

Avaliação da qualidade física de solos em áreas irrigadas na Chapada do Apodi,  
Ceará

VIRGINIA PIRES PEREIRA

FEVEREIRO-2010  
FORTALEZA - CEARÁ  
BRASIL

Avaliação da qualidade física de solos em áreas irrigadas na Chapada do Apodi,  
Ceará

**VIRGINIA PIRES PEREIRA**

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.

FEVEREIRO-2010  
FORTALEZA - CEARÁ  
BRASIL

P489q Pereira, Virginia Pires  
Avaliação da qualidade física de solos em áreas irrigadas na Chapada do Apodi, Ceará / Virginia Pires Pereira. -- Fortaleza, 2010.  
57 f. ; il., color.; enc.

Orientadora: Profa. Dra. Maria Eugênia Ortiz Escobar  
Co-orientador: Genelício Crusoé Rocha  
Área de concentração: Solos e Nutrição de Plantas  
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências Agrárias, Depto. de Ciências do Solo, Fortaleza, 2010.

1. Degradação. 2. Intervalo Hídrico. 3. Densidade Relativa. I. Escobar, Maria Eugênia Ortiz (Orient.). II. Rocha, Genelício Crusoé. III. Universidade Federal do Ceará – Pós-Graduação em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas. IV. 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.

---

Virginia Pires Pereira

Dissertação aprovado em: 19/02/2010

---

Prof<sup>a</sup>. Maria Eugenia Ortiz Escobar - Doutora  
(Orientadora)

---

Prof. Genelício Crusoé Rocha - Doutor  
(Co-orientador)

---

Prof. Raimundo Nonato de Assis Júnior - Doutor  
(Examinador)

A minha tia, madrinha e segunda mãe, **Regina Célia Lima Pires** (*in memoriam*), pelo amor, amizade, alegria, bom humor e carinho que tanta falta me fazem. Partiu deste mundo no momento em que eu estava ausente, que devido à distância não pude dar meu último adeus. Esta pessoa que deixou um rastro luminoso de uma lembrança preciosa e uma saudade eterna foi exemplo de luta pela vida, fé e esperança.

Dedico.

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, o maior mestre de todos, pela sua presença constante na minha vida, iluminando sempre os meus caminhos e concedo-me forças pra vencer os obstáculos da vida.

Agradeço à minha família, em especial aos meus pais, pelo exemplo de dedicação e amor aos filhos; e pelo incentivo, confiança e apoio nesta etapa da minha vida.

Ao meu namorado André Viana Oliveira, por ter partilhado comigo dos bons, bem como dos mais difíceis momentos dessa etapa da minha vida, pelo companheirismo e preciosa ajuda na árdua semana de coleta das amostras, pelas suas incansáveis manifestações de carinho, paciência, compreensão, confiança, e espera nas minhas horas de ausência, sacrificando muitos momentos que poderíamos ter desfrutado juntos.

À Universidade Federal do Ceará (UFC), por todas as oportunidades e ensinamentos transmitidos. Ao Departamento de ciências do solo (DCS) e à coordenação do Curso de Pós-graduação, professor Dr. Ricardo Espíndola Romero, pelas gentilezas, acessibilidade e ensinamentos.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão de bolsa durante o período de mestrado. Ao CNPq/FUNCAP pela concessão de bolsa DCR da orientadora e ao Banco do Nordeste do Brasil pelo apoio financeiro.

A todos os professores com os quais tive oportunidade de ser aluna durante o curso de mestrado, também aos que não tive esta oportunidade, mais que contribuíram para minha formação e despertar do desejo de aprender, bem como a admiração pela Ciência do Solo.

Ao professor Teógenes Senna de Oliveira, pela idealização do projeto de dissertação.

À professora Maria Eugênia Ortiz Escobar, agradeço pela sua orientação que me ajudou a melhorar como estudante e como profissional.

Ao professor Genelício Crusoé Rocha, pela amizade, co-orientação, idéias construtivas para o engrandecimento deste trabalho, acessibilidade e dedicação com que me recebeu nos momentos de dúvidas.

Ao professor Raimundo Nonato de Assis Júnior, pela participação na banca avaliadora, pela revisão precisa e comentários valiosos.

Aos funcionários do DCS - UFC, em especial ao Eng. Agro. Francisco José (Franzé) (LFS) pela ajuda no laboratório e pela amizade.

Ao PROCAD/CAPES pelo apoio financeiro e oportunidade de realizar parte das análises da dissertação no Laboratório de Física do Solo - Departamento de Solos - Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Aos funcionários do DPS (UFV), em especial aos laboratoristas Bené, Claudio, Carlinhos, Seu Lampinha e Geraldo, pela colaboração nas análises e pelos momentos de descontração nos intervalos do cafezinho. Ao estagiário Fred (UFV), pelo auxílio nas análises de laboratório.

À todos os amigos e amigas que conquistei nesta jornada, tornando-a mais alegre e prazerosa. Em especial: Giovana Lopes pela amizade, pelos conselhos, estímulo, e ajuda nas minhas análises que muito me foram valiosas. Gislaine Marques, pela amizade, companheirismo e descontração nos momentos mais tensos, tornando-os motivos de risos. Aos amigos que conquistei quando estive na UFV, em especial: Eliana Lima e Lorena Abdalla pela amizade, apoio e companheirismo.

A todos que fazem ou fizeram parte do AGRENA, por nossas discussões científicas e pelos momentos de descontração antes das reuniões. Aos amigos e amigas da turma de pós-graduação (2008.1), aos amigos, não citados, meu muito obrigado, por também fazerem parte desta jornada.

Enfim, a todos, que de certa forma, contribuíram para a realização desta dissertação, seja pela ajuda laboratorial ou por uma palavra de amizade!

**Muito obrigada a todos!**

## SUMÁRIO

	pág
<b>RESUMO</b>	<b>viii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>ix</b>
<b>1. INTRODUÇÃO</b>	<b>10</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Qualidade do solo</b>	<b>12</b>
2.1.1 Qualidade física do solo	13
<b>2.2 Índice S</b>	<b>14</b>
<b>2.3 Intervalo hídrico ótimo</b>	<b>17</b>
<b>2.4 Densidade relativa</b>	<b>19</b>
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Localização das áreas</b>	<b>21</b>
<b>3.2 Descrição das áreas</b>	<b>22</b>
<b>3.3 Coleta e análises</b>	<b>24</b>
3.3.1 Análise granulométrica	24
3.3.2 Curva de retenção de água	25
3.3.3 Cálculo do índice S	26
3.3.4 Resistência à penetração	27
3.3.5 Densidade do solo	27
3.3.6 Densidade de partículas	28
3.3.7 Cálculo do Intervalo hídrico ótimo	28
3.3.8 Densidade relativa	30
<b>3.4. Análises estatísticas</b>	<b>31</b>
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>33</b>
<b>5. CONCLUSÕES</b>	<b>50</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>51</b>



## RESUMO

O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade física de solos cultivados em áreas irrigadas no Estado do Ceará, Brasil, através da utilização do intervalo hídrico ótimo (IHO), o índice S e da densidade relativa. Amostras indeformadas de solo foram coletadas nas profundidades de 5-10 cm e 20-25 cm em seis áreas: área sob cultivo de banana, área sob cultivo de goiaba, área sob cultivo de milho e feijão em sucessão, área de pastagem e duas áreas sob mata nativa, localizadas no Perímetro Irrigado Jaguaribe-Apodi, Limoeiro do Norte, Ceará, Brasil. O IHO foi determinado usando a curva de retenção de água, a resistência do solo à penetração e a densidade do solo, necessárias para obter o limite superior e inferior. O índice S foi obtido a partir da curva de retenção de água. A densidade relativa foi determinada pela relação entre densidade do solo e densidade máxima do solo ( $D_m$ ) obtida pelo teste de Proctor normal com reuso do material. Com base nestes indicadores foi encontrado que os solos sob cultivo de banana e goiaba apresentaram boa qualidade física do solo e melhores condições para o crescimento das raízes e desenvolvimento das plantas em ambas as profundidades, enquanto os solos sob milho e feijão em sucessão na profundidade de 5-10 cm e pastagem nas duas profundidades mostraram forte perda de qualidade física do solo. O IHO, índice S e densidade relativa foram bons indicadores da qualidade física do solo, e notou-se que os solos sob cultivos sofreram alterações em sua estrutura em comparação aos solos sob mata nativa.

**Palavras-chave:** *degradação, estrutura, índice S, intervalo hídrico ótimo, densidade relativa.*

## ABSTRACT

The objective of this research was to evaluate the soil physical quality of irrigated areas in the State of Ceará, Brazil, through the use of the Least Limiting Water Range (LLWR), the S index and the relative density. Undisturbed soil samples were collected at 5-10 cm and 20-25 cm depth in six areas, area under banana cultivation, area under guava cultivation, area under maize and beans cultivation in succession, pasture area and two areas under natural vegetation, located in the Jaguaribe-Apodi Irrigated District, Limoeiro do Norte, Ceará, Brazil. The LLWR was determined using the water retention curve, the soil resistance to penetration and soil bulk density, parameters needed to obtain the upper and lower limit. The S index was obtained from the water retention curve. The determination of the relative density was determined by the ratio of bulk density and maximum density of the soil ( $D_m$ ) obtained from the standard Proctor test with reuse of the material. Based on these indicators was found that the areas under cultivation of banana and guava shown good soil physical quality and better conditions for root growth and plant development at both depths, while the areas under maize and beans in succession at 5-10 cm depth and pasture area at both depths showed strong loss of soil physical quality. The LLWR, S index and relative density seem to be good indicators of soil physical quality, and was noticed that soils under cultivation suffered alteration of their structure compared to soils under natural vegetation.

**Key words:** *degradation, structure, S index, least limiting water range (llwr), relative density.*

## 1 INTRODUÇÃO

O avanço da agricultura na maioria das regiões ocorre com a retirada da mata nativa para a introdução de sistemas de manejo que têm como objetivo oferecer condições adequadas para o crescimento, desenvolvimento e produtividade das culturas e até erradicar plantas invasoras.

Nas regiões áridas e semi áridas do planeta a precipitação pluvial é bastante variável e deficiente, e a forma mais adequada de evitar a perda da produção das culturas é a implantação de agricultura irrigada a qual disponibiliza e distribui água adequadamente ao desenvolvimento normal das plantas.

A agricultura irrigada tem alcançado grande expressividade no setor produtivo mundial com uma área irrigada em torno de 260 milhões de hectares (correspondente a 17% da área cultivada) (Barreto & Silva, 2004), respondendo por 40% da produção mundial de alimento (FAO, 2002). No Brasil, aproximadamente 5% da área cultivada é irrigada, correspondendo a 16% do total da produção e 35% do valor econômico dessa produção (Paz et al., 2000).

No entanto, não se encontram apenas vantagens com irrigação. Com a intensificação dos cultivos e utilização de forma inadequada dos solos nas áreas irrigadas, o comportamento radicular das plantas pode ser prejudicado frente aos problemas acarretados, como a degradação da estrutura do solo, pois existem faixas de umidade que tornam o solo mais ou menos susceptível a esta degradação.

Diante do exposto, tem crescido a preocupação por buscas de alternativas de uso e manejo do solo que melhorem ou mantenham a qualidade física do solo, que é um

termo relacionado às funções específicas deste, e que tem desempenhado papel central nos estudos de qualidade dos solos.

Devido à importância do conhecimento das características físicas dos solos para que produtores e técnicos tenham a capacidade de conduzir um adequado manejo do solo, das culturas, e até da irrigação, devido à crescente ampliação e intensificação das áreas irrigadas no Ceará, várias abordagens têm sido feitas reunindo diferentes atributos em um reduzido número de indicadores que expressam o ambiente físico a que as plantas são submetidas, entre as quais se destacam índice S, intervalo hídrico ótimo e densidade relativa.

Nesse contexto, o presente trabalho parte da hipótese de que os sistemas de uso em áreas irrigadas afetam os atributos físicos dos solos. Assim, o objetivo geral foi avaliar a qualidade física de solos cultivados com culturas anuais e perenes em áreas irrigadas da Chapada do Apodi, Ceará.

## 2 REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Qualidade do solo

Qualidade do solo não é ideia nova, no entanto, só nos últimos anos tem sido fonte de crescente preocupação e considerada importante para a avaliação da extensão da degradação ou melhoria da terra, e para identificação de práticas de manejo para uso sustentável (Dexter, 2004a).

Qualidade do solo é definida como a capacidade do solo de exercer várias funções, dentro dos limites do uso da terra e do ecossistema natural, como sustentar a produtividade e diversidade biológica, manter ou melhorar a qualidade do ar e da água e contribuir para a saúde das plantas, sustentação de estruturas sócio-econômicas e de habitação dos homens e dos animais (Doran & Parkin, 1994).

Um dos desafios atuais da pesquisa é como avaliar a qualidade de um solo de maneira relativamente simples e confiável (Doran & Parkin, 1994). Segundo os mesmos autores, devem ser estabelecidos os atributos que determinam a qualidade do solo, e assim poder selecionar um conjunto mínimo de indicadores, ou seja, atributos físicos, químicos e/ou biológicos que possibilitem o monitoramento de mudanças a médio e longo prazo.

Stenberg (1999) enfatiza que nenhum indicador, individualmente, consegue descrever e quantificar todos os aspectos de qualidade do solo, pois deve haver relação entre todos os atributos do solo e dependendo da função para a qual uma avaliação está sendo feita, uma lista quase infinita de indicadores pode ser utilizada (Lal, 1999).

O estabelecimento desses indicadores pode ser útil na tarefa de avaliação de impactos ambientais quando áreas de mata nativa vão sendo incorporadas ao processo produtivo (Araújo et al., 2007) ou para avaliar a sustentabilidade do uso do solo e práticas de manejo (Shukla et al., 2006).

Por isso, para a avaliação de determinadas funções é preciso selecionar indicadores que, de alguma maneira sejam: (a) sensíveis às variações do manejo; (b) bem correlacionadas com as funções desempenhadas pelo solo; (c) úteis para elucidar processos do ecossistema; (d) compreensíveis e úteis para as pessoas que trabalham com a terra; e (e) de fácil mensuração e de baixo custo (Doran & Zeiss, 2000).

### **2.1.1 Qualidade física do solo**

Qualidade física do solo é considerada o principal reflexo das mudanças ocorridas nos atributos do solo (Alves et al., 2007); que exerce forte influência sobre os processos químicos e biológicos do solo, desempenhando assim, um papel central nos estudos da sua qualidade (Dexter, 2004a) e importância na identificação da sustentabilidade nos sistemas manejados (Aratani et al., 2009).

De acordo com Lal (2000), para manter ou melhorar a qualidade física dos solos, deve-se escolher uma técnica de semeadura e cultivo que prejudiquem ao mínimo a estrutura do solo, manejo do resíduo, conservação da água e irrigação, afirmando ainda que, onde ocorre degradação física do solo, a utilização de fertilizantes isoladamente ou em conjunto com variedades melhoradas e medidas de controle de pragas e doenças, a produtividade não pode ser melhorada e nem ser sustentável. Ainda, segundo o autor, o manejo físico do solo implica em melhorar os atributos edafológicos da zona de enraizamento com respeito à estrutura, porosidade e distribuição do tamanho de poros, resistência mecânica, taxa de infiltração, capacidade de armazenamento e de disponibilidade de água e temperatura.

