétrica ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ); Ds: densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ );  $a$ ,  $b$  e  $c$ : coeficientes obtidos no ajuste do modelo dos dados.

A curva de retenção de água, expressa pela relação entre o potencial mátrico ( $\psi$ ) e o conteúdo de água no solo ( $\theta$ ), foi descrita matematicamente por meio da função proposta por Ross et al. (1991), conforme a equação (4):

$$\theta = d \psi^e \quad (4)$$

Para quantificação do IHO foi incorporada a Ds na descrição matemática da CRA, de maneira que a equação (4) tomasse a forma da equação (5), similar à utilizada por Silva et al. (1994) e Leão et al. (2005).

$$\text{Ln}(\theta) = \ln(d) + e \cdot Ds + f \ln(\psi) \quad (5)$$

em que  $\theta$ : umidade volumétrica ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ); Ds: densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ );  $\psi$ : potencial matricial (MPa);  $d$ ,  $e$  e  $f$ : coeficientes obtidos no ajuste do modelo dos dados.

O intervalo hídrico ótimo foi determinado adotando-se os procedimentos descritos em Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998a). Os valores críticos de umidade

associados com o potencial mátrico e a porosidade de aeração foram, respectivamente: a capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) ou o conteúdo de água estimado no potencial de -0,01 MPa (Reichardt, 1988); o ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) ou o conteúdo de água no potencial de -1,5 MPa (Savage et al., 1996); e o conteúdo de água do solo em que a porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) é de  $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  (Grable & Siemer, 1968), de acordo com a equação (6).

$$\theta_{PA} = \left( 1 - \frac{D_s}{D_p} \right) - 0.1 \quad (6)$$

em que  $D_s$ : densidade do solo e  $D_p$ : densidade de partículas ( $\text{Mg m}^{-3}$ ).

Considerou-se o valor de  $D_p$ , encontrado para cada área em estudo, através da determinação da densidade de partículas (item 3.3.3).

Para a RP foi adotado o valor crítico de 3,5 MPa, com base nos resultados de Ehlers et al. (1983). Os valores da quantidade de água em que a RP ( $\theta_{RP}$ ) atinge o valor crítico de 3,5 MPa foram obtidos por meio da equação (7):

$$\theta_{RP} = \left( \frac{3.5}{a D_s^c} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (7)$$

em que  $D_s$ : densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ );  $a$ ,  $b$  e  $c$ : coeficientes obtidos no ajuste do modelo dos dados.

Os valores de  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$  foram obtidos de acordo com as equações (8) e (9):

$$\theta_{CC} = \exp(d + e D_s) 100^f \quad (8)$$

$$\theta_{PMP} = \exp(d + e D_s) 15000^f \quad (9)$$

em que  $D_s$ : densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ );  $d$ ,  $e$  e  $f$ : coeficientes obtidos no ajuste do modelo dos dados.

Há quatro possibilidades para o cálculo do IHO, dependendo dos valores dos quatro parâmetros (Wu et al., 2003):

- a) Se  $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}) \longrightarrow IHO = \theta_{CC} - \theta_{PMP};$
- b) Se  $(\theta_{PA} \geq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}) \longrightarrow IHO = \theta_{CC} - \theta_{RP};$
- c) Se  $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \leq \theta_{PMP}) \longrightarrow IHO = \theta_{PA} - \theta_{PMP};$
- d) Se  $(\theta_{PA} \leq \theta_{CC})$  e  $(\theta_{RP} \geq \theta_{PMP}) \longrightarrow IHO = \theta_{PA} - \theta_{RP}.$

### 3.3.8. Cálculo do índice S

Para a determinação do índice S, utilizou-se os valores obtidos de três repetições em todas as tensões adotadas para elaboração da CRA, descrita no item 3.3.4. Para tanto, utilizou-se o modelo de van Genuchten (1980) e, a partir dos seus parâmetros, calculou-se a inclinação da CRA e obteve-se o ponto de inflexão, ou seja, o valor do índice S, como demonstrado por Dexter (2004a), através da equação (10):

$$S = -n(\theta_s - \theta_r) \left[ 1 + \frac{1}{m} \right]^{-(1+m)} \quad (10)$$

Utilizou-se a restrição de  $m = 1 - 1/n$  (Mualem, 1986) no ajuste de pares de  $\theta(\psi)$  pela função descrita na equação 1. Assim, o valor do parâmetro  $S = d\theta/\delta \ln(\psi)$ , ou seja, a inclinação do ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo foi obtido, de acordo com a equação (11):

$$|S| = -n(\theta_s - \theta_r) * [2n - 1/n - 1]^{[1/n-2]} \quad (11)$$

onde:  $\theta$ : conteúdo de água ( $m^3 m^{-3}$ );  $\psi$ : potencial mátrico (MPa);  $\theta_s$ : conteúdo de água na saturação ( $m^3 m^{-3}$ );  $\theta_r$ : conteúdo de água residual ( $m^3 m^{-3}$ );  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$ : parâmetros do ajuste do modelo.

Os valores do S são sempre negativos, mas para facilitar a discussão, seus resultados são colocados em módulo. Os valores do índice S foram comparados entre os quatro tratamentos em estudo através da análise de contrastes.

### 3.3.9. Análises estatísticas

As variáveis utilizadas para os diferentes sistemas de manejo e a área sob vegetação natural foram analisadas por meio de contrastes ortogonais originados a partir do desdobramento dos três graus de liberdade para tratamento (Tabela 2). A significância dos contrastes com um grau de liberdade foi testada pelo teste F ( $P < 0,05$ ) contra o quadrado médio do resíduo, obtido pela análise de variância, considerando-se o delineamento experimental inteiramente casualizado.

As duas áreas sob manejo agroflorestal foram comparadas com a área sob vegetação natural pelo contraste C1. O contraste C2 foi utilizado para comparar os sistemas agroflorestais com o cultivo intensivo em pousio. Já o contraste C3 visou comparar os dois SAFs, sistemas agrissilvipastoril e silvipastoril.

**Tabela 2.** Contrastes ortogonais (C) utilizados na comparação entre os diferentes sistemas de manejo

Sistemas	C1	C2	C3
AGP	1	1	1
SILV	1	1	-1
VN	-2	0	0
CIP	0	-2	0

**AGP:** agrissilvipastoril; **SILV:** silvipastoril; **VN:** vegetação natural ; **CIP:** cultivo intensivo em pousio.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Intervalo hídrico ótimo

A partir da estimativa dos parâmetros apresentados na Tabela 3, obteve-se as equações para determinação do conteúdo de água em que a resistência à penetração atingiu 3,5 MPa e as equações para estimar os conteúdos de água na capacidade de campo e no ponto de murcha permanente dos quatro tratamentos estudados (Tabela 4). O elevado coeficiente de variação da resistência à penetração deve-se à variabilidade natural da densidade do solo e ao gradiente de umidade entre as amostras.

As Figuras 3, 4, 5 e 6 foram obtidas plotando-se a equação 6 e as demais apresentadas na Tabela 5 em um mesmo sistema de coordenadas  $x$  e  $y$ , onde o eixo  $x$  representa a  $D_s$  em  $Mg\ m^{-3}$  e o eixo  $y$ , a umidade do solo em  $m^3\ m^{-3}$ . Estas Figuras, portanto, representam a variação da umidade do solo nos limites críticos definidos pela capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), resistência a penetração ( $\theta_{RP}$ ) e porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) em função da densidade do solo. O intervalo hídrico ótimo corresponde à área hachurada do gráfico.

Observou-se um efeito positivo da densidade do solo sobre a retenção de água no potencial -0,01 MPa para os tratamentos AGP e VN (Figuras 3 e 5). Este comportamento também foi observado por Silva et al. (1994), em um solo arenoso, por Betz et al. (1998) em um solo franco argiloso e por Tormena et al. (1998a) em um solo muito argiloso. Para o tratamento SILV a densidade do solo influenciou negativamente o potencial de -0,01 MPa, sendo o mesmo observado por Silva & Kay (1997a). Para o

potencial de -1,5 MPa, o aumento da densidade do solo diminuiu o conteúdo de água, porém, Silva & Kay (1997a) observaram um aumento. Para os demais tratamentos a retenção de água a -1,5 MPa, foi constante com o aumento da densidade do solo.

Tormena et al. (1998a) e Freddi et al. (2007) constataram, para ambos potenciais, um efeito positivo da densidade do solo. Esses autores argumentaram que o aumento da retenção de água ao longo dos valores de  $D_s$  é justificado pela redução da macroporosidade e a redistribuição dos tamanhos dos poros.

**Tabela 3.** Estimadores dos parâmetros para as variáveis físicas do solo determinadas nas amostras com estrutura indeformada, conteúdo de água volumétrico da água do solo, densidade do solo e resistência à penetração do solo

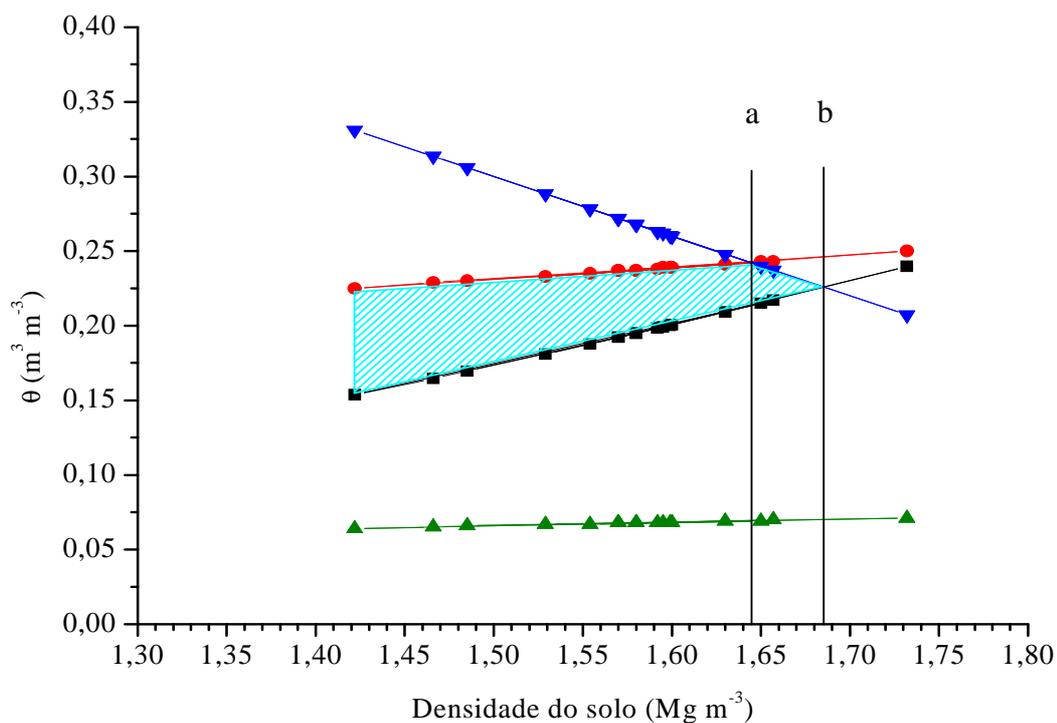
Tratamento	Variável	Média	Desvio-padrão	CV	Mínimo	Máximo
AGP	RP (MPa)	4,779	3,455	72	1,411	10,529
	$D_s$ (Mg m <sup>-3</sup> )	1,582	0,074	5	1,422	1,732
	$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,204	0,093	46	0,094	0,390
SILV	RP (MPa)	4,945	2,932	59	1,152	9,425
	$D_s$ (Mg m <sup>-3</sup> )	1,584	0,058	4	1,414	1,671
	$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,243	0,087	36	0,110	0,386
VN	RP (MPa)	4,657	4,229	91	0,733	16,003
	$D_s$ (Mg m <sup>-3</sup> )	1,471	0,091	6	1,307	1,636
	$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,286	0,105	37	0,134	0,443
CIP	RP (MPa)	6,431	4,972	77	0,793	19,806
	$D_s$ (Mg m <sup>-3</sup> )	1,595	0,084	5	1,430	1,716
	$\theta$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,262	0,075	28	0,160	0,393

**AGP:** Agrissilvipastoril, n = 18; **SILV:** Silvipastoril, n = 22; **VN:** Vegetação natural, n = 21; **CIP:** Cultivo intensivo em pousio, n = 25

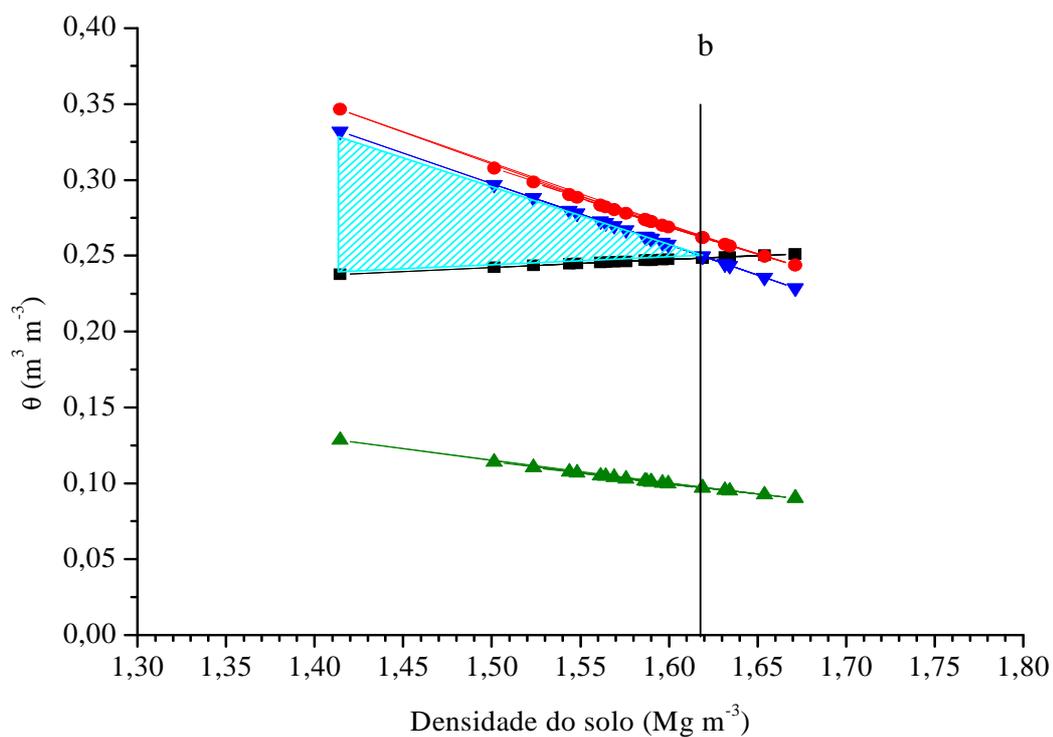
**Tabela 4.** Modelos de regressão ajustados para o conteúdo volumétrico de água do solo ( $\theta = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) em função da densidade ( $D_s = \text{Mg m}^{-3}$ ) e do potencial mátrico ( $\psi = \text{cm}$ ) e para a resistência à penetração do solo ( $RP = \text{MPa}$ ), em função do conteúdo de água volumétrico ( $\theta = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) e densidade do solo ( $D_s = \text{Mg m}^{-3}$ ) utilizadas na delimitação do IHO, para todos os tratamentos em estudo

Tratamento	Modelos de Regressão	R <sup>2</sup>
Conteúdo de água base volumétrica a -0,01 MPa ( $\theta_{CC}$ )		
<b>AGP</b>	$\theta_{CC} = \exp(-0,8066 + 0,3290 D_s) 100^{-0,2500}$	0,93
<b>SILV</b>	$\theta_{CC} = \exp(1,7902 - 1,3693 D_s) 100^{-0,1983}$	0,93
<b>VN</b>	$\theta_{CC} = \exp(-0,6441 + 0,1354 D_s) 100^{-0,1660}$	0,88
<b>CIP</b>	$\theta_{CC} = \exp(-0,5580 - 0,0506 D_s) 100^{-0,1367}$	0,88
Conteúdo de água base volumétrica a -1,5 MPa ( $\theta_{PMP}$ )		
<b>AGP</b>	$\theta_{PMP} = \exp(-0,8066 + 0,3290 D_s) 15000^{-0,2500}$	0,93
<b>SILV</b>	$\theta_{PMP} = \exp(1,7902 - 1,3693 D_s) 15000^{-0,1983}$	0,93
<b>VN</b>	$\theta_{PMP} = \exp(-0,6441 + 0,1354 D_s) 15000^{-0,1660}$	0,88
<b>CIP</b>	$\theta_{PMP} = \exp(-0,5580 - 0,0506 D_s) 15000^{-0,1367}$	0,88
Conteúdo de água base volumétrica para RP de 3,5 MPa ( $\theta_{RP}$ )		
<b>AGP</b>	$\theta_{RP} = (3,5/0,0727 D_s^{-1,4517})^{1/3,2815}$	0,86
<b>SILV</b>	$\theta_{RP} = (3,5/0,2417 D_s^{-1,7108})^{1/0,5569}$	0,84
<b>VN</b>	$\theta_{RP} = (3,5/0,0482 D_s^{-1,9645})^{1/4,0130}$	0,86
<b>CIP</b>	$\theta_{RP} = (3,5/0,0259 D_s^{-2,5301})^{1/3,6249}$	0,91