Com isso, qualidade física do solo é entendida como infiltração, retenção e disponibilidade de água no solo às plantas, que responde às práticas de manejo e resiste à degradação, permite as trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes das plantas, promovendo assim condições físicas adequadas para o crescimento das raízes e desenvolvimento das plantas (Reichert et al., 2003).

Valores ótimos relativos à qualidade física do solo para melhorar a produtividade do sistema, mantendo ou melhorando as condições ambientais ainda são

pouco conhecidos (Reynolds et al., 2002). Conhecendo-se os limites críticos, pode-se delimitar faixas de umidade do solo que são mínimos os impedimentos físicos à produção das culturas (Carlesso, 2008).

Para avaliação da qualidade física do solo, é necessário estabelecer medidas de estresse impostas pelo solo ao crescimento das plantas (da Silva & Kay, 2004) e indicadores que identifiquem mudança do comportamento original do solo (Dexter, 2004a) pelos impactos do uso e manejo.

Assim, Imhoff (2002) sugere que devem ser incluídos os atributos físicos que influenciam diretamente a produção das culturas, como forma de sinalizar quando as propriedades de armazenamento e transmissão de fluídos no solo não estejam mais se comportando adequadamente. Para isto, muitos atributos têm sido intensamente estudados, entre eles, densidade, porosidade e resistência à penetração do solo (Beutler et al., 2008a). Porém, as determinações desses atributos envolvem a obtenção de dados de difícil aquisição com dispêndio de tempo e recursos para serem determinadas (da Silva et al., 2009), necessitando assim, ser analisados de maneira conjunta (Carlesso, 2008).

Com isso, Tormena et al. (1998) e Zou et al. (2000), sugeriram que, para a avaliação da qualidade física do solo deve haver diferentes atributos reunidos em um reduzido número de indicadores que expresse o ambiente físico a que as plantas são submetidas. Nesse sentido, tem sido crescente a busca por indicadores capazes de reunir diversos aspectos e condições dos solos, possibilitando uma rápida definição da qualidade física do mesmo, contribuindo assim para uma melhor avaliação das potencialidades e limitações das terras para fins agrícolas, destacando-se o índice S, intervalo hídrico ótimo (IHO) e densidade relativa (Dr).

## **2.2 Índice S**

O índice S foi proposto por Dexter (2004a) como indicador de qualidade física e estrutural do solo. Para Aratani et al. (2009), este parâmetro apresenta importante contribuição para os estudos da qualidade do solo, principalmente pelo grande potencial para ser usado em avaliações da interação entre o manejo e a qualidade física.

A razão fundamental é que S é uma medida da porosidade microestrutural (poros estruturais compreendendo microfendas, fendas, bioporos e macroestruturas produzidas pelo preparo do solo) do solo que controla muitas das principais

propriedades físicas do solo (Dexter, 2004a). O autor utilizou medidas reais de solos, estimativas obtidas a partir de funções de pedotransferências e dados experimentais de trabalhos realizados em vários países com clima temperado para ilustrar a grande aplicabilidade desse parâmetro. Nesses 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, efeitos do preparo do solo com diferentes conteúdos de água e estimativas de condutividade hidráulica.

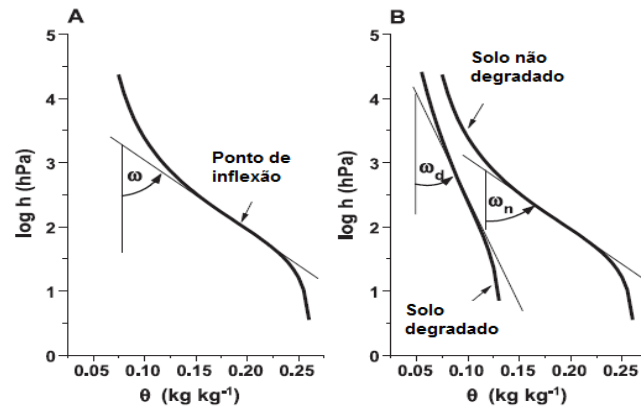
Índice S é definido como a inclinação da curva de retenção de água (CRA) em seu ponto de inflexão (Dexter, 2004a) (Figura 1). A Figura 1 apresenta os gráficos que mostra a relação do potencial de água no solo em logaritmo, e o conteúdo de água à base de massa (Dexter, 2004a).

A Figura 1A apresenta só um ponto característico que é o ponto de inflexão com curvatura zero. Esse ponto tem 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 a qual é matematicamente calculada como sendo:  $S=d\theta/d(\ln\psi)$ , o que corresponde à tangente do ângulo formado entre a reta tangente à curva de retenção de água no solo no ponto de inflexão e a reta paralela ao eixo do potencial de água no solo.

A maior inclinação da curva de retenção de água proporciona maiores valores do índice S, acima de 0,035, geralmente devido à porosidade microestrutural, são indicativos de boa qualidade física do solo às plantas (Dexter, 2004a,b,c), considerado o limite entre solo estruturado e mal estruturado. Quanto menor for o valor de S menor será a inclinação da curva de retenção de água no solo, correspondendo a um solo degradado (Figura 1B). Para Dexter (2004a,b,c), os valores de  $S < 0,020$  foram associados com uma estrutura de solo extremamente degradada.

Contudo, este indicador tem sido pouco estudado em solos de climas tropicais. Tormena et al. (2008), com intenção de resolver esta carência de informação, avaliando o índice S, a fim de identificar as alterações associadas ao plantio direto e posição da linha de culturas em Latossolo Vermelho distroférico no Estado de São Paulo, concluíram que os mesmos valores de índice S que são críticos em solos de clima temperado também podem ser aplicáveis em regiões tropicais. Porém, os mesmos autores sugeriram que mais estudos devem ser conduzidos para quantificar o índice S em diferentes solos e sistemas de manejo sob condições tropicais.





**Figura 1.** (A) Exemplo de uma curva de retenção de água mostrando o ângulo formado entre a tangente à curva no ponto de inflexão e a reta paralela ao eixo do potencial de água no solo ( $\tan \omega$ ). (B) Curvas de retenção de água de um solo franco-areno-argiloso em duas diferentes densidades de solo. Adaptado de Dexter (2004a).

Beutler et al. (2008b) verificaram que valores do índice S de 0,056, 0,062 e 0,081 restringiram a produtividade da soja, milho e amendoim, respectivamente, valores estes superiores ao sugerido por Dexter (2004a), confirmando a necessidade de se realizar mais estudos com este indicador em solos de regiões tropicais para definir valores adequados e estudar sua viabilidade de utilização no monitoramento da qualidade física do solo.

Do mesmo modo, Aratani et al. (2009), avaliando e comparando propriedades relacionadas à qualidade física de um Latossolo Vermelho acriférrico de Guaíra, Estado de São Paulo, entre os tratamentos sistema plantio direto irrigado, sistema plantio direto de sequeiro, integração lavoura-pecuária e plantio convencional, verificaram que o índice S mostrou variação em função dos sistemas e foi sempre superior ao valor considerado de boa qualidade física do solo estabelecido por Dexter (2004a).

Andrade & Stone (2009), com objetivo principal de verificar a adequação do índice S no diagnóstico da qualidade física de solos de cerrado das regiões Centro-Oeste, Norte e Nordeste do Brasil, observaram que este índice tem alta correlação com os atributos físicos considerados (densidade do solo, porosidade total e macroporosidade), mostrando ser um indicador adequado da qualidade física de solos de cerrado; já o valor que se mostrou mais apropriado para a divisão entre solos de boa qualidade estrutural e com tendência a se tornar degradados, dentro dos limites de todas as classes texturais estudadas, foi de 0,045, enquanto valores de  $S \leq 0,025$  indicam solos inteiramente degradados fisicamente.

### 2.3 Intervalo hídrico ótimo (IHO)

Com base em resultados de trabalhos que observaram o crescimento de raízes serem limitadas quando o solo se encontrava com altos valores de umidade, com a aeração como fator limitante e, com baixos valores de umidade, este fator foi substituído pela resistência à penetração, revelando ainda que a faixa de tensão de água diminuía com o aumento da densidade, Letey (1985) propôs o *Non-Limiting Water Range* (NLWR), considerando ainda, que dentro dos limites do NLWR são mínimas as restrições ao crescimento das plantas.

Da Silva et al. (1994), quantificaram esses atributos físicos do solo e os reuniu em função de uma única variável, densidade do solo, que ficou conhecido como *Least Limiting Water Range*. No Brasil, Tormena et al. (1998) o traduziu para a língua portuguesa como Intervalo Hídrico Ótimo (IHO).

O intervalo hídrico ótimo é definido como a amplitude de umidade do solo em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento das plantas relacionadas com a disponibilidade da água, a aeração e a resistência à penetração e quantifica a interação entre estas variáveis sobre o crescimento vegetal (Araújo et al., 2003).

Para cada valor de densidade do solo (Ds), o IHO é calculado e definido a partir dos limites superiores e inferiores de disponibilidade de água no solo (Tormena et al., 2007), o limite superior é o menor valor do teor de água dentre a capacidade de campo (CC) e aquele em que a porosidade de aeração é de 10 %, ou o conteúdo de água em que a aeração do solo se torna limitante; enquanto o limite inferior é considerado o maior valor do teor de água correspondente ao ponto de murcha permanente (PMP) ou a umidade em que a resistência do solo à penetração atinge valores limitantes ao crescimento de plantas (Beutler et al., 2008a).

Orellana et al. (1997) afirmaram que esses limites críticos dependem das culturas, visto que o sistema radicular das plantas possui distintas capacidades de vencer impedimentos mecânicos, bem como de adaptação à deficiência de aeração. Por exemplo, a porosidade de aeração mínima fixada em  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , em geral considerado restritivo para o crescimento e produtividade da maioria das culturas, é fortemente dependente da espécie de planta, da atividade biológica do solo e do regime de umidade nesse solo (Watanabe et al., 2002).

Outro exemplo é o limite da umidade à resistência do solo à penetração (RP). Existem relatos de culturas que sofrem limitações no seu desenvolvimento por não serem capazes de romper a camada compactada de solo com resistência mecânica de 1,4 MPa (Foloni et al., 2003), assim como há plantas que se desenvolvem normalmente até valores superiores a 3,0 MPa (Beutler & Centurion, 2003). No entanto, para a maioria das culturas o valor de resistência à penetração considerado o mais indicado na literatura como impeditivo ao desenvolvimento do sistema radicular é  $\geq 2,0$  MPa (Tormena et al., 1998, 1999).

Na maioria das pesquisas relacionadas ao IHO, verificou-se que RP é a variável que mais frequentemente reduz o IHO com o aumento da Ds (Tormena et al., 2007; da Silva et al., 2009). De maneira geral, ela se relaciona inversamente com o conteúdo de água, e positivamente com a densidade do solo (Tormena et al., 1998, 1999).

Para Tormena et al. (2007), o aumento da densidade do solo geralmente resulta na redução do IHO em direção a valores de densidade em que o IHO é igual a zero, a qual denomina-se densidade crítica do solo (Dsc) (da Silva et al., 1994). De acordo com da Silva et al. (2009), esta densidade é função dos valores críticos de potencial, aeração e resistência do solo à penetração, utilizados para o cálculo do IHO, e podem ocorrer restrições ao crescimento radicular das plantas (Reynolds et al., 2002).

O conhecimento deste valor serve de alerta quando as condições físicas não estão ideais por consequência do manejo do solo inadequado, e que, portanto, o produtor já deve começar a se preocupar em mudar sua forma de manejar o solo (da Silva et al., 2009).

A ocorrência de  $D_s > D_{sc}$ , indica severa degradação estrutural do solo, restringindo o crescimento das plantas (Leão et al., 2004). No entanto, esta restrição varia entre as culturas e cultivares que respondem diferentemente à compactação dependendo dos seus sistemas radiculares (Leão et al., 2006).

Diversos estudos comprovaram a eficácia do IHO como indicador de alterações nas propriedades físicas do solo em diferentes solos, culturas e sistemas de manejo (da Silva et al., 1994; Tormena et al., 1998; Aguiar, 2008; da Silva, 2008), sendo considerado por Tormena et al. (2007) o indicador que melhor traduz a qualidade física do solo para as plantas.

Relatos assim devem-se ao fato do IHO reunir os efeitos da densidade, aeração, resistência à penetração e retenção de água no solo sobre o desenvolvimento das

plantas, sendo capaz de indicar situações de estresse (Tormena et al., 1998; Leão, 2002). Dessa forma, práticas de manejo que modificam a estrutura do solo ampliando o IHO e, ou, mantendo a umidade dentro dos limites do IHO, são potencialmente menos restritivas para o crescimento e a produtividade das culturas (Romero, 2007).

#### **2.4 Densidade relativa (Dr)**

Densidade relativa (Dr) foi apresentada no Brasil por Klein (2006) e alguns autores a tem utilizado como indicador da qualidade física do solo para o crescimento das plantas (Liepic et al. 1991; Hakansson e Liepic 2000; Ferreras et al. 2001; Beutler et al., 2008b). Beutler et al. (2008b) salienta que a viabilidade da densidade relativa como indicador se deve à pequena variação dos valores limitantes em função do tipo de solo, já que a utilização de atributos físicos como resistência à penetração (RP) e densidade do solo (Ds), variam muito de solo para solo dificultando o estabelecimento de valores limitantes similares para todos os tipos de solo.

A densidade relativa quantifica o grau de compactação ou estado de compactação do solo e estabelece um valor limitante de compactação à produtividade das culturas (Beutler et al., 2008b). O alto grau de compactação é verificado quando ocorrem maiores valores de Dr, com consequência na falta de oxigênio pela redução da porosidade e aeração do solo, bem como dificuldade de penetração no solo pelo sistema radicular das culturas (da Silva et al., 2004). Porém, um grau de compactação muito baixo pode ser indicativo de um solo muito solto, comprometendo a retenção de água (Suzuki et al., 2007).

Klein (2006) afirma que o fenômeno da compactação pode ser explicado levando em conta a grande influência que a água exerce sobre os solos. Proctor (1933), estudando a variação da densidade do solo em relação ao conteúdo de água, quando se aplica uma força constante, verificou que a densidade aumentava com a umidade até um valor máximo, pois a película de água adsorvida fica mais espessa e provocam a lubrificação das partículas, que deslizam e se orientam, formando uma massa mais densa. Após atingir o valor de umidade máximo, que também é denominado de “Umidade Ótima de Compactação”, Klein (2008) destaca que é, na realidade, umidade inadequada para a realização de trabalhos com máquinas agrícolas, pois nestas condições ocorrem mais facilmente alterações na estrutura do solo causando a compactação.

A  $D_r$  corresponde à razão entre  $D_s$  e a densidade resultante da máxima obtida em laboratório (DMS) pelo teste de Proctor normal ou outros métodos de compressão. A DMS obtida pelo teste de Proctor normal, seguindo procedimentos descritos por Nogueira (1998), com 560 kPa de energia e com reuso de material, embora pouco utilizados em trabalhos para fins agrícolas (Hakansson & Liepic, 2000; Marcolin, 2006; Romero, 2007; Beutler et al., 2008b), é afetada, sobretudo pela textura do solo, daí a razão para que essa determinação seja feita para cada solo em estudo, pois a máxima densidade e a densidade ótima no campo ou aquela limitante para o pleno desenvolvimento das plantas será dependente desses fatores (Marcolin, 2006).