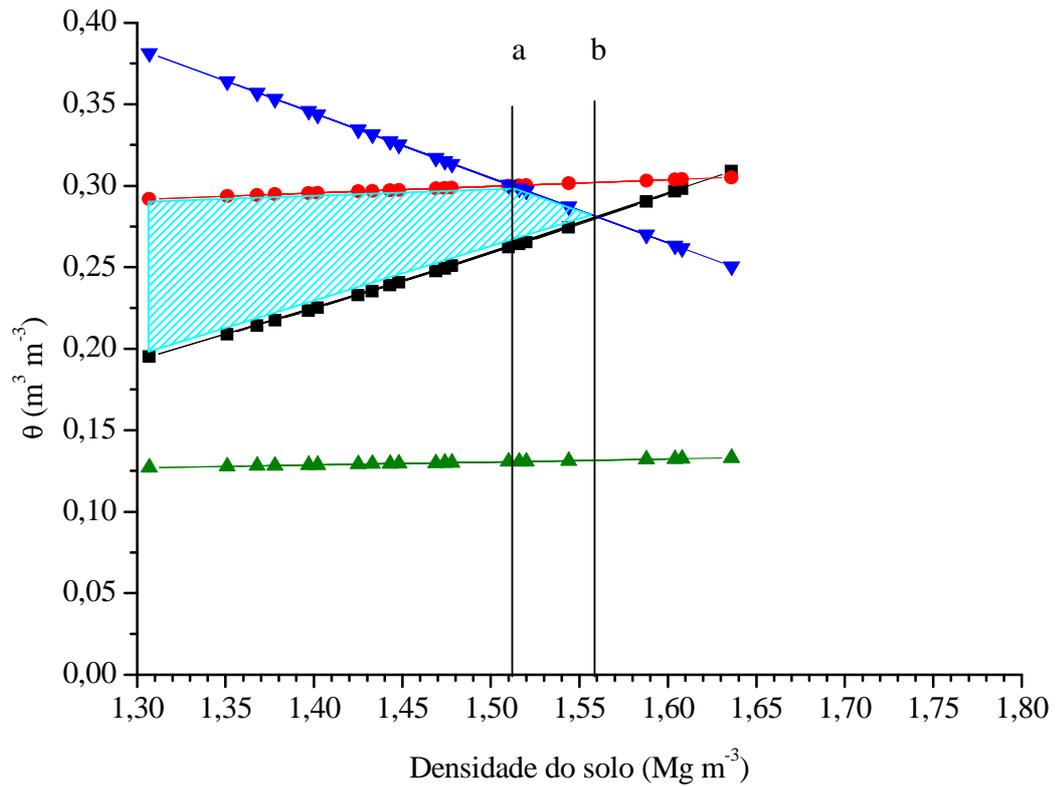
**AGP:** Agrissilvipastoril; **SILV:** Silvipastoril; **VN:** Vegetação natural; **CIP:** Cultivo intensivo em pousio.



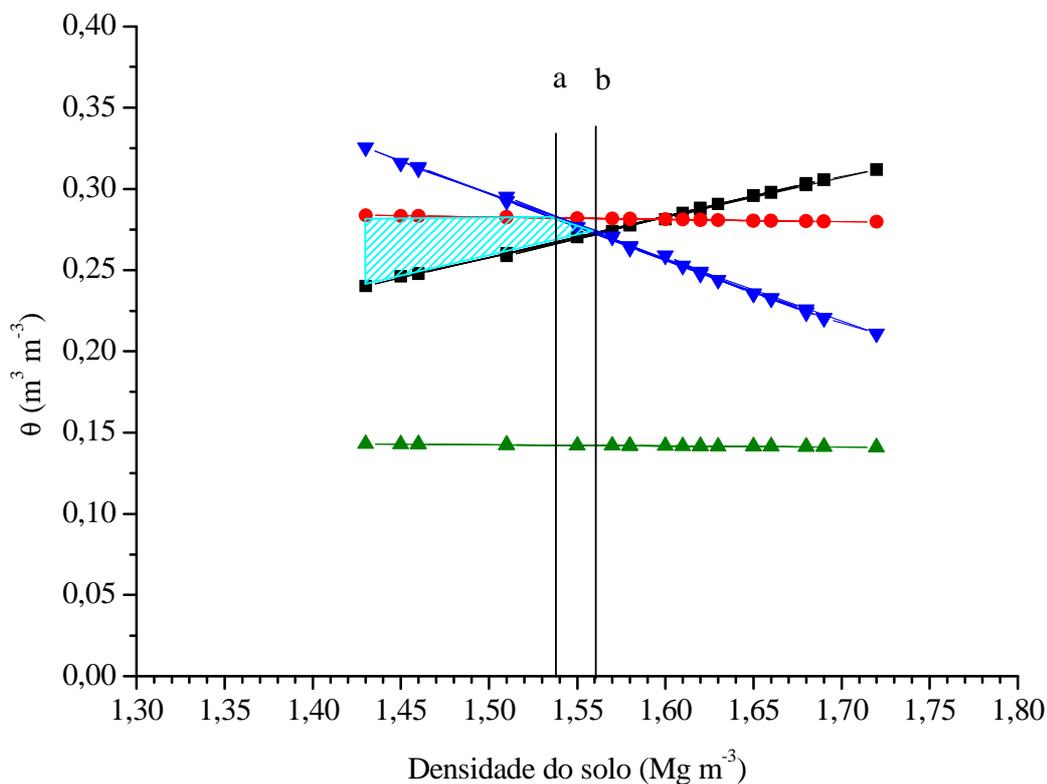
**Figura 3.** Variação do conteúdo de água com a Ds nos níveis críticos da capacidade de campo ( $\psi = -0,01$  MPa), ponto de murcha permanente ( $\psi = -1,5$  MPa), porosidade de aeração de 10% e resistência à penetração de 3,5 MPa no sistema agrissilvipastoril na camada de 0 a 5 cm. A área hachurada representa o IHO do solo. A densidade em que a porosidade de aeração substitui a capacidade campo como limite superior do IHO é demonstrada em (a) e densidade crítica ( $D_{sc}$ ) em (b). ■  $\theta_{RP}$ ; ● =  $\theta_{CC}$ ; ▲ =  $\theta_{PMP}$  e ▼ =  $\theta_{PA}$ .



**Figura 4.** Variação do conteúdo de água com a  $D_s$  nos níveis críticos da capacidade de campo ( $\psi = -0,01$  MPa), ponto de murcha permanente ( $\psi = -1,5$  MPa), porosidade de aeração de 10% e resistência à penetração de 3,5 MPa no sistema silvipastoril na camada de 0 a 5 cm. A área hachurada representa o IHO do solo. A densidade em que a porosidade de aeração substitui a capacidade campo como limite superior do IHO é demonstrada em (a) e densidade crítica ( $D_{sc}$ ) em (b). ■ =  $\theta_{RP}$ ; ● =  $\theta_{CC}$ ; ▲ =  $\theta_{PMP}$  e ▼ =  $\theta_{PA}$ .



**Figura 5.** Variação do conteúdo de água com a  $D_s$  nos níveis críticos da capacidade de campo ( $\psi = -0,01$  MPa), ponto de murcha permanente ( $\psi = -1,5$  MPa), porosidade de aeração de 10% e resistência à penetração de 3,5 MPa no sistema vegetação natural na camada de 0 a 5 cm. A área hachurada representa o IHO do solo. A densidade em que a porosidade de aeração substitui a capacidade campo como limite superior do IHO é demonstrada em (a) e densidade crítica ( $D_{sc}$ ) em (b). ■ =  $\theta_{RP}$ ; ● =  $\theta_{CC}$ ; ▲ =  $\theta_{PMP}$  e ▼ =  $\theta_{PA}$ .



**Figura 6.** Variação do conteúdo de água com a  $D_s$  nos níveis críticos da capacidade de campo ( $\psi = -0,01$  MPa), ponto de murcha permanente ( $\psi = -1,5$  MPa), porosidade de aeração de 10% e resistência à penetração de 3,5 MPa no sistema cultivado intensivo em pousio na camada de 0 a 5 cm. A área hachurada representa o IHO do solo. A densidade em que a porosidade de aeração substitui a capacidade de campo como limite superior do IHO é demonstrada em (a) e densidade crítica ( $D_{sc}$ ) em (b). ■ =  $\theta_{RP}$ ; ● =  $\theta_{CC}$ ; ▲ =  $\theta_{PMP}$  e ▼ =  $\theta_{PA}$ .

Segundo Tormena et al. (1998a), a densidade do solo está associada à retenção de água decorrente de sua influência na porosidade total e distribuição dos tamanhos dos poros. Klein & Libardi (2002), estudando a densidade do solo e a distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo, mata secundária, plantio direto, verificaram que no solo do sistema de manejo de sequeiro em relação ao solo da vegetação natural, a 0,10 m de profundidade, houve redução da porosidade total em torno de 12%, bem como macroporos em 24%. Com estes resultados ficou comprovado que no processo de compactação, ocorre a transformação de macro em microporos. Em vários trabalhos de IHO em Latossolos, têm-se observado um aumento na retenção de água no ponto de murcha permanente com o incremento da densidade do solo. Tormena et al. (2007) explicam que essa relação positiva é devido à maior massa de partículas com elevada superfície de adsorção, uma vez que a compactação não afeta a microporosidade intragregados, o mesmo não acontecendo em outros tipos de solo (van den Berg et al., 1997).

Simultaneamente ao aumento da densidade do solo, ocorreu um aumento na  $\theta_{RP}$  e um decréscimo na  $\theta_{PA}$  (Figuras 3, 4, 5 e 6), este resultado está em concordância com Silva et al. (1994), Tormena et al. (1998, 1999a) e Freddi et al. (2007). O aumento da resistência à penetração com a  $D_s$  está relacionado ao efeito da compactação do solo, já que as partículas ficam mais próximas à medida que o solo é compactado (Sojka et al., 2001).

A variação da densidade do solo teve grande impacto sobre a resistência à penetração (Figuras 3, 4, 5 e 6). A  $\theta_{RP}$  representa o limite inferior em 100% das amostras, para todos os tratamentos, o que se deve ao fato dos altos valores de densidade encontrados neste solo, ou seja, não houve valor de no qual a  $\theta_{PMP}$  fosse considerada o limite inferior do IHO. Este resultado indica limitações no crescimento da raiz a baixos conteúdos de água. Na maioria dos sistemas agrícolas em que o IHO foi estudado, verificou-se que a resistência à penetração, em comparação com a aeração do solo é a variável que mais frequentemente limita o IHO (Silva et al., 1994; Zou et al., 2000; Leão et al., 2005; Klein & Camara, 2007).