Carter (1990) observou que a produtividade máxima de trigo e cevada esteve associada à  $D_r$  de 0,81 em solo arenoso de clima temperado. Para Ferreras et al. (2001), valores superiores à faixa de 0,86 a 0,90 provocam uma grande redução no volume de macroporos, afetando o movimento normal da água e ar, diminuindo o crescimento e o rendimento das culturas.

Apesar de todos esses valores já estabelecidos, Suzuki et al. (2007) salientam que a relação entre o grau de compactação e as propriedades físicas do solo em relação às culturas, ainda deve ser testada para que sejam definidos os valores críticos de grau de compactação encontrado no desenvolvimento das plantas. Klein (2006) destaca que os efeitos das alterações na estrutura do solo, sobre as culturas, são difíceis de serem mensurados, pois mesmo com aumento da densidade as culturas mantêm rendimentos aceitáveis, o que muitas vezes é obtido pelo efeito dos mecanismos sulcadores das semeadoras e pelas condições climáticas favoráveis vigentes.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Localização das áreas

As áreas escolhidas para o estudo pertencem ao Perímetro Irrigado Jaguaribe-Apodi, localizado no município de Limoeiro do Norte, no Estado do Ceará (Figura 2), com distância de 194 km da capital, Fortaleza. O clima da região segundo a classificação de Koppen é BSw'h', é caracterizado como quente e semi árido. Apresenta temperaturas máxima e mínima anual de 36°C e 22°C, respectivamente, com temperatura média anual de 28,5°C. A pluviosidade média anual é de 772 mm, a evapotranspiração potencial média anual é de 3.215 mm e a umidade relativa média anual é de 62%. O relevo dominante da região é bastante regular, uniforme, plano, com altitude aproximada de 100 m e declividade muito suave, variando entre 0,5 a 1,5% (DNOCS, 2009).



**Figura 2.** Localização do município de Limoeiro do Norte-CE.

### 3.2 Descrição das áreas

O Perímetro possui 5.393 ha de área total irrigável, com apenas 2.935 ha cultivados. O restante da área ainda não está sendo utilizada ou é destinada à preservação. Os sistemas adotados no perímetro são: irrigação por aspersão (pivô central, 87%) e irrigação localizada (gotejamento, 6,5% e microaspersão, 6,5%) (DNOCS, 2009). Na produção agrícola, destacam-se atualmente as culturas de banana, milho verde, melão, goiaba, mamão, ata, melancia, pimentão, graviola, algodão herbáceo, feijão vigna e sorgo, além de capim para corte. A banana é a cultura de maior área no perímetro.

Para este estudo, foram selecionadas quatro áreas de cultivo e duas áreas sob vegetação natural, totalizando seis áreas de amostragem, assim:

» **Banana (B):** Área pertencente ao Sr. João Teixeira Jr., localizada na quadra Q2, lote 1, no município de Limoeiro do Norte-CE. Apresenta uma área total de 287 ha ( $5^{\circ}9'15''$  S e  $37^{\circ}59'55''$  W) (Figura 3). Apresenta solos classificados como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico Típico (Girão, 2007). A área é cultivada há 10 anos com banana prata-anã, na época seca é irrigada diariamente por microaspersão localizada entre as fileiras duplas. Anteriormente foi cultivada com hortaliças por cerca de 5 anos. Recebe aplicação de insumos: esterco caprino (20 L/planta/semana) e compostagem líquida (600 L/planta/semana). As pragas e doenças são controladas com aplicação de agrotóxicos (Carbofuram), e o controle de plantas infestantes é feito com aplicação de herbicidas. A adubação química é feita mensalmente com uréia e sulfato de potássio e magnésio. As máquinas utilizadas na área são: trator com subsolador e grade, a cada 10 anos na ocasião de renovação da área.

» **Goiaba (G):** Área pertencente ao Sr. José Assis de Moisés, estando localizada na quadra 7.1, lote 07 (Casa de bomba 7A), no município de Limoeiro do Norte-CE, com uma área total de 6 ha ( $5^{\circ}09'29''$  S e  $37^{\circ}59'36''$  W) (Figura 3). Apresenta solos classificados como Cambissolo Háplico Tb Eutrófico argissólico plúntico solódico (Romero et al., 2009). A área foi cultivada por sete anos com goiaba irrigada por microaspersão. Anteriormente a esta cultura e tipo de irrigação, a mesma foi cultivada por 10 anos com culturas anuais e irrigado por sistema de aspersão do tipo pivô central na época seca. É realizada adubação orgânica (esterco caprino, 20L/planta,

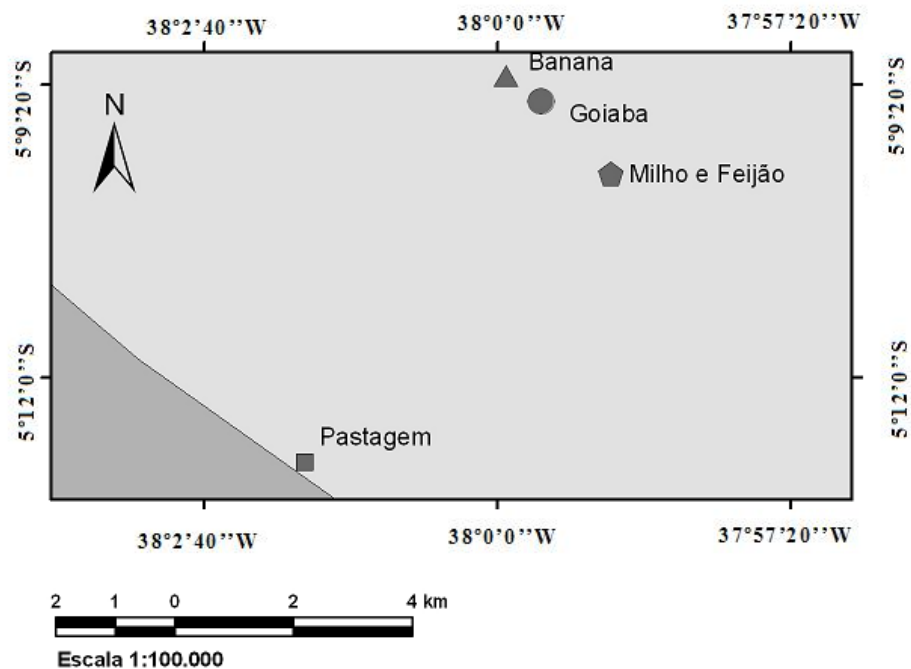
a cada 2 meses) e química (Uréia – 30g/planta, Cloreto de Potássio – 50g/planta, Cloreto de Magnésio – 30g/planta, Nitrato de Cálcio – 30g/planta e Fosfato Monoamônico – 300g/planta), aplicados a cada ciclo. Na ocasião de implantação da área do experimento, foi realizada subsolagem e as máquinas usadas eram trator e roçadeira.

» **Milho/Feijão (MF):** Área pertencente ao Sr. Antônio de Fátima da Costa, estando localizada no pivô 7.5 e lote 04 (Casa de bomba 7B), no município de Limoeiro do Norte-CE. Apresenta uma área total de 26 ha, com 6 ha de área cultivada (5°10'9" S e 37°58'58" W) (Figura 3). Apresenta solos Classificados como Cambissolo Háplico Tb Eutrófico Típico (Girão, 2007). A área é cultivada há 20 anos com milho e feijão em sucessão e irrigada por sistema de aspersão do tipo pivô central por 8 horas com 30% de vazão na época seca, no intervalo de dois dias. A adubação química é realizada com uréia e sulfato de amônio. O solo é preparado por meio de subsolagem, aração e gradagem. O controle de plantas infestantes é feito com aplicação de herbicidas e há a utilização de agrotóxicos (Lannate BR com 7,5L/ha/ciclo).

» **Pastagem (P):** Área pertencente ao Sr. Luiz Prata Girão, estando localizada no pivô 2.1 e lote 02 (Casa de bomba 2), no município de Limoeiro do Norte-CE. Apresenta uma área total de 1.600 ha, dos quais 12 pertencem à área de coleta do experimento (5°12'54" S e 38°01'52" W) (Figura 3). Apresenta solos classificados como Cambissolo Háplico Ta Eutrófico Típico (Girão, 2007). A área é cultivada há 10 anos com capim tifton (*Cynodon nemfluesis*), que na época seca é irrigada por sistema de aspersão tipo pivô central. A área foi anteriormente cultivada com milho por cerca de 5 anos. A adubação química é feita com Uréia (100 kg ha<sup>-1</sup>), Fosfato Monoamônico (50 kg ha<sup>-1</sup>) e Superfosfato Simples (50 kg ha<sup>-1</sup>), sendo a uréia aplicada a cada ciclo de pastejo e os demais a cada quatro aplicações de uréia. A adubação orgânica é realizada com o esterco dos animais na própria área, onde permanecem por 12 horas diariamente. A taxa de lotação é de 10 animais por hectare, totalizando aporte de 150 kg de esterco/ha/dia. Não há incidência de pragas e doenças com danos econômicos. Há utilização de máquinas na ocasião da fenação: roçadeira, enleiradeira, enfardadeira e tratores.



» **Mata nativa (MN 1 e 2):** Áreas localizadas próximas as áreas sob cultivos, sendo consideradas como testemunhas pela ausência de interferência humana, a vegetação dominante é do tipo caatinga, formada por espécies arbustivas, de porte baixo, espinhentos e cujas folhas na época seca caem totalmente.



**Figura 3.** Localização das áreas irrigadas sob cultivo de banana, pastagem, cultivo de goiaba e cultivo de milho e feijão em sucessão no município de Limoeiro do Norte-CE.

### 3.3 Coleta e análises

Foram coletadas 39 amostras de solo indeformadas em cada área e em cada profundidade. A amostragem foi realizada de forma aleatória ao longo de cada área, nas profundidades de 5 – 10 e 20 – 25 cm, no mês de julho de 2008. Utilizou-se um amostrador tipo Uhland com anéis de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, sendo as amostras embaladas, identificadas e armazenadas para posteriores análises.

#### 3.3.1 Análise granulométrica

A análise granulométrica (Tabela 1) foi realizada pelo método da pipeta, baseado no princípio da velocidade de queda das partículas, conforme a Lei de Stokes,

utilizando-se como dispersante químico o hidróxido de sódio 0,1 mol L<sup>-1</sup> (EMBRAPA, 1997). Para a dispersão física, empregou-se a agitação lenta de 50 rpm por 16 h em agitador orbital tipo Wagner (Ruiz, 2005a). A determinação de silte foi efetivada por pipetagem e não por diferença (Ruiz, 2005b).

**Tabela 1.** Composição granulométrica dos solos avaliados.

Área	-----Dag kg <sup>-1</sup> -----				Classe Textural
	AG	AF	Silte	Argila	
<b>5 - 10 cm</b>					
<b>MN 1</b>	26,0	19,0	8,5	46,5	Argila
<b>MN 2</b>	25,5	20,5	5,0	49,0	Argilo-Arenosa
<b>B</b>	31,0	21,5	7,5	40,0	Argilo-Arenosa
<b>G</b>	23,5	22,5	8,5	45,5	Argilo-Arenosa
<b>MF</b>	29,0	18,5	6,0	46,5	Argilo-Arenosa
<b>P</b>	38,5	14,5	6,5	40,5	Argilo-Arenosa
<b>20 – 25 cm</b>					
<b>MN 1</b>	24,0	16,5	9,0	50,5	Argila
<b>MN 2</b>	22,5	16,0	5,5	56,0	Argila
<b>B</b>	24,0	15,5	6,5	54,0	Argila
<b>G</b>	19,5	19,5	11,0	50,0	Argila
<b>MF</b>	24,0	15,0	9,0	52,5	Argila
<b>P</b>	29,5	13,5	7,0	50,0	Argila

**MN 1:** mata nativa 1; **MN 2:** mata nativa 2; **B:** solo sob cultivo de banana; **G:** solo sob cultivo de goiaba; **MF:** solo sob cultivo de milho e feijão em sucessão; **P:** solo sob pastagem.

### 3.3.2 Curva de retenção de água

As amostras indeformadas 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, foi elaborada a curva de retenção de água, onde as amostras foram submetidas a diferentes potenciais mátricos ( $\Psi$ ), sendo: -0,001; -0,002; -0,004; -0,006; -0,008; -0,01; -0,03; -0,05; -0,08; -0,1; -0,3, -0,5 e -1,5 MPa. Foi utilizado uma mesa de tensão para os potenciais até -0,06 MPa e extrator de placa porosa de Richards para as demais tensões até ocorrer o cessamento da drenagem de água, ou seja, ponto de equilíbrio (Klute, 1986).

Para elaboração da curva de retenção de água no solo foram utilizadas 6 amostras de cada área para cada potencial aplicado (3 amostras para cada profundidade) e foi ajustado por meio da equação proposta por van Genuchten (1980):

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

onde:

$\theta$ : conteúdo de água ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\theta_s$ : conteúdo de água na saturação ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\theta_r$ : conteúdo de água residual ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\psi$ : potencial mátrico (MPa);

$\alpha$  e  $n$ : são parâmetros do ajuste do modelo. O parâmetro  $m$  foi considerado dependente de  $n$ , equivalendo a  $1-1/n$ .

### 3.3.3 Cálculo do índice S

A partir dos parâmetros do modelo de van Genuchten (1980) foram calculados os valores da inclinação da curva de retenção de água no solo e a obtenção do ponto de inflexão, ou seja, o valor do índice S, como proposto por Dexter (2004a), através da equação 2:

$$S = -n(\theta_s - \theta_r) * \left[1 + \frac{1}{m}\right]^{-(1+m)} \quad [ 2 ]$$

No ajuste de pares de  $\theta(\psi)$  pela função descrita na equação 1, foi utilizada a restrição de  $m = 1-1/n$  (Muallem, 1986). Com isso, o valor da inclinação do ponto de inflexão da curva de retenção de água no solo foi obtido de acordo com a equação 3:

$$|S| = -n(\theta_s - \theta_r) * [2n - 1/n - 1]^{[1/n-2]} \quad [ 3 ]$$

onde:

$\theta_s$  = conteúdo de água na saturação ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\theta_r$  = conteúdo de água residual ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$n$  = parâmetro empírico da equação, obtido pelo ajuste do modelo.

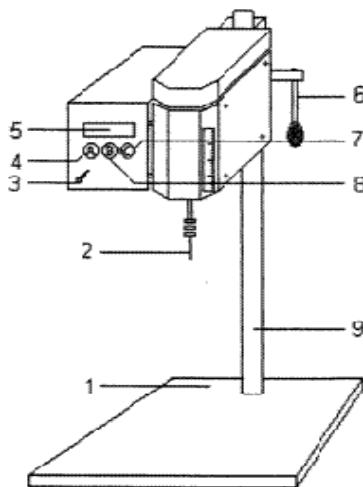
O sinal negativo associado ao parâmetro  $n$  originalmente descrito por Dexter (2004c) na equação [3] foi suprimido uma vez que o ajuste da CRA foi realizado com o

módulo do potencial mátrico ou tensão de água no solo, assim facilitando a discussão dos resultados.

### 3.3.4 Resistência à penetração (RP)

Logo após o equilíbrio na mesa de tensão e placas porosas, cada amostra foi pesada e realizada a RP em todos os potenciais. Para tal fim foi utilizado um penetrômetro eletrônico (Figura 4) marca Marconi (MA-933), equipado com uma célula de carga de 100 N, haste com cone de 4 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30° com receptor e interface acoplados a um microcomputador, para registro das leituras por meio de um software próprio do equipamento.

Foi adotada a velocidade de penetração de  $1 \text{ cm min}^{-1}$  (Brandford, 1980), e os valores em kgf foram transformados em MPa. Os ensaios foram realizados no centro de cada amostra, entre 1 e 3 cm de profundidade em cada anel, as medidas obtidas na superfície das amostras foram descartadas (Leão, 2002), uma vez que a resistência aumenta até determinada profundidade, tornando-se constante.



**Figura 4.** Esquema do penetrômetro de bancada Marconi, modelo MA-933. 1. Base de sustentação; 2. Célula de carga; 3. Chave geral; 4, 7 e 8. Teclas membranas que possibilitam configurações eletrônicas para funções mecânicas; 5. Display; 6. Manípulo de fixação; 9. Suporte de sustentação.

### 3.3.5 Densidade do solo (Ds)

Imediatamente após a determinação do ponto de equilíbrio da umidade ( $\theta$ ) nos potenciais e ensaios da RP, as amostras foram secas em estufa a  $105^{\circ}\text{C}$  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 (Blake & Hartge, 1986).

### 3.3.6 Densidade das 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 contendo 20 g de TFSA em seu interior (Blake & Hartge, 1986).

### 3.3.7 Calculo do Intervalo hídrico ótimo (IHO)

Para a determinação do IHO foram necessários os dados de densidade das partículas (Dp), densidade do solo (Ds), potenciais mátricos ( $\Psi$ ), porosidade de aeração e resistência à penetração (RP). Foram descritas matematicamente a curva de resistência à penetração (CRP) e a curva de retenção de água (CRA).

Considerando que a resistência à penetração varia com densidade do solo e umidade, a curva de resistência à penetração foi ajustada por meio de um modelo não linear (Busscher, 1990), descrito da seguinte forma:

$$RP = a \theta^b Ds^c \quad [ 4 ]$$

onde:

RP: resistência à penetração (MPa);

Ds: densidade do solo ( $Mg\ m^{-3}$ );

$\theta$ : umidade volumétrica ( $m^3\ m^{-3}$ );

$a$ ,  $b$  e  $c$ : coeficientes obtidos no modelo de ajuste 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 seguinte equação:

$$\theta = d \psi^e \quad [ 5 ]$$

Utilizando-se um modelo de regressão não-linear proposto por Tormena et al. (1998), incorporou-se a Ds na equação [5] de forma que esta tomasse a forma da equação [6]:

$$\theta = EXP(d + e.Ds).\psi^f \quad [ 6 ]$$

em que:

$\theta$ : umidade volumétrica ( $m^3 m^{-3}$ );

Ds: densidade do solo ( $Mg m^{-3}$ );

$\psi$ : potencial matricial (MPa);

$d$ ,  $e$ , e  $f$ : coeficientes obtidos no ajuste do modelo dos dados.

O intervalo hídrico ótimo foi determinado seguindo a metodologia descrita por da Silva et al. (1994) e Tormena et al. (1998), utilizando-se um algoritmo desenvolvido em EXCEL® por Leão & da Silva (2004) para o cálculo do IHO, para o qual foi necessária a obtenção de alguns parâmetros e das seguintes considerações: (i) umidade do solo na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) ou o conteúdo de água estimado no potencial de -0,01 MPa (Reichardt, 1988); (ii) umidade do solo no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ) ou o conteúdo de água no potencial de -1,5 MPa (Savage et al., 1996); (iii) umidade do solo ou conteúdo de água do solo em que a porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) é de  $0,1 m^3 m^{-3}$  (Grable & Siemer, 1968), calculada como:

$$\theta_{PA} = \left( 1 - \frac{Ds}{Dp} \right) - 0.1 \quad [ 7 ]$$

em que Ds: densidade do solo e  $D_p$ : densidade das partículas ( $Mg m^{-3}$ ); (iv) umidade do solo ou quantidade de água em que a RP ( $\theta_{RP}$ ) atinge o valor crítico de 2 MPa (Tormena et al., 1998) obtidos por meio da equação 8:

$$\theta_{RP} = \left( \frac{2}{a.Ds^c} \right)^{\frac{1}{b}} \quad [ 8 ]$$

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

Os itens (i) e (ii) foram obtidos de acordo com as equações 9 e 10:

$$\theta_{CC} = \exp(d + e Ds) 100^f \quad [9]$$

$$\theta_{PMP} = \exp(d + e Ds) 15000^f \quad [10]$$

Com o algoritmo, foi gerado um gráfico a partir das equações 7, 8, 9, 10, geradas com base nas equações 4 e 6. A faixa de umidade do solo em que as condições físicas não são limitantes ao desenvolvimento das plantas (IHO), está situada entre o limite inferior (resistência à penetração do solo ou ponto de murcha permanente) e o

limite superior (capacidade de campo ou umidade do solo quando a aeração é de 10%) (da Silva et al., 1994).

### 3.3.8 Densidade relativa

A determinação da densidade relativa, foi calculada a partir da equação 11 (Klein, 2006):

$$Dr = \frac{Ds}{Dm} \quad [11]$$

Dr: Densidade relativa;

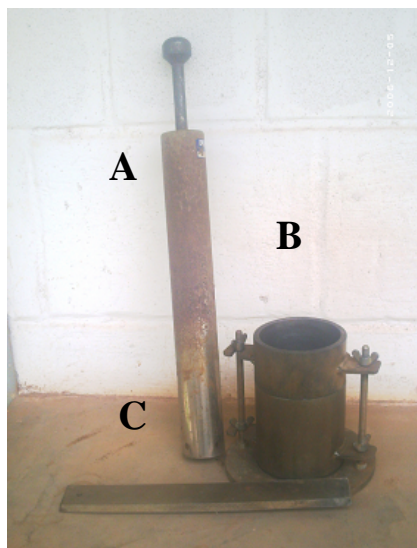
Ds: Densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ );

Dm: Densidade máxima ( $\text{Mg m}^{-3}$ ).

A densidade máxima do solo ( $D_m$ ) foi obtida a partir do ensaio de Proctor normal (Figura 5) com reuso de material, no ponto de umidade ótima para compactação, seguindo procedimentos descritos por Nogueira (1998), no qual o solo foi inicialmente passado em peneira com malha de 4,8 mm, e determinada sua umidade residual. A seguir foram preparadas amostras de 2 kg cada uma, com quantidade de água representando os pontos iniciais da curva, adicionando-se água para os outros pontos. Depois de umedecidas as amostras foram compactadas no cilindro de Proctor.

Para cada amostra, inicialmente um volume de 1/3 da altura do cilindro foi preenchido com solo que, na sequência, recebeu 26 golpes do soquete. Em seguida, mais 1/3 da altura foi preenchido e compactado. Finalmente, o último terço do cilindro recebeu mais um 1/3 de sua altura em solo, que na sequência também foi compactado. Ao final, o volume do solo foi ajustado no interior do cilindro e pesado. Finalizada a compactação, foram retiradas três sub-amostras do solo e secas em estufa a 105 °C para determinação de umidade e densidade do solo.

Os valores de umidade e suas respectivas densidades foram plotados em um gráfico realizando uma regressão polinomial de segundo grau dos pontos e pela derivação desta equação foram obtidos os valores da densidade máxima e a umidade ótima de compactação.



**Figura 5.** Equipamentos usados no ensaio de Proctor normal (A. Soquete; B. Cilindro de compactação fixado na base metálica; C. Régua de aço biselada).

### 3.4 Análises estatísticas

As variáveis utilizadas para os solos avaliadas foram analisadas por meio de contrastes ortogonais (Tabela 2). A significância dos contrastes com um grau de liberdade foi testada pelo teste F contra o quadrado médio do resíduo, obtido pela análise de variância, considerando-se o delineamento experimental inteiramente casualizado. As análises foram efetuadas com o uso de planilha elaborada no programa EXCEL.

Os contrastes C1, C2, C3 e C4 foram propostos com o objetivo de comparar os sistemas de usos com as áreas de mata nativa, enquanto os contrastes C5, C6 e C7 para comparar os solos sob sistema de cultivo intensivo (milho e feijão em sucessão) com os demais solos cultivados, e o contraste C8 compara o solo sob cultivo de banana com pastagem.

Os valores de densidade relativa obtidos neste trabalho foram analisados com base na estatística descritiva-exploratória para observar seus comportamentos gerais. Para tanto, se utilizou o “software” Statistics for Windows (Stat Soft, 1993), no qual foram feitas as seguintes medidas: média, mediana, mínimo e máximo, primeiro e terceiro quartil, amplitude total, desvio padrão e coeficiente de variação.

Paralelamente, verificou-se a distribuição dos dados com base em “Box-plot”. Considerando que um conjunto de dados também está sujeito a perturbações por valores



atípicos, foram utilizadas técnicas complementares para verificação da adequação das medidas por meio da identificação de valores candidatos à “outliers” (Libardi et al., 1996).

De acordo com os critérios definidos (Libardi et al., 1996), foram calculados os limites inferior e superior, para identificação de “outliers”, desta maneira foi possível visualizar a distribuição e o comportamento geral dos dados e detectar dados influentes, observações com valores extremos que destoam do conjunto de dados e alteram os valores de algumas medidas, assim como verificar a normalidade dos dados, necessários para a aplicação dos testes estatísticos convencionais.

**Tabela 2.** Contrastes gerados a partir do desdobramento dos graus de liberdade para os diferentes solos avaliados no Perímetro Irrigado Jaguaribe – Apodi, CE.

Áreas	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8
<b>MN 1</b>	-1	-1	0	0	0	0	0	0
<b>MN 2</b>	0	0	-1	-1	0	0	0	0
<b>B</b>	1	0	0	0	1	0	0	1
<b>G</b>	0	0	1	0	0	0	1	0
<b>MF</b>	0	0	0	1	-1	-1	-1	0
<b>P</b>	0	1	0	0	0	1	0	-1

**MN 1:** mata nativa 1; **MN 2:** mata nativa 2; **B:** solo sob cultivo de banana; **G:** solo sob cultivo de goiaba; **MF:** solo sob cultivo de milho e feijão em sucessão; **P:** solo sob pastagem. **C1** = (MN 1 vs B); **C2** = (MN 1 vs P); **C3** = (MN 2 vs G); **C4** = (MN 2 vs MF); **C5** = (B vs MF); **C6** = (P vs MF); **C7** = (G vs MF); **C8** = (B vs P).

Para o cálculo do limite inferior (LI) e superior (LS) foi adotado o critério sugerido por Hoaglin et al. (1992), que considera como prováveis dados discrepantes valores menores que a diferença entre o quartil inferior ( $Q_i$ ) e 1,5 vezes a amplitude interquartílica ( $A_i$ ), ou seja, aqueles abaixo do LI, estimado por  $LI = Q_i - 1,5 A_i$ , e dados com valores maiores que a soma do quartil superior ( $Q_s$ ) com 1,5 vezes a amplitude interquartílica, ou seja, acima do LS, estimado por  $LS = Q_s + 1,5 A_i$ .

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Índice S

Os valores médios dos parâmetros de ajuste dos dados experimentais, a equação de van Genuchten (1980) e os valores de índice S são apresentados nas Tabelas 3 e 4. Os ajustes efetuados com o modelo proposto por van Genuchten (1980) para os solos das diferentes áreas e profundidades apresentaram elevados coeficientes de ajuste dos dados (Tabelas 3 e 4).

Os parâmetros de ajuste do modelo de van Genuchten (1980) foram significativamente diferenciados nas comparações dos sistemas de uso, sendo comprovados pelos elevados coeficientes de ajuste dos dados (Tabelas 3 e 4). A  $\theta_{sat}$  foi significativo ( $P < 0,05$ ) para o C5, o qual foi maior nos solos sob mata nativa 1 e 2, seguidas pelos solos cultivados com banana, goiaba, pastagem e milho e feijão em sucessão, respectivamente, na profundidade de 5-10 cm (Tabela 3). A  $\theta_{res}$  foi significativo para C3 e C7 ( $P < 0,1$ ),  $m$  foi significativo para C2 ( $P < 0,1$ ), C3 ( $P < 0,05$ ) e C7 ( $P < 0,1$ ).

O Índice S variou em função dos sistemas de uso, demonstrando ser um índice sensível às alterações na estrutura do solo (Tabela 3), corroborando com Aguiar (2008) e da Silva (2008), os quais também encontraram variação para o índice S em função do sistema de uso e manejo.

**Tabela 3.** Parâmetros de ajustes das curvas de retenção de água do solo para o modelo van Genuchten ( $\theta_{sat}$ ,  $\theta_{res}$ ,  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$ ), coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e índice S na profundidade de 5-10 cm em solos da Chapada do Apodi, CE.

Área/ Contraste	Parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten						$R^2$
	$\theta_{sat}$	$\theta_{res}$	$\alpha$	$m$	$n$	S	
	kg kg <sup>-1</sup>						
<b>MN1</b>	0.314	0.120	0.156	0.255	2.009	0.048	0.99
<b>MN2</b>	0.373	0.126	0.308	0.468	1.732	0.065	0.99
<b>B</b>	0.278	0.120	0.130	0.211	1.911	0.035	0.99
<b>G</b>	0.262	0.146	0.015	1.793	1.981	0.064	0.99
<b>MF</b>	0.238	0.116	0.115	0.141	1.863	0.020	0.99
<b>P</b>	0.239	0.112	0.132	0.132	1.861	0.021	0.99
<b>Contraste ortogonal</b>							
<b>C1</b>	ns	ns	ns	ns	ns	*	
<b>C2</b>	ns	ns	ns	*	ns	***	
<b>C3</b>	ns	*	ns	**	ns	***	
<b>C4</b>	ns	ns	ns	ns	ns	**	
<b>C5</b>	**	ns	ns	ns	ns	ns	
<b>C6</b>	ns	ns	ns	ns	ns	ns	
<b>C7</b>	ns	*	ns	***	ns	***	
<b>C8</b>	ns	ns	ns	ns	ns	**	

**MN 1:** mata nativa 1; **MN 2:** mata nativa 2; **B:** solo sob cultivo de banana; **G:** solo sob cultivo de goiaba; **MF:** solo sob cultivo de milho e feijão em sucessão; **P:** solo sob pastagem.  $\theta_{sat}$ : conteúdo de água na saturação;  $\theta_{res}$ : conteúdo de água residual;  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$ : parâmetros da equação de van Genuchten; **C1** = (MN 1 vs B); **C2** = (MN 1 vs P); **C3** = (MN 2 vs G); **C4** = (MN 2 vs MF); **C5** = (B vs MF); **C6** = (P vs MF); **C7** = (G vs MF); **C8** = (B vs P).\*\*\*, \*\*, \* e ns = significativo ao nível de 1%, 5%, 10% e não significativo, respectivamente.

O índice S mostrou significância para C2, C3 e C7 ( $P < 0,01$ ), C4 e C8 ( $P < 0,05$ ), e C1 ( $P < 0,1$ ) (Tabela 3). O valor do índice S foi menor, significativamente, para todos os solos cultivados, mostrando que os sistemas de cultivo avaliados reduziram a qualidade física do solo em relação ao solo sob mata nativa.