Ao observar as Figuras 3, 5 e 6 constata-se que o limite superior do IHO para os tratamentos AGP, VN e CIP é a  $\theta_{CC}$ , entretanto a partir das  $D_s = 1,65; 1,51$  e  $1,54 \text{ Mg m}^{-3}$ , respectivamente, o IHO passa a ser limitado, na sua parte superior, pela  $\theta_{PA}$ . A partir destes valores de densidade, quando o solo está na sua capacidade de campo, a difusão de oxigênio pode ser insatisfatória, há uma redução significativa dos

macroporos responsáveis pela aeração, acarretando condições físicas desfavoráveis para o crescimento das culturas. Resultados semelhantes foram observados por Araújo et al. (2004) e Tormena et al. (2007).

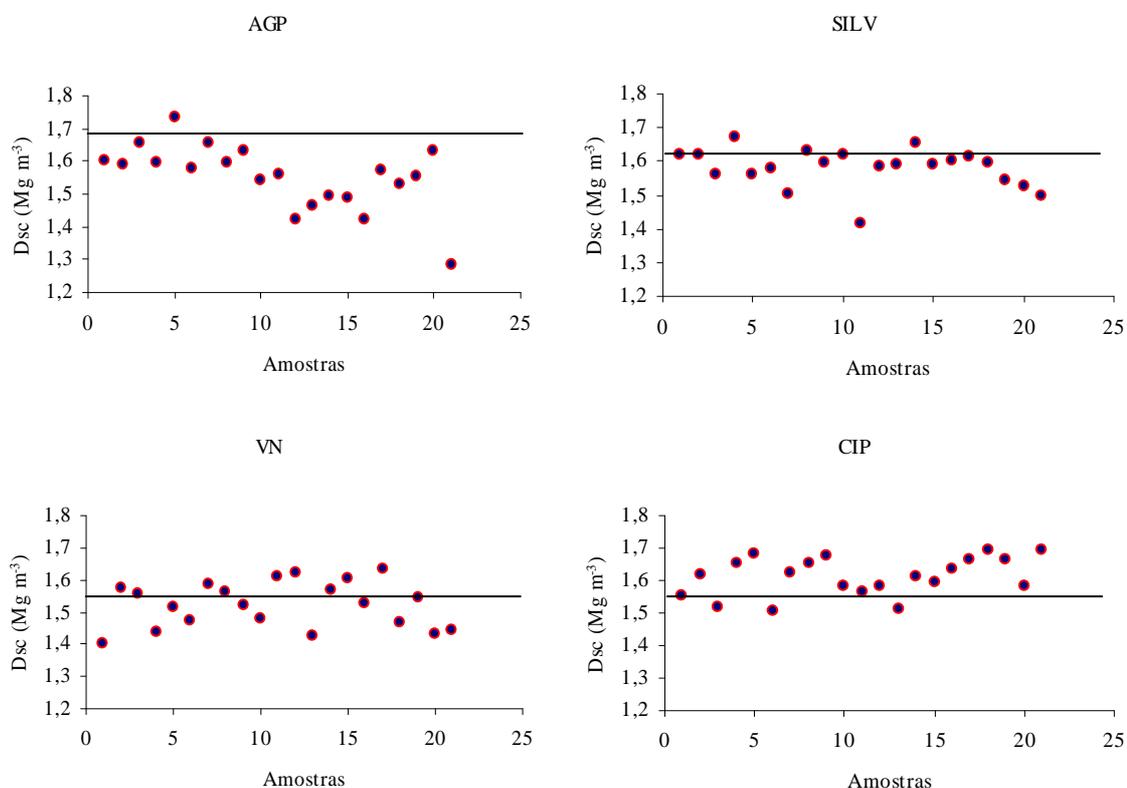
Os valores alterados de densidade do solo nos tratamentos AGP e CIP, comparativamente ao tratamento VN, indicam que o manejo altera o arranjo dos poros e, por conseqüência, a retenção de água e o fluxo de gases. Porém, essa alteração ocorre a uma densidade menor no solo sob cultivo intensivo.

Para o tratamento SILV, o limite superior, em toda a extensão do intervalo é a  $\theta_{PA}$ . Segundo Tormena et al. (1999a), quando  $\theta_{PA} > \theta_{CC}$  ou seja,  $\theta_{CC}$  é o limite superior, ocorre, mesmo na presença de maiores densidades, uma microestrutura estável do solo que preserva o espaço poroso necessário para a troca de gases. No entanto, a redução da  $\theta_{PA}$  nos sistemas em estudo, adverte que devem ser tomadas maiores precauções no manejo do solo para evitar reduções no crescimento radicular devido à falta de oxigênio para a raiz, causadas por compactação do solo. Segundo Silva et al. (1994), a  $\theta_{PA}$  e  $\theta_{RP}$  são mais fortemente influenciadas pela densidade do solo do que as limitações de pressão mátrica, o que indica que o IHO é mais sensível às mudanças na estrutura do solo que à disponibilidade de água.

Durante toda variação de densidade do solo, para os quatro tratamentos, houve diminuição do IHO, até que este se tornasse nulo, ou seja, atingisse sua densidade do solo crítica ( $D_{sc}$ ) (Figuras 3, 4, 5 e 6). Neste estudo, para os tratamentos AGP, SILV, VN e CIP, os valores de  $D_{sc}$  foram, respectivamente: 1,69; 1,62; 1,56 e 1,56  $Mg\ m^{-3}$ . Para os tratamentos AGP, VN e CIP a partir da  $D_s = 1,65$ ; 1,51; e 1,54  $Mg\ m^{-3}$ , respectivamente, o desenvolvimento da raiz já seria restringido. Segundo Leão et al. (2004) e Silva & Kay (1997a), limitações ao crescimento radicular podem ocorrer com valores de  $D_s < D_{sc}$  quando o IHO é muito estreito. Este é o caso do tratamento CIP (Figura 6), intensivamente cultivado de 1997 a 2001 com milho e feijão, o que não acontece com as áreas de vegetação natural e os sistemas agroflorestais.

A Figura 7 ilustra os valores de densidade do solo que ficaram abaixo e acima dos valores de  $D_{sc}$ . Verifica-se que, entre todos os tratamentos, o que mais apresentou amostras com  $D_s > D_{sc}$  foi o CIP, em seguida vem o tratamento VN e por último os SAFs, os quais apresentaram maior número de amostras com  $D_s < D_{sc}$ . Estes resultados indicam que a maior parte da área do tratamento CIP encontra-se condições físicas desfavoráveis ao crescimento das plantas, ao contrário das áreas sob SAFs. Ressalta-se ainda que os tratamentos AGP e SILV comportaram-se melhor que o tratamento

referência, VN. É comum observar valores de  $D_s > D_{sc}$  (Araújo et al., 2004; Leão et al., 2006; Tormena et al., 2008), porém existe uma tendência nos trabalhos de IHO, em que os solos sob sistemas de manejo mais intensivos apresentam com mais frequência, valores de  $D_s > D_{sc}$ .



**Figura 7.** Variação da densidade do solo nas amostras coletadas, em função da densidade do solo crítica ( $D_{sc}$ ), no Luvissole sob sistemas agroflorestais, convencional e vegetação natural na camada de 0 a 5 cm na fazenda Crioula no CNPC, Sobral - CE. **AGP:** Agrissilvipastoril; **SILV:** Silvipastoril; **CIP:** Cultivo intensivo em pousio; **VN:** Vegetação natural.

Araújo et al. (2004) observaram valores de  $D_s > D_{sc}$  para um solo sob cultivos anuais e nenhum valor de  $D_s > D_{sc}$  foi observado para o mesmo solo sob vegetação natural. Leão et al. (2006) constataram que restrições físicas ao crescimento radicular foram mínimas em uma área de cerrado nativo, onde todos os valores de  $D_s$  foram menores que a  $D_{sc}$ . Pelos resultados obtidos neste trabalho pode-se dizer que os SAFs, são capazes de propiciar ao solo melhores condições de crescimento radicular e desenvolvimento da planta.

Conforme Silva & Kay (1997a), a matéria orgânica tem efeito indireto sobre o IHO, pois maiores quantidades de matéria orgânica associam-se a solos com menor densidade promovendo, assim, um IHO mais amplo. Os resultados obtidos por Maia et

al. (2007), nesta mesma área em estudo, demonstram que nas áreas sob SAFs há uma maior entrada anual de resíduos orgânicos em relação ao tratamento CIP. Estes resultados estão associados não só à maior quantidade de resíduos de plantas produzidos pelo raleamento parcial da vegetação nativa que foi deixada sobre a superfície dessas áreas, como também pelos resíduos orgânicos provenientes de capinas e do esterco coletado do aprisco. Tal condição deve estar influenciando na menor densidade do solo sob SAFs, comparativamente à do tratamento CIP.

Silva et al. (1994) apontam variações no IHO para solos com diferentes classes texturais. Neste trabalho, o solo dos quatro tratamento em estudo encontram-se na mesma classe textural, porém ao observar a Tabela 5, constata-se que o tratamento VN apresenta maior conteúdo de argila que os SAFs, com diferença significativa ( $P < 0,05$ ). A argila além de diminuir a densidade do solo tem grande capacidade de retenção de água, assim como matéria orgânica (Brady, 1979; Kiehl, 1989). Portanto, o maior IHO do tratamento VN se deve ao maior conteúdo de argila encontrado neste solo, bem como ao maior conteúdo de matéria orgânica. Segundo Silva & Kay (1997a), a matéria orgânica tem mais efeito no aumento do IHO que o conteúdo de argila do solo.

**Tabela 5.** Distribuição das partículas por tamanho e classificação textural do solo submetido a diferentes sistemas de manejo na camada de 0 a 5 cm, na Fazenda Crioula – CNPC, Sobral – CE

Tratamento/ Contraste	Granulometria			Classificação textural
	Areia	Silte (g kg <sup>-1</sup> )	Argila	
AGP	746	132	122	Franco-arenosa
SILV	693	171	137	Franco-arenosa
MN	635	192	173	Franco-arenosa
CIP	688	167	144	Franco-arenosa
	Contraste ortogonal			
C1	*	*	*	
C2	*	*	ns	
C3	*	*	ns	

AGP: Agrissilvipastoril; SILV: Silvipastoril; VN: Vegetação natural; CIP: Cultivo intensivo em pousio. n = 21.

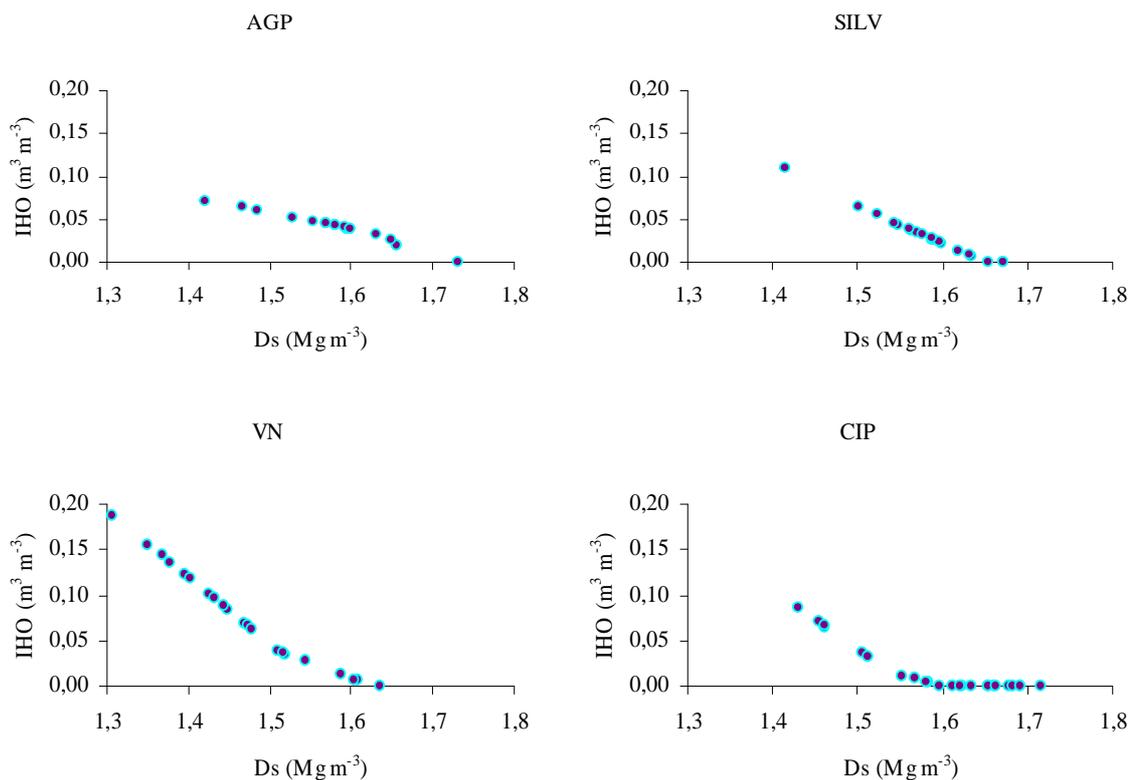
O crescimento de culturas sobre solos que têm uma estreita faixa de IHO é mais vulnerável à seca e ao excesso de umidade do que solos que têm um amplo IHO (Silva et al., 1994). Os resultados deste trabalho sugerem que o IHO é um parâmetro

importante no monitoramento da qualidade física do solo e que os SAFs podem ser uma alternativa de manejo sustentável para o semi-árido, minimizando as adversidades da seca.

A relação entre IHO e Ds é apresentada na Figura 8 para os quatro tratamentos em estudo. O intervalo hídrico ótimo foi negativamente relacionado com a Ds, como também observado por Silva et al. (1994), Leão et al. (2005) e Tormena et al. (2007). Alguns trabalhos desenvolvidos em Latossolos com diferentes formas de manejo mostram que, até um certo valor de Ds, ocorre um incremento do IHO. Tormena et al. (1998a) encontraram uma correlação positiva entre IHO e a Ds até o valor de 1,10 Mg m<sup>-3</sup>, a mesma correlação foi observada por Tormena et al. (1999a) até a Ds= 1,02 Mg m<sup>-3</sup>, em sistemas de plantio direto e cultivo convencional.

De acordo com Kay (1989), o decréscimo do IHO caracteriza a perda da qualidade física do solo, considerando a probabilidade das culturas serem expostas a estresses físicos, o que foi constatado por Silva & Kay (1996). Os resultados do presente estudo evidenciam que, comparativamente, ao solo sob vegetação natural, a degradação da estrutura do solo pelo cultivo impõe limitações ao crescimento das plantas, reduzindo a água disponível e restringindo a aeração sob elevada Ds ou, ainda, pela elevação da resistência do solo à penetração.

A amplitude do intervalo hídrico ótimo dos SAFs (tratamentos AGP e SILV) assemelharam-se aos do tratamento VN, os quais proporcionaram baixas restrições de aeração, de potencial matricial e de resistência à penetração para o sistema radicular. Ressalta-se, assim, a vantagem de uso do IHO, pois possibilita a integração de fatores físicos diretamente relacionados ao crescimento das plantas, assim como a indicação da necessidade de práticas de manejo que modifiquem a estrutura do solo para a ampliação do IHO.



**Figura 8.** Variação do IHO em função da densidade do solo (Ds) no Luvissole sob sistemas agroflorestais, convencional e vegetação natural na camada de 0 a 5 cm na fazenda Crioula no CNPC, Sobral - CE. **AGP:** Agrissilvipastoril; **SILV:** Silvipastoril; **CIP:** Cultivo intensivo em pousio; **VN:** Vegetação natural.

## 4.2. Índice S

Os resultados de retenção de água nas tensões aplicadas às amostras de solo e os dados de saturação foram usados para a obtenção dos parâmetros da equação de van Genuchten (1980).

Na Tabela 6, encontram-se os parâmetros de ajuste dos dados experimentais da equação de van Genuchten (1980) e os valores do índice S. Nenhum dos parâmetros de ajuste foi significativo ( $P < 0,05$ ) para nenhum dos contrastes, exceto o parâmetro  $n$  para o contraste C1. O tratamento VN apresentou maior valor de  $n$  que os SAFs, indicando um aumento na inclinação CRA. Segundo Dexter (2004a), a maior inclinação da CRA corresponde a um solo de melhor estruturação e vice-versa, logo o valor do S será maior. Os outros parâmetros não foram significativamente diferentes ( $P < 0,05$ ) para nenhum dos contrastes.

**Tabela 6.** Parâmetros referentes à equação de van Genuchten (1980) e índice de qualidade física do solo (*S*) no Luvissolo sob sistemas agroflorestais, convencional e vegetação natural, na Fazenda Crioula no CNPC, Sobral – CE

Tratamento/ Contraste	Parâmetros de van Genuchten					<i>S</i>	Coeficientes de ajuste
	<i>θ</i> <sub>sat</sub> m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup>	<i>θ</i> <sub>res</sub>	<i>α</i>	<i>m</i>	<i>n</i>		
<b>AGP</b>	0,389	0,070	0,054	0,304	1,543	0,069	0,99
<b>SILV</b>	0,387	0,150	0,042	0,327	1,864	0,066	0,99
<b>VN</b>	0,419	0,143	0,063	0,170	2,788	0,074	0,99
<b>CIP</b>	0,355	0,087	0,049	0,169	1,379	0,035	0,99
	Contraste ortogonal						
<b>C1</b>	ns	ns	ns	ns	*	ns	
<b>C2</b>	ns	ns	ns	ns	ns	*	
<b>C3</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	

**AGP:** Agrissilvipastoril; **SILV:** Silvipastoril; **VN:** Vegetação natural; **CIP:** cultivo intensivo em pousio. **θ<sub>sat</sub>:** conteúdo de água na saturação; **θ<sub>res</sub>:** conteúdo de água residual; **α, m e n:** parâmetros da equação de van Genuchten; **C1 = (AGP + SILV – NV); C2 = (AGP + SILV – CIP); C3 = (AGP + SILV).**

Com relação aos valores do índice *S*, um único contraste apresentou diferença significativa ( $P < 0,05$ ), o C2, ou seja, os maiores valores de *S* dos SAFs em relação ao tratamento CIP (Tabela 6), evidenciam que o solo cultivado com os sistemas agrissilvipastoril e silvipastoril possui uma qualidade estrutural superior ao solo sob cultivo intensivo, uma vez que nesta área, não ocorre a mesma entrada de resíduos orgânicos (Maia et al., 2007), o que resulta em um aumento da *D<sub>s</sub>* e redução do COT (Tabela 7) e portanto, na degradação estrutural do solo.