Apesar do decréscimo significativo no valor do índice S dentre os solos sob cultivos, os solos cultivados com banana e goiaba foram os que apresentaram valores de índice S acima de 0,035 estabelecido por Dexter (2004a), indicando solos de boa qualidade física, e somente no solo sob goiaba apresentou valor acima de 0,045 como recomendado por Andrade & Stone (2009), valor que pode estar relacionado ao tipo de solo. Estes maiores valores também podem estar relacionados à maior quantidade de resíduos vegetais permanecidos durante o cultivo dessas culturas. Nos solos cultivados com banana esta deposição ocorre no momento da colheita e nos solos cultivados com goiaba ocorre deposição de restos culturais provenientes do manejo de poda.

O solo cultivado com milho e feijão em sucessão apresentou valor de índice S de 0,020, e o solo sob pastagem apresentou valor de 0,021. Silva et al. (2008) verificaram que o pisoteio de animais, tanto em área sob pastagem cultivada como em área de Cerrado nativo pastejado, promoveu alterações mais severas nos atributos físico-hídricos na profundidade de 5 a 10 cm. Estes valores encontram-se abaixo de valores estabelecidos como críticos para um solo bem estruturado, tanto pelo valor estabelecido por Dexter (2004a), quanto pelo valor estabelecido por Andrade & Stone (2009).

Segundo Dexter (2004a) e Andrade & Stone (2009), valores de S abaixo do limite por eles estabelecido apresentam condições físicas desfavoráveis ao crescimento radicular, no entanto, nos solos sob pastagem, esta condição pode ser menos prejudicial às plantas, visto que as gramíneas são consideradas menos suscetíveis aos efeitos da compactação (Silva et al., 2006) quando comparados com outras culturas. No solo cultivado com milho e feijão em sucessão, o principal responsável pelo baixo valor do índice S pode ser o tráfego excessivo de máquinas e implementos utilizados indiscriminadamente sob diferentes condições de umidade do solo favorecendo a compactação (Klein & Libardi, 2002), indicando que se deve ter mais cautela para definir o melhor momento de realizar operações mecanizadas.

O menor valor de índice S encontrado nos solos sob pastagem pode ser explicado pelo fato das máquinas agrícolas, apesar de terem peso maior que os bovinos, exercerem pressão menor sobre a superfície do solo (30 a 150 kPa) (Proffitt et al., 1993), uma vez que o seu peso é distribuído em uma área maior (pneus), enquanto que a pressão exercida pelos animais sobre o solo é concentrada em uma pequena área (do casco) (Willatt & Pullar, 1983), com valores da ordem de 350 a 400 kPa (Betteridge et al., 1999) os quais ainda podem ser duplicados quando o animal está em movimento (Nie et al., 2001).

Os resultados relativos à profundidade de 20-25 cm são apresentados na Tabela 4, o parâmetro de ajuste  $\theta_{sat}$  foi significativo ( $P < 0,01$ ) para C2, C4, C5 e C8, e para C3 ( $P < 0,05$ ) apresentando maiores valores os solos sob mata nativa 1 e 2, seguidos pelos solos cultivados com banana, goiaba, milho e feijão em sucessão e pastagem, respectivamente. O parâmetro de ajuste  $\theta_{res}$  foi significativo para C1 e C8 ( $P < 0,01$ ), e para C2 e C6 ( $P < 0,5$ ),  $\alpha$  foi significativo ( $P < 0,05$ ) para C2, C6 e C8,  $m$  foi significativo para C1 e C8 ( $P < 0,01$ ), para C2 e C6 ( $P < 0,05$ ), e C5 e C7 ( $P < 0,1$ )  $n$  foi significativo ( $P < 0,01$ ) para C8 e C1 ( $P < 0,1$ ) onde o maior valor se apresentou para a

área sob mata nativa 2, valor este correspondendo com o maior valor do índice S. Ainda não é muito clara a relação dos parâmetros **m** e **n** com a física do solo, sendo normalmente negligenciada nos trabalhos disponíveis na literatura, o que dificulta maiores discussões (Aguiar, 2008).

**Tabela 4.** Parâmetros de ajustes da curva de retenção de água do solo para o modelo van Genuchten ( $\theta_{sat}$ ,  $\theta_{res}$ ,  $\alpha$ ,  $m$ ,  $n$ ), coeficientes de determinação ( $R^2$ ) e índice S na profundidade de 20-25 cm em solos da Chapada do Apodi, CE.

Parâmetros de ajuste da equação de van Genuchten							
Área/ Contraste	$\theta_{sat}$	$\theta_{res}$	$\alpha$	$m$	$n$	$S$	$R^2$
	kg kg <sup>-1</sup>						
<b>MN1</b>	0.296	0.094	0.060	0.157	1.846	0.037	0.99
<b>MN2</b>	0.307	0.116	0.043	0.345	1.989	0.053	0.99
<b>B</b>	0.295	0.137	0.040	0.327	1.969	0.048	0.99
<b>G</b>	0.263	0.109	0.044	0.343	1.935	0.036	0.99
<b>MF</b>	0.235	0.136	0.031	1.218	1.898	0.035	0.99
<b>P</b>	0.234	0.055	0.135	0.063	1.813	0.016	0.99
Contraste ortogonal							
<b>C1</b>	ns	***	ns	***	*	*	
<b>C2</b>	***	**	**	**	ns	***	
<b>C3</b>	**	ns	ns	ns	ns	ns	
<b>C4</b>	***	ns	ns	ns	ns	ns	
<b>C5</b>	***	ns	ns	*	ns	***	
<b>C6</b>	ns	**	**	**	ns	*	
<b>C7</b>	ns	ns	ns	*	ns	ns	
<b>C8</b>	***	***	**	***	***	***	

**MN 1:** mata nativa 1; **MN 2:** mata nativa 2; **B:** solo sob cultivo de banana; **G:** solo sob cultivo de goiaba; **MF:** solo sob cultivo de milho e feijão em sucessão; **P:** solo sob pastagem.  $\theta_{sat}$ : conteúdo de água na saturação;  $\theta_{res}$ : conteúdo de água residual;  $\alpha$ ,  $m$  e  $n$ : parâmetros da equação de van Genuchten; **C1** = (MN 1 vs B); **C2** = (MN 1 vs P); **C3** = (MN 2 vs G); **C4** = (MN 2 vs MF); **C5** = (B vs MF); **C6** = (P vs MF); **C7** = ( G vs MF); **C8** = ( B vs P).\*\*\*, \*\*, \* e ns = significativo ao nível de 1%, 5%, 10% e não significativo, respectivamente.

O indicador de qualidade física do solo, Índice S, mostrou significância para C2, C5 e C8 ( $P < 0,01$ ) e, C1 e C6 ( $P < 0,05$ ) (Tabela 4). De acordo com os valores de índice S percebe-se que na profundidade de 20-25 cm todos os solos avaliados, com exceção ao solo sob pastagem, apresentaram valores maiores que 0,035, sendo que em mata nativa 2 e banana os solos apresentaram valores acima do recomendado por Andrade & Stone (2009) (0,045).

Os solos sob pastagem apresentaram condições físicas desfavoráveis ao crescimento radicular, de acordo com o índice S encontrado que foi de 0,016 (Tabela 4).

Neste caso, o valor de  $S$  apresenta-se abaixo dos valores críticos estabelecidos tanto por Dexter (2004a) de  $S < 0,020$ , associado a estrutura degradada e Andrade & Stone (2009) de  $S \leq 0,025$ , valor considerado para solos inteiramente degradados fisicamente.

De acordo com Betteridge et al. (1999) e Leão et al. (2004), as condições físicas desfavoráveis são resultado de cargas ou pressões aplicadas pelo pastejo, que é intensivo e repetidamente no mesmo local, realizado em condições, muitas vezes, de umidade do solo elevada, o que maximiza a degradação física do solo, prejudicando o crescimento do sistema radicular em consequência da compactação do solo.

## 4.2 Intervalo hídrico ótimo

Nas Figuras 6 e 7 são apresentadas as variações de umidade nos limites críticos do intervalo hídrico ótimo, em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento das plantas. Esses limites críticos são definidos por  $\theta_{CC}$ ,  $\theta_{PA}$ ,  $\theta_{RP}$  e  $\theta_{PMP}$  em função da  $D_s$ . As áreas hachuradas nos gráficos correspondem ao IHO. Nas Figuras 6 e 7 são apresentados os diagramas do IHO para as profundidades 5 a 10 cm e 20 a 25 cm, respectivamente.

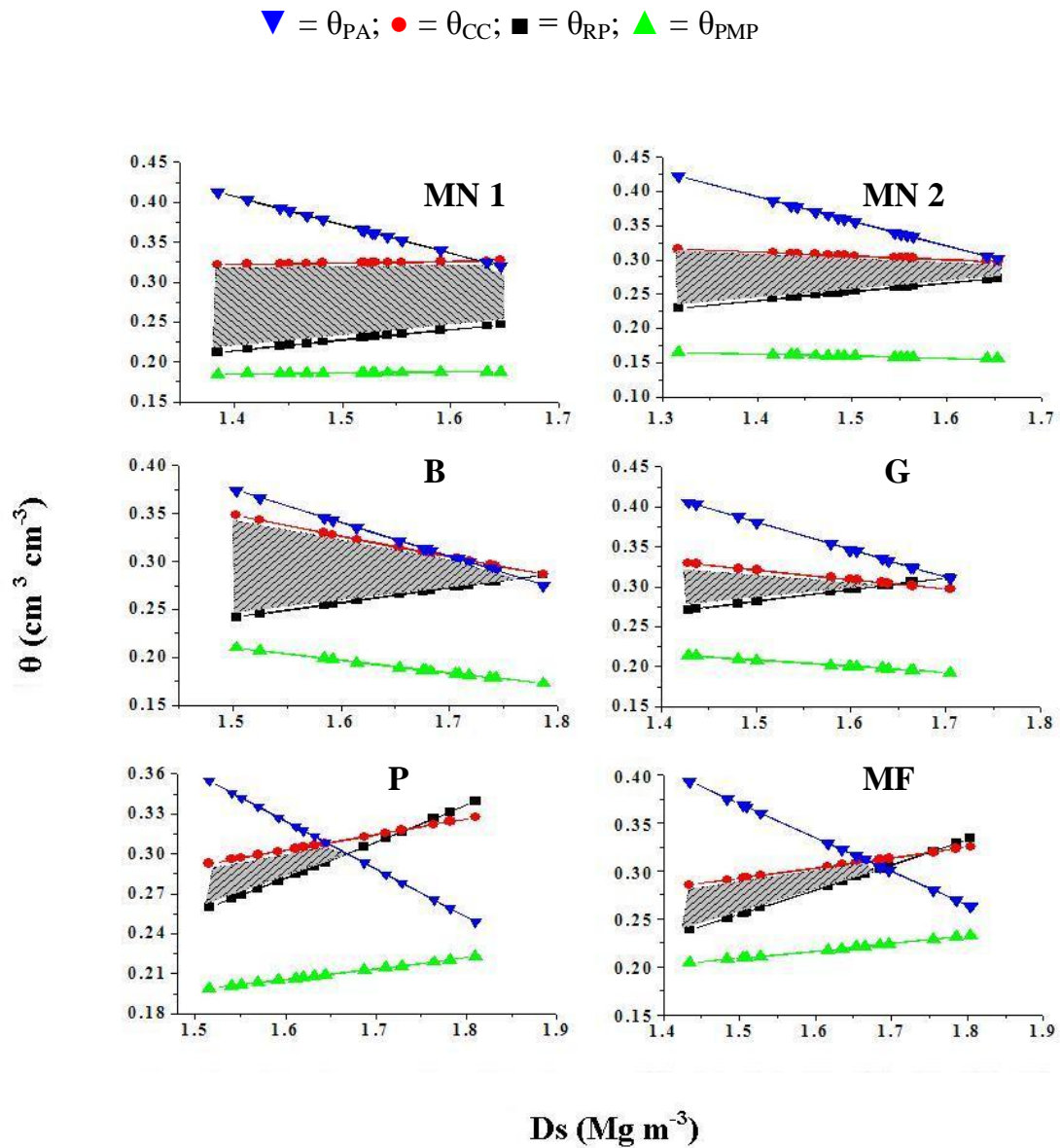
Observa-se por meio dessas figuras que o IHO foi limitado superiormente pela  $\theta_{CC}$  para os solos sob mata nativa 1 e 2, e goiaba na profundidade de 5-10; e mata nativa 1 e 2, banana e pastagem na profundidade de 20-25 cm. Aguiar (2008), avaliando a qualidade física de solos em áreas manejadas com sistemas agroflorestais (SAFs) e em cultivos a pleno sol, comparando-os com solos sob mata, verificou que o IHO teve seus limites definidos em todas as áreas avaliadas pelas umidades equivalentes à  $\theta_{CC}$ , em toda a amplitude de valores de  $D_s$  observada. Klein & Libardi (2000) avaliando o efeito da densidade do solo sobre a disponibilidade de água às plantas em áreas sob mata, plantio direto em sequeiro e plantio direto irrigado, também verificaram que a capacidade de campo foi o fator mais limitante no limite superior de umidade.

A umidade à capacidade de campo como limite superior será válida sempre que a porosidade de aeração não seja limitante (da Silva & Kay, 2004), ou seja, em situações de elevados valores de umidade, o crescimento radicular será prejudicado por excesso de água e conseqüentemente, falta de ar. Conforme demonstraram da Silva & Kay (1997), o valor de  $D_s$  em que a  $\theta_{PA}$  substitui a  $\theta_{CC}$  como limite superior, a partir do qual as plantas terão seus desenvolvimentos limitados pela reduzida difusão de oxigênio no solo, deve ser levado em consideração na análise do IHO. Esta substituição ocorre

para os solos cultivados com banana, pastagem e milho e feijão em sucessão, respectivamente, nos valores de  $D_s$  de 1,70, 1,64 e 1,67  $\text{Mg m}^{-3}$ , respectivamente, para a profundidade de 5-10 cm, e 1,60 e 1,67  $\text{Mg m}^{-3}$  e nos solos cultivados com goiaba e milho e feijão em sucessão, respectivamente, para a profundidade de 20-25 cm. Esse limite de  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  para  $\theta_{PA}$ , como apontado, deveria ser revisado para adequá-lo às diferentes espécies vegetais e, ainda, aos variados materiais genéticos dentro de cada espécie (Romero, 2007).