Os sistemas agroflorestais apresentaram valores de *S* significativamente iguais ao do tratamento VN (contraste C1), ou seja, as áreas sob o cultivo de SAFs não diferem das condições naturais. Estes resultados não corroboram com os de Aguiar (2008), que observou valor de *S* significativamente maior em um Argissolo sob SAF, no semi-árido cearense, quando comparado ao mesmo solo sob vegetação natural. Os valores do *S* dos tratamentos AGP e SILV, assim como o do VN, estão acima de 0,035, o valor considerado por Dexter (2004a) ideal para o bom desenvolvimento das raízes.

As médias e a significância para os valores de carbono orgânico total (COT) e densidade do solo (*D<sub>s</sub>*) encontram-se na Tabela 7. Estes valores foram obtidos a partir de uma média de 21 amostras, as quais foram selecionadas pelo desvio padrão da média dos valores de *D<sub>s</sub>*, tendo em consideração que algumas amostras foram perdidas pela

presença de cascalhos na análise de RP.

**Tabela 7.** Médias e significância de contrastes ( $P < 0,05$ ) de carbono orgânico total (COT) e densidade do solo (Ds) no Luvisolo sob sistemas agroflorestais, convencional e vegetação natural na camada de 0 a 5 cm na fazenda Crioula no CNPC, Sobral – CE

<b>Tratamento Contraste/</b>	<b>COT (g kg<sup>-1</sup>)</b>	<b>Ds g cm<sup>-3</sup></b>
<b>AGP</b>	27,4	1,55
<b>SILV</b>	26,2	1,58
<b>VN</b>	35,2	1,52
<b>CIP</b>	22,8	1,61
<b>C1</b>	*	*
<b>C2</b>	ns	*
<b>C3</b>	ns	ns

**AGP:** Agrissilvipastoril; **SILV:** Silvipastoril; **VN:** Vegetação natural; **CIP:** Cultivo intensivo em pousio. **C1 = (AGP + SILV – NV); C2 = (AGP + SILV – CIP); C3 = (AGP + SILV).**

Constatou-se um incremento de COT do solo cultivado para a vegetação natural e uma redução da densidade do mesmo, semelhante observação foi feita por Machado (2006) e Aguiar (2008). No contraste C1 o tratamento VN apresentou maior conteúdo de COT que os SAFs, sendo que, para os outros contrastes, não houve diferenças significativas ( $P < 0,05$ ). A não ação antrópica ao longo dos anos promoveu ao solo, sob condições naturais um acúmulo de matéria orgânica, a qual, provavelmente, induziu a redução da sua densidade. Segundo Cardoso et al. (1992), a degradação física de alguns solos está relacionada com a redução nos teores de matéria orgânica. Dexter (2004a) demonstrou que com o incremento de matéria orgânica há um aumento nos valores do índice de qualidade física do solo.

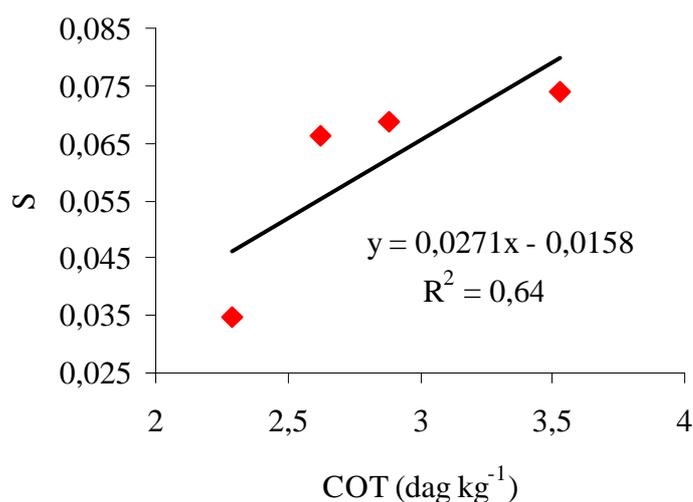
Observa-se pela Tabela 7 que, à medida que ocorre intensificação do uso do solo, há um aumento nos valores médios de densidade do solo. Esses resultados concordam com os obtidos por Silva & Ribeiro (1992), Araújo et al. (2004) e Li & Shao (2006). O aumento na densidade observado no tratamento CIP em relação aos SAFs, o qual foi significativo, pode ter ocorrido devido ao uso intensivo deste solo ao longo dos anos e às perdas de matéria orgânica.

O carbono orgânico do solo tem sido utilizado como indicador da qualidade física do solo. Na Figura 9 verifica-se o mesmo comportamento encontrado por Dexter (2004a) para o solo em estudo, ou seja, uma dependência linear entre o S e o COT. A

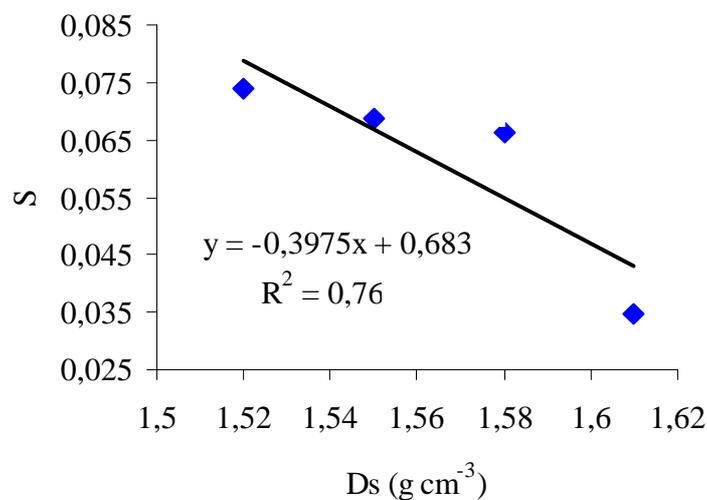
relação positiva entre S e COT é função da influência da matéria orgânica na formação e estabilização de agregados e poros no solo. Contudo aqueles sistemas que mais se aproximam das condições naturais, mais chances terão de promover um maior aporte de matéria orgânica, possibilitando maiores valores de S.

Tais condições favorecem a microestrutura do solo, fazendo com que este tenha uma composição de fendas e microfendas que permitam um desenvolvimento adequado do sistema radicular onde as plantas poderão melhorar o seu desenvolvimento potencial. Entretanto, sistemas de uso e manejo do solo que promovam a redução do teor de COT no solo, terão efeito na degradação da qualidade física do solo.

De acordo com Dexter (2004a), a redução de S está ligada ao incremento da Ds. A relação entre S e Ds, considerando os quatro tratamentos apresenta-se na Figura 10. Neste solo, Ds explica 76% da variação de S e sugere que práticas de manejo que promovam aumentos da Ds implicam em redução de S ou da qualidade física e estrutural do solo. Na área sob vegetação natural, os maiores valores do S estão associados à reduzida densidade do solo e aos maiores teores de matéria orgânica, que garantem a manutenção da porosidade estrutural. O menor valor do S para o tratamento CIP, pode ser atribuído às mudanças estruturais ocorridas nesse solo, no qual predomina poros de diâmetro reduzido, reduzindo a inclinação das curvas de retenção.



**Figura 9.** Índice S em função dos teores de carbono orgânico total (COT) no Luvissole sob sistemas agroflorestais, convencional e vegetação natural.

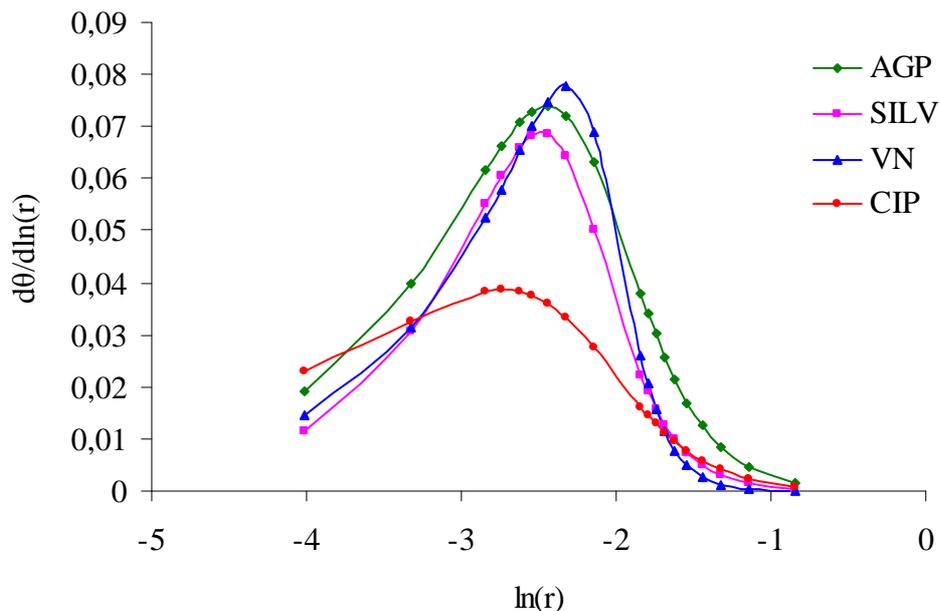


**Figura 10.** Índice S em função da densidade do solo ( $D_s$ ) no Luvissole sob sistemas agroflorestais, convencional e vegetação natural.

O efeito da estrutura do solo sobre os valores de S para os quatro tratamentos, é mostrado na Figura 11. Esta Figura representa a derivada da equação 10 em relação ao logaritmo do raio do poro. O pico da derivada que corresponde ao valor do parâmetro S é muito sensível, até a pequenas variações na distribuição dos poros, mostrando-se mais elevado nos solos sob SAFs e vegetação natural, ou seja, o valor de S o qual coincide com a parte da curva onde volume dos poros aumenta acentuadamente com a diminuição do diâmetro, representa o ponto da curva onde ocorre a maior parte das mudanças durante o processo de compactação.

Observa-se na Figura 11, que o solo do tratamento CIP, o qual apresentou o menor valor de S e portanto, é o menos estruturado, apresenta o pico da derivada no tamanho de poros menor entre todos os tratamentos. Contudo, constata-se que existe uma maior quantidade de poros responsáveis pela retenção de água no solo, para os tratamentos AGP e SILV que para o tratamento CIP.

A Figura 11 também mostra que quanto maior o valor de S menores são os diâmetros do volume máximo de poros, sendo que, com a diminuição do valor de S, o volume máximo de poros apresentou diâmetros maiores.



**Figura 11.** Distribuição do tamanho de poros determinado pela derivação da equação de ajuste da curva de retenção (eq. 10) em relação ao logaritmo do raio do poro no Luvissole sob sistemas agroflorestais, convencional e vegetação natural na camada de 0 a 5 cm na fazenda Crioula no CNPC, Sobral – CE.

A maior densidade do solo do tratamento CIP e o menor teor de COT (o qual não foi significativo), resultaram na degradação estrutural e perda da qualidade física do solo medida pelo índice S. Os maiores valores do S para os SAFs e a sua não diferença significativa com a área de vegetação natural, indicam que esses sistemas de manejo tornam-se fundamentais para a manutenção da qualidade física do solo agrícola na região semi-árida. Os resultados mostram o potencial do índice S para identificar variações na qualidade do solo em função dos sistemas de manejo, o mesmo foi observado por Tormena et al., 2008, ao comparar um sistema de plantio direto com cultivo convencional, em um Latossolo. Ressalta-se que neste estudo, bem como no de Tormena et al. (2008) e em Aguiar (2008), não foram encontrados valores  $< 0,020$ , o qual está associado a estrutura de solo extremamente degradada.

Ambos indicadores, foram sensíveis em avaliar a qualidade física do solo sob os sistemas de manejo em estudo. Tormena et al. (2008) associaram valores de Dsc obtidos por Tormena et al., (1998a; 1999a), através do IHO, com valores de densidade do solo nos quais o índice S ficou entre 0,020 e 0,035 e constataram que tanto o índice S, como o IHO refletem similarmente a qualidade física do solo.

O intervalo hídrico ótimo, bem como, o índice S são parâmetros baseados na CRA, porém o IHO apresenta uma desvantagem, pois requer algumas medições a mais

para sua determinação, como a porosidade de aeração, e densidade do solo. Tais medições demandam tempo e a determinação da resistência à penetração é bastante onerosa, por isso o índice S é um parâmetro de mais fácil determinação, além do que, existem valores pré-determinados para sua avaliação. O estudo de Tormena et al. (2008) sugere que os valores críticos de S para solos temperados podem também ser aplicados nos solos tropicais (Latosolos), porém nos Luvisolos e talvez em outras classes de solo, essa aplicação não seja possível, pois neste estudo observou-se valores de S muito acima dos encontrados por Dexter (2004a) e Tormena et al. (2008). Por isso, estudos em diferentes solos são necessários para melhor avaliar e validar o parâmetro S como um indicador de qualidade física do solo.

O indicador IHO, mesmo sendo mais difícil de determinar, apresenta vantagens que podem auxiliar nos sistemas de manejo e, conseqüentemente, melhorar o crescimento da planta. É possível identificar em que momento o sistema radicular está sofrendo a ausência de oxigênio, devido o excesso de água nos poros do solo, sendo que para isso seria necessário expressar o IHO em termos de potencial matricial, o que foi feito no trabalho de Tormena et al. (1999b). E ainda, identificar quando a raiz está sob impedimento mecânico por falta de água e valores altos de densidade do solo.

Assim os indicadores de qualidade física do solo, IHO e índice S, podem ser úteis para monitorar e avaliar os reflexos dos sistemas de uso e manejo em relação à degradação dos solos, bem como a recuperação da sua estrutura e conseqüentemente da sua qualidade física.

## 5. CONCLUSÃO

1. A resistência do solo à penetração determinou o limite inferior do IHO em todos os tratamentos e reduziu os seus valores com o aumento da densidade do solo.
2. Os solos sob manejo agroflorestal apresentaram qualidade física e estrutural superior e maior capacidade de retenção de água que o solo sob cultivo intensivo;
3. Os resultados apresentados nesse trabalho mostram que tanto o IHO como o índice S refletem sensivelmente a qualidade física do solo estudado nos diferentes sistemas de manejo, mostrando-se eficientes na avaliação da qualidade física do solo.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, M.I. Perdas de sedimentos, água e nutrientes por erosão hídrica em um Luvissole sob sistemas agroflorestais no semi-árido nordestino. Monografia de graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2006. 48p.
- AGUIAR, M.I. Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008. 76p.
- APARÍCIO, V. & COSTA, J.L. Soil quality indicators under continuous cropping systems in Argentine Pampas. *Soil & Till. Res.*, 96:155-165, 2007.
- ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A. & SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:337-345, 2004.
- BARZEGAR, A.R.; YOUSEFI, A. & DARYASHENAS, A. The effect of addition of different amounts and types of organic materials on soil physical properties and yield of wheat. *Plant Soil*, 247:295-301, 2002.
- BENGHOUGH, A.G.; BRANSBY, M.F.; HANS, J.; HANS, J.; McKENNA, S.J.; ROBERTS, T. & VALENTINE, T.A. Root responses to soil physical conditions: Growth dynamics from field to cell. *J. Exp. Botany*, 57:437-443, 2006.

- BERTOL, I.; BEUTLER, J. F.; LEITE, D. & BATISDELA, O. Propriedades físicas de um Cambissolo Húmico afetadas pelo tipo de manejo do solo. *Sci. Agr.*, 58:555-560, 2001.
- BETZ, C.I.; ALLMARAS, R.R.; COPELAND, S.M. & RANDALL, G.W. Least limiting water range: traffic and long-term tillage influences in a Webster soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62:1384-1393, 1998.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.P.; DA SILVA, A.P.; ROQUE, C.G. & FERRAZ, M.V. Soil compactation and least limiting water range in dryland rice yield. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:575-580, 2004.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. & SILVA, A.P. Soil resistance to penetration and least limiting water range for soybean yield in a Haplustox from Brazil. *Braz. Arch. Biol. Techn.*, 48:863-671, 2005.
- BLAKE, G.H. & HARTGE, K.H. Bulk density. In.: KLUTE, A. (ed) *Methods of soil analysis*. 2. ed. Madison, American Society of Agronomy, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 1986. pt. 1, p.363-375.
- BRADY, N.C. *Natureza e propriedades dos solos*. Rio de Janeiro, Livraria Freitas Bastos, 1989. 878p.
- BREMAN, H. & KESSLER, J.J. The potencial benefits of agroforestry in the Sahel and other semi-arid regions. *Europ. J. Agron.*, 7:25-33, 1997.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 3:519-524, 1990.
- CARDOSO, A.; POTTER, R. & DEDECEK, R.A. Estudo comparativo da degradação de solos pelo uso agrícola no noroeste do estado do Paraná. *Pesq. Agropec. Bras.*, 27:349-353, 1992.

- CARVALHO, E.J. M.; FIGUEIREDO, M.S. & COSTA, L.M. Comportamento físico-hídrico de um Podzólico Vermelho-Amarelo câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 34:257-265, 1999.
- CARVALHO, R.; GOEDERT, W. J. & ARMANDO, M. S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistemas agroflorestal. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:1153-1155, 2004.
- CICHOTA, R. & JONG van LIER, Q. Análise da variabilidade espacial de pontos amostrais da curva de retenção de água no solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:585-596, 2004.
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:527-535, 2003.
- DANIEL, O.; COUTO, L.; GARCIA, R.; PASSOS, C. A. M. Proposta para padronização da terminologia empregada em sistemas agroflorestais no Brasil. *R. Árvore*, 23:367-370, 1999.
- DANIEL, O.; COUTO, L.; SILVA, E.; PASSOS, C.A.M.; JUCKSCH, I. & GARCIA, R. Sustentabilidade em sistemas agroflorestais: Indicadores socioeconômicos. *Cienc. Florest.*, 10:159-175, 2000.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density and organic matter and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214, 2004a.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part II. Friability, tillage, tith and hard-setting. *Geoderma*, 120:215-225, 2004b.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality: Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, 120:227-239, 2004c.
- DEXTER, A.R. & YOUNGS, I.M. Soil physic toward 2000. *Soil & Till. Res.*, 24:101-106, 1992.