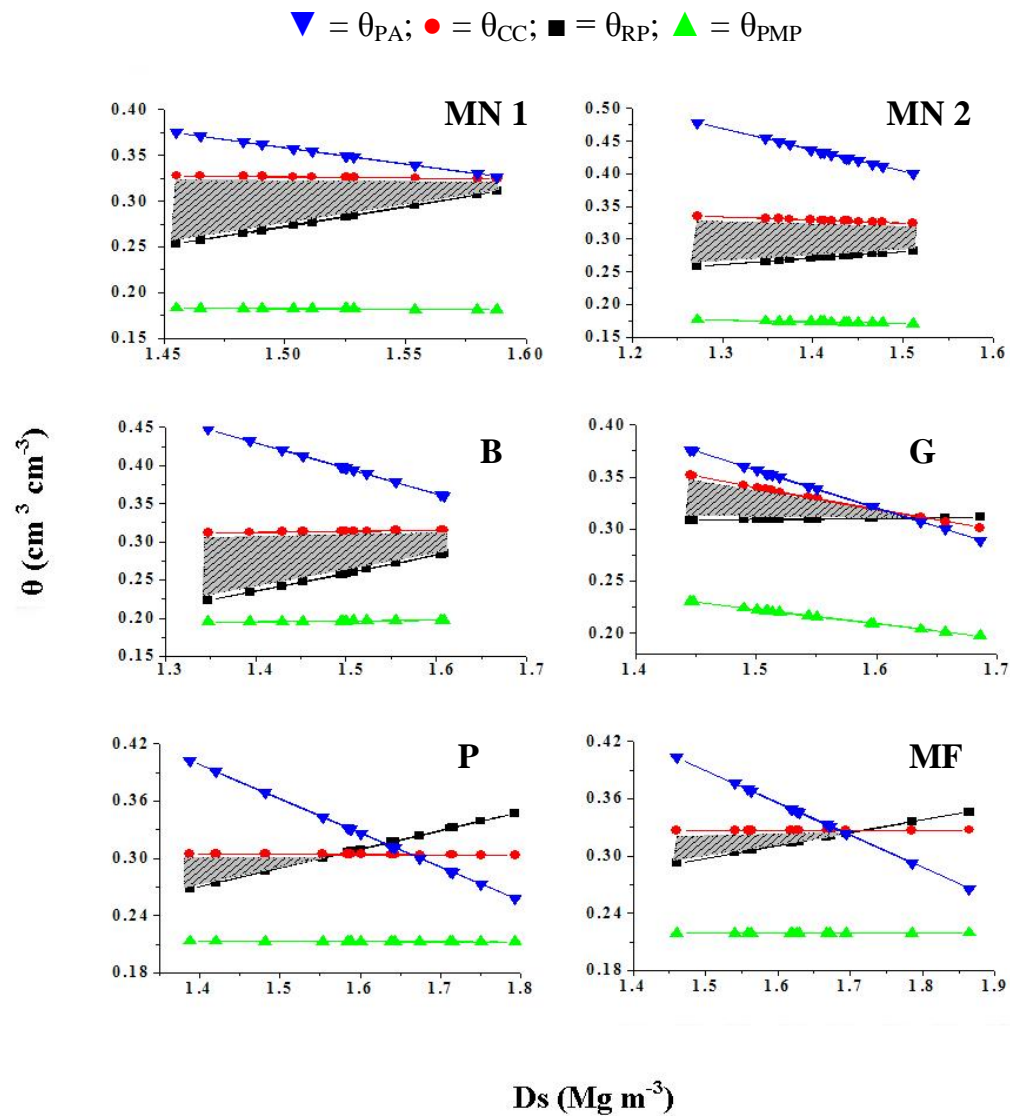
Quanto à resistência à penetração, diversos trabalhos citam 2,0 MPa como valor limitante à penetração de raízes, valor esse, médio, considerado para diversas espécies, por isso também exige pesquisas para estabelecer com maior exatidão valores condizentes com as características das plantas cultivadas (Romero, 2007). A  $\theta_{RP}$  definiu o limite inferior em todas as áreas e profundidades avaliadas. A maior influência da resistência à penetração no IHO também foi encontrada em diversos sistemas de usos por outros autores (Leão et al., 2004; da Silva, 2008; Aguiar, 2008), em vários solos, compreendendo distintas classes de textura, desde muito argiloso (Tormena et al., 1998) até siltoso e areia franca (da Silva et al., 1994). Isto demonstra que o conceito de água disponível não é suficiente para prever valores de umidade do solo adequados ao bom desempenho das plantas.

Nos solos sob mata nativa 1 (profundidade 5-10 cm), e mata nativa 1 e 2, banana, pastagem e milho e feijão em sucessão (profundidade 20-25 cm) a retenção de água nos potenciais de -0,01 e -1,5 MPa foi pouco influenciada pela  $D_s$ . Observa-se que nos solos sob mata nativa 2 e banana (Figura 6) e sob goiaba (Figura 6 e 7), a densidade do solo influenciou negativamente a retenção de água no potencial de -0,01 MPa e -1,5 MPa. Comportamento semelhante foi encontrado em sistema de uso silvipastoril na profundidade de 5-10 cm, por da Silva (2008), quando foi avaliada a qualidade física e estrutural de um solo cultivado no semi árido cearense.



**Figura 6.** Variação do conteúdo de água em função da  $D_s$  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 2,0 MPa na profundidade de 5-10 cm do solo sob mata nativa 1 (MN 1), mata nativa 2 (MN 2), cultivo de banana (B), cultivo de goiaba (G), pastagem (P), cultivo de milho e feijão em sucessão (MF). As áreas hachuradas correspondem ao intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo.





**Figura 7.** Variação do conteúdo de água em função da  $D_s$  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 2 MPa na profundidade de 20-25 cm do solo sob mata nativa 1 (MN 1), mata nativa 2 (MN 2), cultivo de banana (B), cultivo de goiaba (G), pastagem (P), cultivo de milho e feijão em sucessão (MF). As áreas hachuradas correspondem ao intervalo hídrico ótimo (IHO) do solo.

Nos solos sob pastagem e milho e feijão em sucessão, na profundidade de 5-10 cm, houve um aumento expressivo da retenção de água nos potenciais de -0,01 e -1,5 MPa. Comportamento semelhante foi observado por Beutler et al. (2004), Freddi et al. (2007) e Aguiar (2008). Para da Silva et al. (2009) isto ocorre pelo aumento nos valores

de  $D_s$  que diminui o diâmetro efetivo dos poros entre os agregados, reorganizando o sistema poroso que se torna mais eficiente na retenção de água.

Em todos os solos e profundidades ocorreram simultaneamente aumento na  $\theta_{RP}$  e decréscimo na  $\theta_{PA}$  com o aumento de  $D_s$ , concordando com os resultados obtidos por da Silva et al. (1994) e Beutler et al. (2004; 2008a). Tormena et al. (1999), expressaram o IHO destacando que os potenciais matriciais nos quais a porosidade de aeração é de  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e no qual a resistência à penetração atinge 2,0 MPa, são fortemente influenciados pela densidade do solo.

O estreitamento do IHO evidenciado nos solos cultivados (Figuras 6C, 6D, 6E e 6F) e (Figuras 7C, 7D, 7E e 7F) caracterizam perda da qualidade física do solo em função de estresse físico imposto às culturas manejadas, como constatado por da Silva & Kay (1996). Essas modificações devem-se principalmente às práticas de manejo que utilizam equipamentos agrícolas e à repetição dessas operações ao longo dos anos ocorridos nestas áreas, bem como o uso do solo para pastagens, considerada outra forma de exploração bastante difundida, que resultam, frequentemente, em conteúdos de água fora dos limites do IHO (da Silva e Kay, 2004).

Da Silva & Kay (1997) demonstraram que o desenvolvimento das plantas nos solos que tem um estreito IHO é mais prejudicado tanto por secas como por altas precipitações. Assim, nas regiões semi áridas onde a precipitação é bastante variável e deficiente, as alterações do solo que causam o estreitamento do IHO pode ser um fator prejudicial ao desenvolvimento das plantas. No entanto, a magnitude dessas alterações ocorridas no solo varia com a cultura sobre o solo (Orellana et al., 1997).

A amplitude total de variação do IHO foi menor nos solos sob pastagem e milho e feijão em sucessão, variando de 0 a  $0,033 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e 0 a  $0,05 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (profundidade de 5-10 cm); e de 0 a  $0,037 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  e 0 a  $0,034 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$  (profundidade de 20-25 cm). Esses solos, em condições climáticas adversas, poderão apresentar restrições ao cultivo, por apresentarem uma pequena lâmina de água disponível.

Hamza & Anderson (2005) explicam fisiologicamente o comportamento do IHO em solos com baixa umidade. Relatam ainda que a coesão e a resistência do solo à penetração aumentam e a pressão hidrostática das células das raízes diminui, com conseqüente redução da força na coifa e na região meristemática para superar a resistência do solo. Algumas espécies podem, mesmo em solos com alta resistência à penetração, desenvolver o sistema radicular em função das suas especificidades (Rosolem et al., 2002). Essas diferenças auxiliam na seleção de espécies capazes de

crescer em condições adversas e ser utilizadas na recuperação de solos (Reinert et al., 2008).

Em locais onde as condições de precipitação são frequentemente deficientes, a capacidade do solo em reter água para as plantas pode representar um fator significativo para o desenvolvimento das culturas (da Silva e Kay, 2004). A diminuição da amplitude de IHO indica a exposição das culturas ao estresse hídrico, fato importante para as condições do Semi árido Nordestino, e a magnitude de exposição na qual a condição estrutural do solo restringe o desenvolvimento das plantas (da Silva & Kay, 1997).

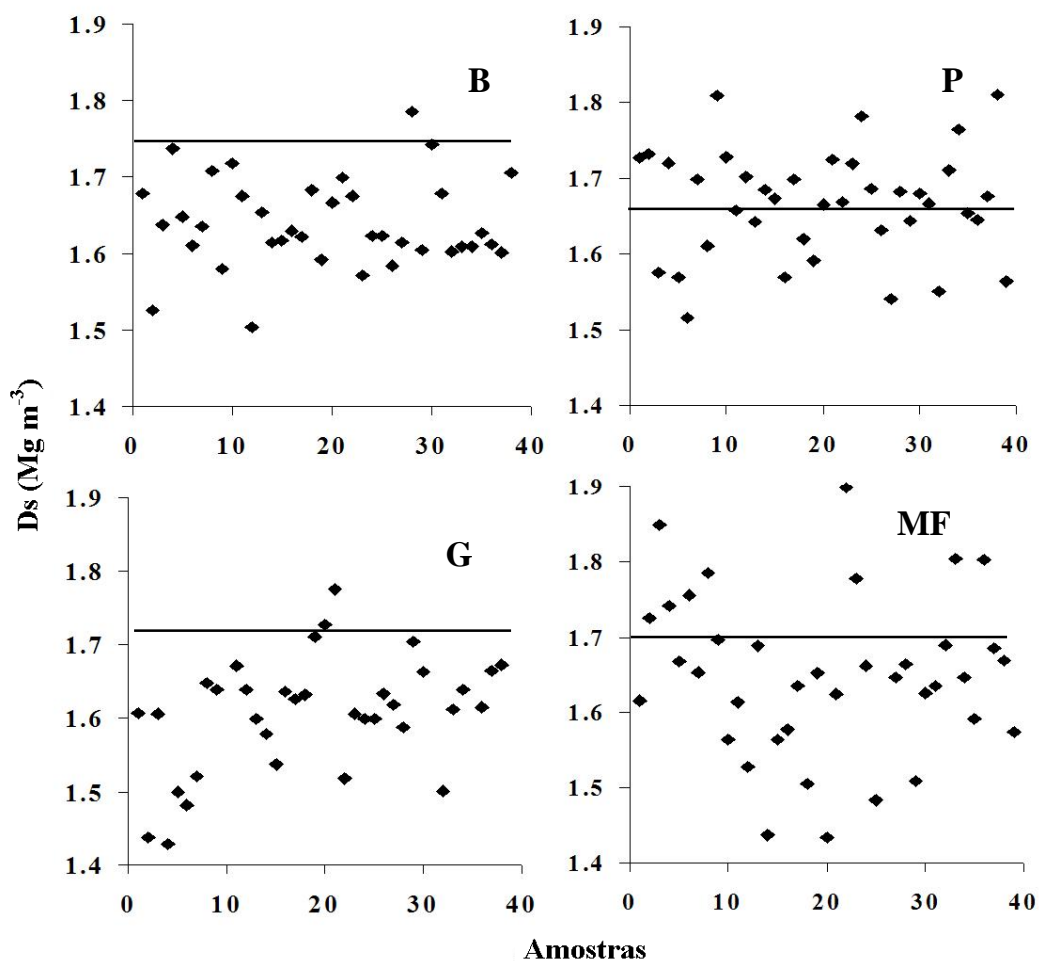
A redução do IHO com o aumento da densidade do solo (Tormena et al., 2007) geralmente resulta em direção a valores de densidade em que o IHO é igual à zero, a qual denomina-se densidade crítica do solo (Dsc) (da Silva et al., 1994). Esta, indica que podem ocorrer restrições ao crescimento radicular das plantas (Reynolds et al., 2002), e que o manejo do solo não está sendo bem executado e que, portanto, o produtor já deve começar a se preocupar em mudar sua forma de manejar o solo (da Silva et al., 2009).

Nos solos sob mata nativa não se constatou valores de IHO nulos para os valores de Ds determinados (Figuras 6A, 6B, 7A e 7B), corroborando as indicações de Reynolds et al. (2002) que solos sob mata nativa apresentam boas condições físicas. Na profundidade de 5-10 cm, a Dsc foi 1,77, 1,67, 1,70 e 1,69 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente, nos solos sob banana, goiaba, pastagem e milho e feijão em sucessão, na profundidade de 20-25 cm, a Dsc foi igual nos solo sob pastagem e goiaba, 1,63, e 1,67 Mg m<sup>-3</sup> em milho e feijão em sucessão.

Para Reinert et al. (2008), em solos típicos do Rio Grande do Sul, o crescimento normal das plantas de cobertura ocorre até o limite de densidade de 1,75 Mg m<sup>-3</sup>. Entre a faixa de 1,75 e 1,85 Mg m<sup>-3</sup>, de acordo com os autores, ocorre restrição com deformações na morfologia das raízes em grau médio e, acima de 1,85 Mg m<sup>-3</sup>, essas deformações são significativas, com grande engrossamento do sistema radicular, desvios no crescimento vertical e concentração na camada mais superficial do solo.

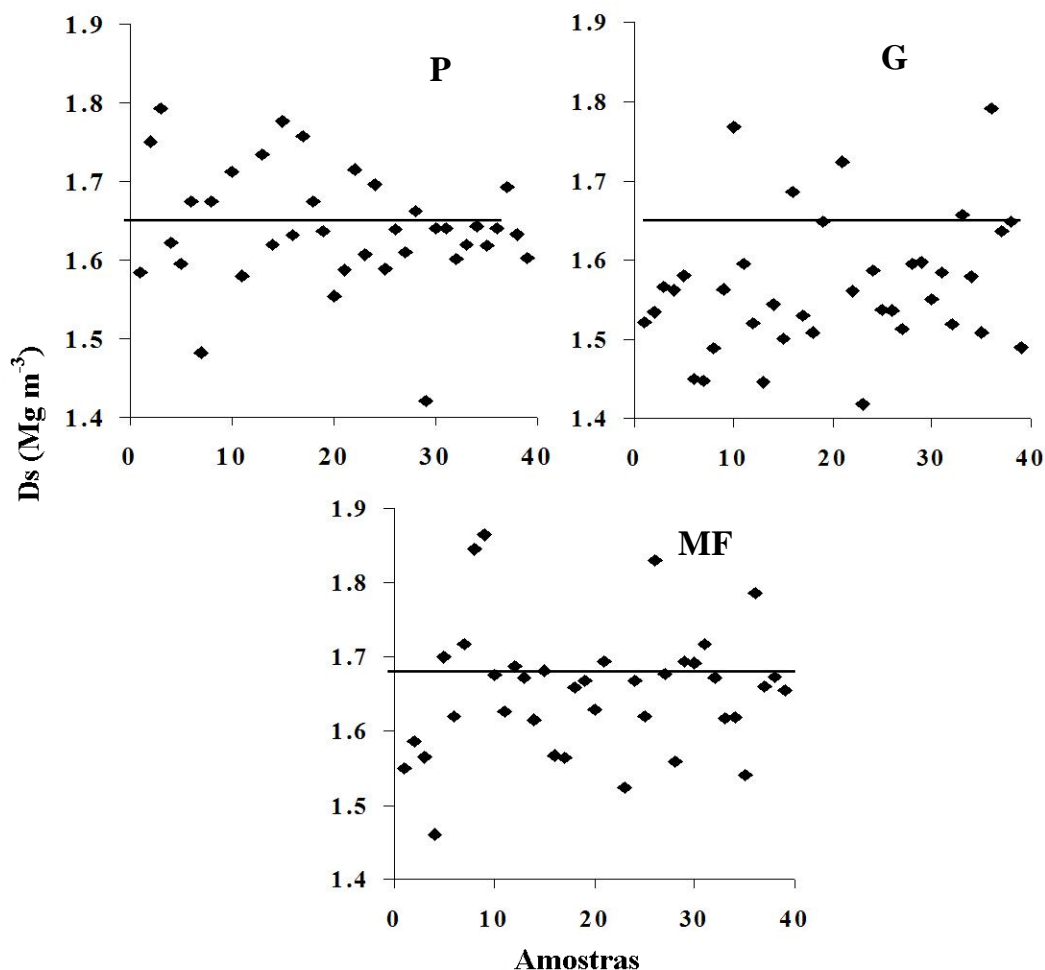
Observa-se nas Figuras 8B e 9A, que no solo sob pastagem encontra-se a maior ocorrência de amostras com Ds > Dsc, o que, segundo Leão et al. (2004), indica condições físicas severamente restritivas ao crescimento das raízes, que pode ser devido a intensidade, sistema de pastejo ou a taxa de lotação animal (Leão, 2002 e Leão et al. 2004). No entanto, Leão et al. (2006) ressaltam que é difícil estimar o impacto dessa restrição ao crescimento da pastagem, visto que o crescimento das plantas é um

processo dinâmico, e adaptações fisiológicas e/ou morfológicas são comumente encontradas em espécies de plantas crescendo em ambientes estressantes.