- DUQUE, G.O. nordeste e as lavouras xerófilas. Fortaleza, Banco do Nordeste do Brasil, 2004, 329p.
- DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A. Defining soil quality for sustainable environment. Madison, Soil Science Society of American, 1994. P. 3-21.
- EHLERS, W.; KOPKE, U; HESSE, F. & BÖHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. *Soil Till. Res.*, 3:261-275, 1983.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECÁRIA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L. & SILVA, A.P. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. *Bragantia*, 66:477-486, 2007.
- GOEDERT, W. J. & OLIVEIRA, S. A. Fertilidade do solo e sustentabilidade da atividade agrícola. In: NOVAIS, F. R.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B. & NEVES, J. C. L. Fertilidade do solo. 1. ed. Minas Gerais, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007, p. 991-1017.
- GARDNER, W.H. Water content. In: KLUTE, A., ed, *Methods of soil analysis, Parte I: Physical and mineralogical methods*. Ed. Madison, Wisconsin (USA), American Society of Agronomy & Soil Science Society of America, 1986. p. 493-544.
- GRABLE, A.R. & SIEMER, E.G. Effects of bulk density, aggregate size, and soil water suction on oxygen diffusion, redox potential and elongation of corn roots. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 32:180-186, 1968.
- GROSSMAN, R.B. & REINSCH, T.G. Bulk density and linear extensibility. In: DANE, J. H.; CLARK TOPP, G., *Methods of Soil Analysis. IV. Physical methods*. Madison, Soil Science Society of American, 2002, p. 201-414.

HILL, R.L.; HORTON, R. & CRUSE, R.M. Tillage effects on soil water retention and pore distribution of two mollisols. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 49:1264-1270, 1985.

HILLEL, D. *Environmental soil physics*. San Diego, Academic Press, 1998, 77p.

HORN, R & BAUMGARTL, T. Dynamic properties of soils. In: SUMMER, M.E., ed. *Handbook of soil Science*. Boca Raton, CRC Press, 2000. p. A19-A51.

JONES, C.A. Effect of soil texture on critical bulk densities for root growth. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47:1208-1211, 1983.

KAY, B.D. Rates of changes of soil structure under different cropping systems. *Adv. Soil Sci.*, 12:1-51, 1989.

KIEHL, E.J. *Manual de Edafologia: relações solo – planta*. São Paulo, Agronômica Ceres, 1979. 262p.

KLAR, A.E.A *água no sistema-planta-atmosfera*. São Paulo, Nobel, 1988. 408p.

KLEIN, V.A. & CAMARA, R.K. Rendimento da soja e intervalo hídrico ótimo em Latossolo Vermelho sob plantio direto e escarificado. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:221-227, 2007.

KLEIN, V.A. & LIBARDI, P.L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um Latossolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso e manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:857-867, 2002.

KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C. A., *Methods of Soil analysis. I. Physical and mineralogical methods*. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of American, 1986, p. 635-662.

LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO; M.C.M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V.P.S. Least limiting water range in the evaluation of continuous and short-duration grazing systems. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:415-422, 2004.

- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P MACEDO; M.C.M.; IMHOFF, S. & EUCLIDES, V.P.B. Least limiting water range: a potential indicator of changes in near-surface soil physical quality after the conversion of Brazilian Savanna into pasture. *Soil & Till. Res.*, 88:279-285, 2006.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P; PERFECT, E. & TORMENA, C.A. An algorithm for calculating the least limiting water range of soils. *Agron. J.*, 97:1210-1215, 2005.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277–294, 1985.
- LI, Y.Y. & SHAO, M.A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China. *J. Arid Env.*, 64:77-96, 2006.
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. São Paulo, Universidade de São Paulo, 2005. 335p.
- LIMA, P.C.F. Sistemas agrossilviculturais desenvolvido no nordeste brasileiro. *Boletim de Pesquisa Florestal*, 16:7-17, 1988.
- MACHADO, J.L. Qualidade física de solo em distintos sistemas de uso e manejo quantificado pelo índice S. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual de Maringá, 2006. 45p.
- MAIA, S.M.F. XAVIER, F.A.S.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S. & ARAÚJO FILHO, J.A. Impactos de sistemas agroflorestais e convencional sobre a qualidade do solo no semi-árido cearense. *R. Árvore*, 30:837-848, 2006.
- MAIA, S. M. F.; XAVIER, F. A. S.; OLIVEIRA, T. S.; MENDONÇA, E. S. & ARAÚJO FILHO, J. A. Organic carbon pools in Luvisol under agroforestry and conventional farming systems in the semi-arid region of Ceará – Brasil. *Agroforest. Syst.*, 71:127-138, 2007.

- MARQUES, J.D.O.; LIBARDI, P.L.; TEIXEIRA, W.G. & REIS, A.M. Estudo de parâmetros físicos, químicos e hídricos de um Latossolo Amarelo na região amazônica. *Acta Amazônica*, 34:145-154, 2004.
- MORGADO, L.B. & RAO, M.R. Conceitos e métodos experimentais em pesquisas com consorciação de culturas. Petrolina, EMBRAPA/CPATSA, 1986. 79p. (Documentos, 43).
- MUALEM, Y. Hydraulic conductivity of unsaturated soils: prediction and formulas. In: Klute, A., *Methods of Soil analysis. I. Physical and mineralogical methods*. 2 ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of American, 1986, p. 799-823.
- NAIR, P.K.R. *An Introduction Agroforestry*. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, ICRAF. 1993, 499p.
- RAWLS, W.J.; PACHEPSKY, Y.A.; RITCHIE, J.C.; SOBECKI, T.M. & BLOODWORTH, H. Effect of soil organic carbon on soil water retention. *Geoderma*, 116:61-76, 2003.
- REICHARDT, K. Capacidade de campo. *R. Bras. Ci. Solo*, 12:211-216, 1988.
- REICHARDT, K. *A água em sistemas agrícolas*. São Paulo, Editora Manole LTDA, 1990. 188p.
- RODIGHERI, H.R. Rentabilidade econômica comparativa entre plantios florestais e sistemas agroflorestais com erva-mate, eucalipto e pinus e as culturas do feijão, milho, soja e trigo. Colombo, EMBRAPA/CNPQ, 1997, 35p. (Circular Técnica, 26).
- ROSS, P.J.; WILLIAMS, J. & BRISTOW, K.L. Equation for extending water-retention curves to dryness, *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 55: 923-927, 1991.

- RUIZ, H.A. Incremento da exatidão da análise granulométrica do solo por meio da coleta da suspensão (silte + argila). R. Bras. Ci. Solo, 29:297-300, 2005.
- SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L. & DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability, Agron. J., 88:844-851, 1996.
- SEVERINO, C.C. Sistemas de manejo agroflorestal no Chile: descrição de um experimento de manejo silvipastoril com pinus radiata. Boletim de Pesquisa Florestal. 19:23-30, 1989.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. Plant Soil. 184: 323-329, 1996.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. Soil Sci. Soc. Am. J., 61:877-883, 1997a.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. Soil Sci. Soc. Am. J., 61:884-888, 1997b.
- SILVA, A.P. & KAY, B.D. Linking process capability analysis and least limiting water range for assessing soil physical quality. Soil & Till. Res., 79:167-174, 2004.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. Soil Sci. Soc. Am. J., 58:1775-1781, 1994.
- SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L. & CAMARGO, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. R. Bras. Ci. Solo, 10:91-95, 1986.
- SILVA, E.M.; LIMA, J.E.F. W.; AZEVEDO, J.A. & RODRIGUES, L.N. Valores de tensão na determinação da curva de retenção de água de solos do cerrado. Pesq. Agropec. Bras., 41:323-330, 2006.
- SILVA, M.S.L. & RIBEIRO, M.R. Influência do cultivo contínuo da cana-de-açúcar em propriedades morfológicas e físicas de solos argilosos de tabuleiro no estado de Alagoas R. Bras. Ci. Solo, 16:397-402, 1992.

- SOJKA, R.E.; BUSSCHER, W.J & LEHRSCHE, G.A. In Situ strength, bulk density, and water content relations of a durinodic xeric haplocalcid soil. *Soil Sci.*, 166:520-529, 2001.
- TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; FIDALSKI, J. & COSTA, J.M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:211-219, 2007.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:573-581, 1998a.
- TORMENA, C.A.; ROLOFF, G.; SÁ, J.C.M. Propriedades físicas do solo sob plantio direto influenciadas por calagem, preparo inicial e tráfego. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:301-309, 1998b.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.D.C. & DEXTER, A.R. Quantification of the soil physical quality of a tropical Oxisol using the S index. *Sci. Agri.* 65:56-60, 2008.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; GONÇALVES, A.C.A & FOLEGATTI, M.V. Intervalo hídrico ótimo de potencial da água no solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. *R. Bras. Agri. Ambient.* 3:286-292, 1999b.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the east limiting water range. *Soil & Till. Res.* 52:223-232, 1999a.
- TÓTOLA, M.R. & CHAER, G.M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: ALVAREZ, V.H; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V & COSTA, L.M. 1. ed. Minas Gerais. Tópicos em ciências do solo, SBCS, 2:195-276, 2002.

- VAN GENUTCHEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Madison, Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.
- VAN DEN BERG, M.; KLAMT, E.; VAN REEUWIJK, L.P. & SOMBROEK, W.G. Pedrotransfer functions for the estimation of moisture retention characteristics of Ferralsols and related soils. *Geoderma*, 78:161-178, 1997.
- WALCZAK, R.T.; MORENO, F.; STAWINSKI, C.; FERNADEZ, E. & ARRUE, J.L. Modeling of soil water retention curve using soil solid phase parameters. *J. Hydrol.*, 329:527-533, 2006.
- WU, L.; FENG, G.; LETEY, J.; FERGUSON, L.; MITCHELL, T.; McCULLOUGH-SANDEN, B & MARKEGARD, G. Soil management effects on the nonlimiting water range. *Geoderma*, 114:401-414, 2003.
- ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G. & HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. *Aus. J. Res.*, 38:947-958, 2000.
- YEOMANS, J.C. & BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Comm. Soil Sci. Plant Anal.*, 19:1467-1476, 1988.