**Figura 8.** Variabilidade dos valores de densidade do solo das amostras coletadas nos solos e que foram identificadas a densidade do solo crítica ( $D_{sc}$ ), na profundidade de 5-10 cm do solo sob cultivo de banana (B), solo sob pastagem (P), solo sob cultivo de goiaba (G), solo sob cultivo de milho e feijão em sucessão (MF).

Os solos sob banana, goiaba e milho e feijão em sucessão na profundidade de 5-10 cm (Figura 8) e, goiaba e milho e feijão em sucessão na profundidade 20-25 cm (Figura 9) apresentaram maior número de amostras com  $D_s < D_{sc}$ , mostrando que o solo está sob melhores condições para crescimento radicular e desenvolvimento da planta.



**Figura 9.** Variabilidade dos valores de densidade do solo das amostras coletadas nos solos e que foram identificadas a densidade do solo crítica ( $D_{sc}$ ), na profundidade de 20-25 cm do solo sob pastagem (P), área sob cultivo de goiaba (G), área sob cultivo de milho e feijão em sucessão (MF).

A boa qualidade física dos solos sob cultivo de milho e feijão em sucessão na profundidade 20-25 cm que foi identificado pelo maior número de amostras com  $D_s < D_{sc}$  aliado ao valor de índice S superior ao estabelecido por Dexter (2004a), não era esperada, visto que em solos sob cultivo intensivo, a carga total aplicada por eixo das máquinas agrícolas que são utilizadas excessivamente sob diferentes condições de umidade do solo bem como a repetitividade das operações ao longo dos anos, propicia a formação de uma compactação em subsuperfície (Klein & Libardi, 2002; Beutler et al., 2004; Hamza & Anderson, 2005; Beutler et al., 2008a).

Porém, isto pode ser explicado pelo momento da coleta das amostras que ocorreu logo após o preparo do solo para o cultivo na época (feijão), no qual foi realizado a subsolagem, aração e gradagem, e estes por sua vez, em curto período de

tempo podem minimizar os efeitos negativos ocorrido ao longo dos anos pelo tráfego de máquinas ao solo.

### 4.3 Densidade relativa

Nas Tabelas 5 e 6 é apresentado o resumo da análise estatística descritiva dos valores de densidade relativa do solo para as profundidades avaliadas. Nela se observa que os solos sob mata nativa 1 e 2 apresentaram os menores valores de densidades relativas seguidos pelos solos sob cultivo de banana, goiaba, pastagem e milho e feijão em sucessão, respectivamente, para a profundidade de 5-10 cm e, banana, pastagem, goiaba e milho e feijão em sucessão, na profundidade de 20-25 cm. Observa-se também que o solo cultivado com milho e feijão em sucessão, além de apresentar maiores valores de Dr nas duas profundidades avaliadas, apresenta maior amplitude nos valores observados na profundidade de 5-10 cm.

**Tabela 5.** Resumo estatístico dos resultados obtidos para densidade relativa (Dr) na profundidade de 5-10 cm em solos da Chapada do Apodi, CE.

Área	N	Media	Mediana	Mín	Máx	Quartil inf.	Quartil sup.	Amplit. total	DP	c.v. (%)
<b>MN 1</b>	37	0.90	0.90	0.818	0.971	0.866	0.922	0.056	0.039	4.34
<b>MN 2</b>	36	0.89	0.89	0.782	0.994	0.861	0.925	0.064	0.045	5.06
<b>B</b>	36	0.92	0.91	0.856	0.977	0.903	0.941	0.038	0.027	2.61
<b>G</b>	38	0.98	0.99	0.843	1.097	0.939	1.012	0.073	0.060	6.13
<b>MF</b>	39	1.11	1.10	0.958	1.272	1.054	1.152	0.099	0.076	6.85
<b>P</b>	39	1.00	1.01	0.913	1.091	0.976	1.036	0.060	0.043	4.3

**N:** número válido; **DP:** desvio padrão; **c.v.:** coeficiente de variação. **MN 1:** mata nativa 1; **MN 2:** mata nativa 2; **B:** solo sob cultivo de banana; **G:** solo sob cultivo de goiaba; **MF:** solo sob cultivo de milho e feijão em sucessão; **P:** solo sob pastagem.

Na Tabela 5 as médias dos valores se encontram relativamente altos quando comparados aos valores de densidade relativa estabelecidos por Carter (1990), que descrevem a densidade relativa ótima para cereais variando de 0,77 a 0,84, e à Hakansson (1990) o qual considera a densidade relativa de 0,87 para o máximo rendimento de cevada, como também à Beutler et al. (2008b) onde encontraram um grau de compactação de até 79 e 81%, respectivamente, equivalentes às densidades relativas de 0,79 e 0,81 e que favoreceram a obtenção de produtividades máximas para a cultura da soja e do milho, e a partir desses níveis de compactação ocorreu decréscimo da produtividade.

**Tabela 6.** Resumo estatístico dos resultados obtidos para densidade relativa (Dr) na profundidade de 20-25 cm em solos da Chapada do Apodi, CE.

Área	N	Media	Mediana	Min	Máx	Quartil inf.	Quartil sup.	Amplit. total	DP	c.v. (%)
<b>MN 1</b>	35	0.82	0.83	0.730	0.880	0.808	0.848	0.039	0.031	3.78
<b>MN 2</b>	39	0.87	0.86	0.803	0.948	0.845	0.883	0.038	0.030	3.45
<b>B</b>	37	0.88	0.89	0.774	0.923	0.861	0.895	0.034	0.037	4.21
<b>G</b>	38	0.92	0.92	0.835	1.055	0.891	0.939	0.049	0.049	5.33
<b>MF</b>	38	0.94	0.95	0.830	1.060	0.918	0.961	0.043	0.049	5.22
<b>P</b>	38	0.89	0.89	0.757	0.978	0.874	0.914	0.040	0.046	5.17

**N:** numero válido; **DP:** desvio padrão; **c.v.:** coeficiente de variação. **MN 1:** mata nativa 1; **MN 2:** mata nativa 2; **B:** solo sob cultivo de banana; **G:** solo sob cultivo de goiaba; **MF:** solo sob cultivo de milho e feijão em sucessão; **P:** solo sob pastagem.

Suzuki et al. (2007) relatam que a relação entre o grau de compactação e as propriedades físicas do solo em relação às culturas ainda deve ser testado para que sejam definidos os valores críticos de grau de compactação encontrado no desenvolvimento das plantas. Para Klein (2006), é importante destacar que os efeitos das alterações na estrutura do solo sobre as culturas são difíceis de serem mensurados, pois mesmo com aumento da densidade do solo as culturas mantêm rendimentos aceitáveis, o que muitas vezes é obtido pelo efeito dos mecanismos sulcadores das semeadoras e pelas condições meteorológicas favoráveis vigentes.

Para a profundidade de 20-25 cm, os solos cultivados também apresentaram valores acima do estabelecido por Carter (1990); Hakansson (1990) e Beutler et al. (2008b). Porém, os solos sob banana e pastagem apresentaram valores abaixo do estabelecido por Lipiec et al. (1991) (0,91) em que ocorre restrições no crescimento e rendimento das plantas. O solo sob milho e feijão em sucessão se encontra mais compactado, se considerados os valores estabelecidos por estes mesmos autores. De um modo geral, os valores de amplitude interquartílica na profundidade de 20-25 cm foram baixos, ou seja, 50% dos valores de Dr concentraram-se em uma pequena faixa.

Os altos valores de Dr encontrados nas profundidades avaliadas podem ser devido aos elevados conteúdos de argila nestes solos e, portanto, mais suscetíveis à compactação (Tabela 1). Suzuki et al. (2007), com o objetivo de avaliar os parâmetros físicos do solo e o rendimento das culturas de soja e feijoeiro em resposta ao grau de compactação de um Argissolo e um Latossolo, verificaram valores elevados (> 91%) e uma pequena faixa de grau de compactação (91 a 98%) no Argissolo, em contrapartida, verificaram uma ampla faixa de grau de compactação (75 a 89%) alcançada no Latossolo.

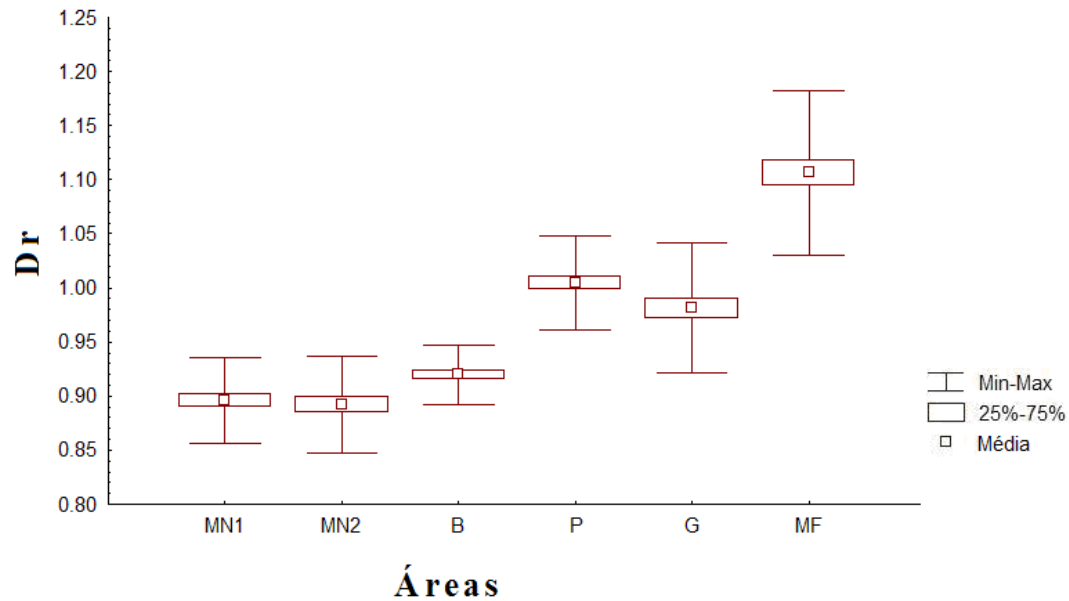
Segundo estes mesmos autores, no Argissolo, a maior altura de planta e o rendimento de soja foram observados com grau de compactação de 93%; a cultura do feijoeiro, diferentemente da maioria das culturas que apresentam os maiores rendimentos com grau de compactação entre 77 e 87%, apresentaram os maiores rendimentos com grau de compactação acima de 90%.

De acordo com Libardi et al. (1996), um conjunto de dados está sujeito a perturbações por valores atípicos, sendo necessário calcular os limites inferior e superior para visualizar a possível distribuição e comportamento geral dos dados e com isso detectar os dados influentes.

As Figuras 10 e 11 mostram o diagrama “Box Plot” para as densidades relativas do solo, sem os valores influentes, nas quais é possível observar a dispersão dos dados nas áreas avaliadas. Observa-se que os valores de Dr das matas nativas apresentam-se menores do que os solos cultivados, mostrando que o uso pode compactar o solo, devido ao pisoteio animal, tráfego de máquinas e implementos agrícolas, cultivo e, ou, cultivo intensivo e sistema de manejo inadequado (Hamza & Anderson, 2005). Estes valores aliados aos altos Índices S e amplo IHO sem identificação de Dsc, corroboram as indicações de que solos sob mata nativa apresentam excelentes condições físicas.

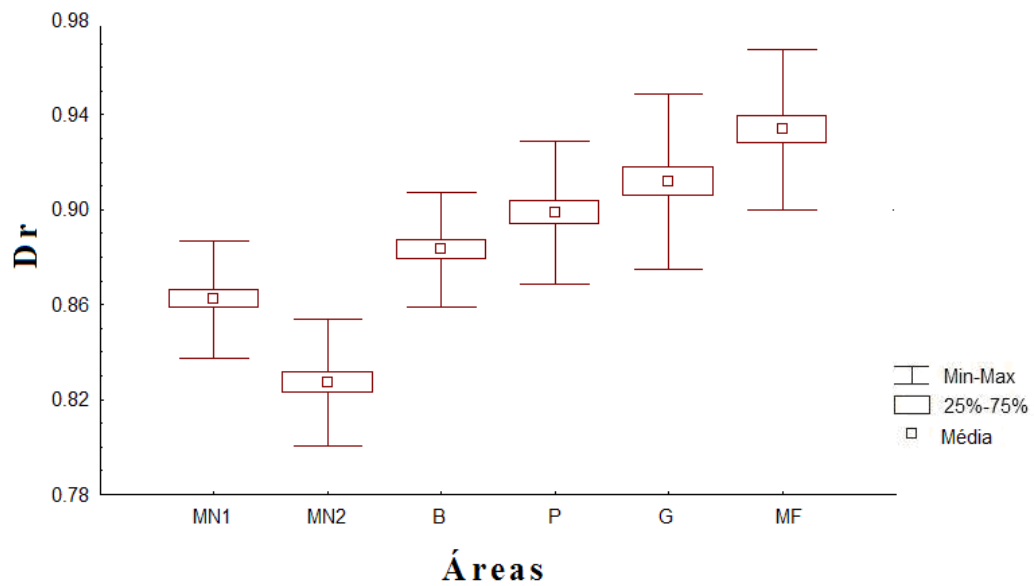
Dos solos cultivados, o da banana apresentou os menores valores de densidade relativa e o solo sob cultivo de milho e feijão em sucessão apresentou os maiores valores nas duas profundidades. Ao observar a Figura 10, verifica-se que os solos sob pastagem e milho e feijão em sucessão apresentam os maiores valores de Dr, que aliada à estreita amplitude do IHO e menor valor do índice S, caracterizam forte perda da qualidade física do solo.





**Figura 10.** Diagrama tipo “Box Plot” para Densidade relativa do solo para a profundidade de 5-10 cm dos solos sob mata nativa 1, mata nativa 2, cultivo de banana, pastagem, cultivo de goiaba e cultivo de milho e feijão em sucessão na Chapada do Apodi, CE.

Analisando-se a Figura 11, não se observa a mesma concordância entre os indicadores de qualidade física do solo sob pastagem (profundidade de 20-25 cm), visto que o índice S e IHO indicam esta área como sendo a mais degradada, e a Dr indica que esse solo possui menor compactação do que o cultivado com goiaba e milho e feijão em sucessão. A mesma situação ocorre com o solo cultivado com Milho e feijão em sucessão na profundidade de 20-25 m, em que Dr indica ser o solo mais compactado ao contrário do índice S e IHO que indicaram este solo como sendo de boa qualidade física.



**Figura 11.** Diagrama tipo “Box Plot” para Densidade relativa do solo para a profundidade de 20-25 cm dos solos sob mata nativa 1, mata nativa 2, cultivo de banana, pastagem, cultivo de goiaba e cultivo de milho e feijão em sucessão na Chapada do Apodi, CE.

## 5. CONCLUSÕES

1. Os indicadores de qualidade física do solo (índice S, intervalo hídrico ótimo e densidade relativa) mostraram-se sensíveis às variações dos sistemas de cultivo.

2. Os solos sob cultivo de banana e goiaba apresentaram boa qualidade física do solo e melhores condições para crescimento radicular e desenvolvimento da planta nas duas profundidades avaliadas, verificado pelos indicadores avaliados, comparados com os outros sistemas de cultivo.

3. O solo sob cultivo de milho e feijão em sucessão na profundidade de 5-10 cm, e pastagem nas duas profundidades avaliadas apresentaram forte perda da qualidade física do solo, verificados pelos índices avaliados.

4. Com exceção do solo sob cultivo de milho e feijão em sucessão na profundidade de 5-10 cm, houve concordância com as indicações do índice S e intervalo hídrico ótimo, em todos os solos e profundidades avaliadas.

5. O indicador densidade relativa concorda com as indicações do índice S e intervalo hídrico ótimo dos solos sob mata nativa, cultivo de banana, goiaba e pastagem na profundidade de 5-10 cm, e dos solos sob mata nativa e cultivo de banana na profundidade de 20-25 cm.

## 6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

- AGUIAR, M.I. Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2008. 76p.
- ALVES, M.C.; SUZUKI, L.G.A.S. & SUZUKI, L.E.A.S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. R. Bras. Ci. Solo, 31:617-625, 2007.
- ANDRADE, R. da S. & STONE, L.F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. R. Bras. Eng. Agríc. Amb., 13:382-388, 2009.
- ARAÚJO, R.; GOEDERT, W.J. & LACERDA, M.P.C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo. R. Bras. Ci. Solo, 31:1099-1108, 2007.
- ARAÚJO, M.A.; INOUE, T.T. & TORMENA, C.A. Qualidade física do solo avaliada pelo intervalo ótimo de potencial da água no solo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. Resumo expandido. Ribeirão Preto, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. CD-ROM.
- ARATANI, R.G.; FREDDI, O. da S.; CENTURION, J.F. & ANDRIOLI, I. Qualidade física de um latossolo vermelho acriférico sob diferentes sistemas de uso e manejo. R. Bras. Ci. Solo, 33:677-687, 2009.
- BARRETO, A.N. & SILVA, A.A.G. A irrigação no mundo. In: BARRETO, A. N.; SILVA, A. A. G.; BOLFE, E. L. Irrigação e drenagem na empresa agrícola. Aracaju: Embrapa Tabuleiros Costeiros; Campina Grande: Embrapa Algodão, 2004. cap.1, p.13-45.
- BETTERIDGE, K.; MACKAY, A.D.; SHEPHERD, T.G.; BARKER, D.J.; BUDDING, P.J.; DEVANTIER, B.P. & COSTALL, D.A. Effect of cattle and sheep treading on surface configuration of a sedimentary hill soil. Aust. J. Soil Res., 37:743-760, 1999.

- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; DA SILVA, A.P.; CENTURION, M.A.P.C.; LEONEL, C.L. & FREDDI, O.S. Soil compaction by machine traffic and least limiting water range related to soybean yield. *Pesq. Agropec. Bras.*, Brasília, 43:1591-1600, 2008a.
- BEUTLER, A.N.; FREDDI, O.S.; LEONEL, C.L. & CENTURION, J.F. Densidade do solo relativa e parâmetro “S” como indicadores da qualidade física para culturas anuais. *Rev. Bio. Cie. Ter.*, 8:27-36, 2008b.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; DA SILVA, A.P.; ROQUE, C.G. & FERRAZ, M.V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. *Pesq. Agropec. Bras.*, 39:575-580, 2004.
- BEUTLER, A.N. & CENTURION, J.F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. *Pesq. Agropec. Bras.*, 38:849-856, 2003.
- BLAKE, G.R. & HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A., ed. *Methods of soil analysis*. 2.ed. Madison, American Society of Agronomy, Soil Science Society of American, 1986, p. 363-375.
- BRANDFORD, J.M. The penetration resistance in a soil with well-defined structural units. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:601- 606, 1980.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. *Trans. Am. Soc. Agric. Eng.*, 3:519-524, 1990.
- CARLESSO, R. La Agricultura de Precisión y los Sistemas de Riego. In. III Congreso Nacional – II Congreso Iberoamericano de Riego y Drenaje. 2008, Lima-Peru. CD-ROM.
- CARTER, M.R. Relative measures of soil bulk density to characterize compaction in tillage studies on fine sandy loams. *Can. J. Soil Sci.*, 70:425 – 433, 1990.
- DA SILVA, G.L. Qualidade física de um Luvisolo cultivado com sistemas agroflorestais e convencional no semi-árido cearense. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2008. 69p.
- DA 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.
- DA SILVA, A.P; TORMENA, C.A; IMHOFF, S.; FIDALSKI, J. & NEVES JUNIOR, A.F. Intervalo hídrico ótimo e sua importância para as plantas. *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009, v. 6, p. 1-30.
- DA 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, 1997.

- DA 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.
- DA SILVA, A.P.; KAY, B.D. & PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 58:1775-1781, 1994.
- 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, tilth 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.
- DNOCS. Projetos: Perímetro irrigado Jaguaribe - Apodi. Disponível em: <[http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros\\_irrigados/ce/jaguaribe\\_apodi.html](http://www.dnocs.gov.br/~dnocs/doc/canais/perimetros_irrigados/ce/jaguaribe_apodi.html)>. Acesso em 25/03/2009.
- 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 America, 1994. p. 3-21.
- DORAN, J.W. & ZEISS, M.R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Appl. Soil Ecol.*, 15:3-11, 2000.
- EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de solos, 1997. 212p.
- FAO. FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. Crops and Drops: Making the Best Use of Water for Agriculture. Rome, 2002.
- FERRERAS, L.A.; BATTISTA, J.J.; AUSILIO, A.; PECORARI, C. Parâmetros físicos del suelo em condiciones no perturbadas y bajo laboro. *Pesq. Agropec. Bras.*, v. 36:161 – 170, 2001.
- FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C. & LIMA, S.L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesq. Agropec. Bras.*, 38:947-953, 2003.
- FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; BEUTLER, A.N.; ARATANI, R.G.; LEONEL, C.L. & DA SILVA, A.P. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. *Bragantia*, 66:477-486, 2007.
- GIRÃO, R.O. Caracterização de solos desenvolvidos sobre rochas calcárias. Monografia de graduação, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2007. 58f.

- 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.
- HAMZA, M.A. & ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems - A review of the nature, causes and possible solutions. *Soil & Till. Res.*, 82:121-145, 2005.
- HAKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. *Soil & Till. Res.*, 53:71-85, 2000.
- HAKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. *Soil & Till. Res.*, 16:105-120, 1990.
- HOAGLIN, D.C.; MOSTELLER, F.; TUKEY, J.W. *Análise exploratória de dados: Técnicas robustas: um guia*. Lisboa: Edições Salamandra, 1992. 446p.
- IMHOFF, S.D.C. Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos. Tese de doutorado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. 104p.
- KLEIN, V.A. *Física do solo*. Ed. Universidade Passo, Passo Fundo, 2008. 212p.
- KLEIN, V.A. Densidade relativa - um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. *Rev. de Ciências Agrovet.*, 5:26-32, 2006.
- 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.
- KLEIN, V.A. & LIBARDI, P.L. Faixa de umidade menos limitante ao crescimento vegetal e sua relação com a densidade do solo ao longo do perfil de um Latossolo Roxo. *Ciência Rural*, 30:959-964, 2000.
- 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 America, 1986, p. 635-662.
- LAL, R. Physical management of soils of the tropics: Priorities for the 21<sup>ST</sup> Century. *Soil Science*. 165:191-207, 2000.
- LAL, R. Métodos para avaliação do uso sustentável dos recursos solo e água nos trópicos; Tradução e adaptação de Cláudia Conti Medugno e José Flávio Dynia. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 1999. 97p. (Embrapa Meio Ambiente – Documentos, 03).
- 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. A simplified Excel<sup>®</sup> algorithm from estimating the least limiting water range of soils. *Sci. Agricola*, 61:649-654, 2004.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M & IMHOFF, S. & EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. *R. Bras. Ci. Solo*, 28:415-423, 2004.
- LEÃO, T.P. Intervalo hídrico ótimo em diferentes sistemas de pastejo e manejo de pastagem. Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. 58p.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. *Adv. Soil Sci.*, 1:277-294, 1985.
- LIBARD, P.L.; MANFRON, PA.; MORAES, S.O.; SAAD, A.M.; TUON, R.L. Variabilidade da umidade gravimétrica de um solo hidromórfico. *R. Bras. Ci. Solo*, 20:1-12, 1996.
- LIPIEC, J.; HAKANSSON, I.; TARKIEWICZ, S.; KOSSOWSKI, J. Soil physical properties and growth of spring barley as related to the degree of compactness of two soils. *Soil & Till. Res.*, 19:307 – 317, 1991.
- MARCOLIN, C.D. Propriedades físicas de Nitossolo e Latossolos Argilosos sob plantio direto. Dissertação de Mestrado, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2006.110p.
- 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 America, 1986, p. 799-823.
- NIE, Z.N.; WARD, G.N. & MICHAEL, A.T. Impact of pugging by dairy cows on pastures and indicators of pugging damage to pasture soil on South – Western Victoria. *Aust. J. Soil Res.*, 52:37-43, 2001.
- NOGUEIRA, J.B. *Mecânica dos solos: ensaios de laboratório*. São Carlos: USP, EESC, 1998. 248p.
- ORELLANA, J.A.; PILATTI, M.A. & GRENÓN, D.A. Soil quality: an approach to physical state assessment. *J. Sust. Agric.*, 9:91-108, 1997.
- PAZ, V.P.S.; TEODORO, R.E.F.; MENDONÇA, F.C.; Recursos hídricos, agricultura irrigada e meio ambiente. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 4:465-473, 2000.
- PROCTOR, R.R. Fundamental principles of soil compaction, *Eng. News Rec.*, 5:286-289, 1933.
- PROFFITT, A.P.B.; BENDOTTI, S.; HOWELL, M.R. & EASTHAM, J. The effect of sheep trampling and grazing on soil physical properties and pasture growth for a Red – Brown earth. *Aust. J. Agric. Soil Res.*, 44:317-331, 1993.



- REICHARDT, K. Capacidade de campo. R. Bras. Ci. Solo, 12:211-216, 1988.
- REICHERT, J.M; REINERT D.J. & BRAIDA, J.A. Manejo, qualidade do solo e sustentabilidade: condições físicas do solo agrícola. CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., Ribeirão Preto, 2003. Palestras. Ribeirão Preto: SBCS, 2003. CD-ROM.
- REINERT D.J; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M; AITA, C. & ANDRADA; M.M.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. R. Bras. Ci. Solo, 32:1805-1816, 2008.
- REYNOLDS, W.D.; BOWMAN, B.T.; DRURY, C.F.; TAN, C.S. & LU, X. Indicators of good physical quality: density and storage parameters. Geoderma, 110:131-146, 2002.
- ROMERO, E.M. Condutividade hidráulica, porosidade e resistência à penetração em Latossolos artificialmente Compactados. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2007. 55p.
- ROMERO, R.E.; JACOMINE, P.K.T.; GOMES, E.C.B. Guia da excursão pedológica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 32., 2009, Fortaleza-Ceará.
- ROSOLEM, C.A.; FOLONI, J.S.S. & TIRITAN, C.S. Root growth and nutrient accumulation in cover crops as affected by soil compaction. Soil & Till. Res., 65:109-115, 2002.
- 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. Dispersão física do solo para análise granulométrica por agitação lenta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 30, 2005, Recife. Resumos expandidos. Recife: SBCS, 2005a. (CD-ROM).
- 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, 2005b.
- SAVAGE, M.J.; RITCHIE, J.T.; BLAND, W.L. & DUGAS, W.A. Lower limit of soil water availability, Agron. J., 88:844-851, 1996.
- SHUKLA, M.K.; LAL, R. & EBINGERB, M. Determining soil quality indicators by factor analysis. Soil & Till. Res., 87:194-204, 2006.
- SILVA, G.J.; VALADÃO JÚNIOR, D.D.; BIANCHINI, A.; AZEVEDO, E.C. & MAIA, J.C.S. Variação de atributos físico-hídricos em Latossolo Vermelho-Amarelo do cerrado mato-grossense sob diferentes formas de uso. R. Bras. Ci. Solo, 32:2135-2143, 2008.

- SILVA, G.J.; MAIA, J.C.S. & BIANCHINI, A. Crescimento da parte aérea de plantas cultivadas em vaso, submetidas à irrigação subsuperficial e a diferentes graus de compactação de um Latossolo Vermelho-escuro distrófico. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:31-40, 2006.
- STAT SOFT. Statistics for windows: electronic manual index. Version 4.3. Tulsa, 1993.
- STENBERG, B. Monitoring soil quality of arable land: Microbiological indicators. *Soil Plant Sci.*, 49:1-24, 1999.
- SUZUKI, L.E.A.S.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; LIMA, C.L.R. Grau de compactação, propriedades físicas e rendimento de culturas em Latossolo e Argissolo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 42:1159-1167, 2007.
- TORMENA, C.A.; da 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. Agricola*, 65:56-60, 2008.
- 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.; GONÇALVES, A.C.A. & FOLEGATTI, M.V. Intervalo ótimo de potencial da água do solo: um conceito para avaliação da qualidade física do solo e manejo da água na agricultura irrigada. *R. Bras. Eng. Agríc. Amb.*, 20:286-292, 1999.
- 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, 1998.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 44:892-898, 1980.
- WATANABE, S.H.; TORMENA, C.A.; ARAÚJO, M.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; PINTO, J.C.; COSTA, A.C.S.; MUNIZ, A.S. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico influenciadas por sistemas de preparo do solo utilizados para implantação da cultura da mandioca. *Acta Scientiarum*, 24:1255-1264, 2002.
- WILLATT, S.T. & PULLAR, D.M. Changes in soil physical properties under grazes pastures. *Aust. J. Soil Res.*, 22:343-348, 1983.
- ZOU, C.; SANDS, R.; BUCHAN, G. & HUDSON, I. Least limiting water range: a potential indicator of physical quality of forest soils. *Aust. J. Soil Res.*, 38:947-958, 2000.