

MARIA IVANILDA DE AGUIAR

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Solos e Nutrição de  
Plantas, para obtenção do título de  
*Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2008

MARIA IVANILDA DE AGUIAR

**QUALIDADE FÍSICA DO SOLO EM SISTEMAS AGROFLORESTAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Aprovada em 18 de fevereiro de 2008.

---

Profa. Irene Maria Cardoso  
(Co-orientadora)

---

Prof. Ivo Jucksch

---

Profa. Maria Betânia Galvão dos Santos Freire

---

Dr. Paulo César de Lima

---

Prof. Raphael Bragança Alves Fernandes  
(Orientador)

Dedico este trabalho:

A meus queridos pais, João Batista e Maria Aparecida, e a minha madrinha, Maria Augusta, pelo amor e apoio e pelo muito que representam pra mim.

Ao professor, Teógenes Senna de Oliveira, que tanto contribui para minha formação profissional.

Ao professor, Raphael Bragança A. Fernandes, que com paciência e dedicação me orientou durante o mestrado, contribuindo enormemente para a realização deste trabalho.

## AGRADECIMENTOS

Por ter conseguido realizar este trabalho agradeço a Deus que me deu força, responsabilidade e determinação para não desistir jamais. “Em te se encontram todas as minhas fontes” (SL 87:7).

A CAPES pela concessão de bolsa durante o período de mestrado.

A Universidade Federal de Viçosa, tenho muito o quê agradecer: pela beleza de seu Campus, a qual contemplei em muitas caminhadas; por sua biblioteca, inúmeras vezes visitada; pelo Departamento de Solo onde tive a oportunidade de realizar este trabalho e adquirir substancial conhecimento, além de conviver com pessoas maravilhosa, como meu orientador, professor Raphael Bragança A. Fernandes, a quem muito agradeço pela orientação no desenvolvimento da dissertação e ensinamentos oferecidos sempre com muita cordialidade e paciência. E pela fiança na locação do apartamento também. A professora Irene Maria Cardoso, pela co-orientação, idéias e correções, que tanto contribuem para o aperfeiçoamento do trabalho desenvolvido, assim como para minha formação profissional e pessoal. O professor Eduardo Sá Mendonça, que também me co-orientou. Ao professor Júlio Neves, pela valiosa orientação na análise estatística; ao professor Ivo Jucksch, por suas sugestões que contribuições para melhor qualidade do trabalho; E muitos outros professores, responsáveis por conteúdos adquiridos e pelo despertar do desejo de saber mais. Dentre estes, posso falar que sinto maior admiração e reforço meu agradecimento aos professores Carlos Ernesto e João Ker. Não posso deixar de falar dos funcionários deste departamento, em especial a Luciana, por ser sempre tão prestativa e simpática, os laboratoristas Cláudio, Benedito e Fabio, pela valiosa colaboração na realização das análises de laboratório e pela boa convivência e o seu Vicente, pelos cafezinhos que regaram as conversas durante os intervalos. Falando em pessoas maravilhosas, não posso deixar de citar os colegas e mais ainda aqueles que se tornaram amigos, alguns mais que especiais, alguns com quem o tempo de convivência foi pouco, mas o suficiente para sentir uma enorme afeição e ter certeza que serão lembrados por muito tempo. Pessoas que compartilharam as angústias e as alegrias. Pessoas com quem muito

aprendi e que tornaram a permanência em Viçosa mais agradável, deixo aqui meus sinceros agradecimentos a todos, Fernanda Ataíde, Gislane, Paulinha, Walcrislei, Guilherme, Laudiceio, Michelli, Gracinha, Fábio, Pacheco, Alexandre, Ivan, Daniel, Fernanda Costa, Marcos Locatelli, Ítalo, Bruno T., Marcio, Helton Nonato, Dalton, Diana, Gilberto, Edvânia, Danile, Henrique, Victor, Arlicélio, Augusto e a todos os demais que esqueci de citar e que sintam-se meus amigos; agradeço, também, a Júlia e Filipe, estudantes da geografia, que me auxiliaram nas análises de laboratório.

Na Universidade Federal do Ceará, onde tudo começou, agradeço ao professor Teogénes Senna de Oliveira, pela co-orientação, apoio financeiro nas viagens de coletas, pelo incentivo, confiança e amizade; aos estudantes Valdenira, Renato, Leônia e Carol, pela ajuda nas coletas de dados e amostras no campo e pelas informações repassadas; aos funcionários, Geórgia, laboratoristas do laboratório de Manejo do Solo e Paulo, motorista do CCA.

Aos agricultores Romualdo, Reinaldo e família (Araçuaia, MG) e João Feliz e família (Choró, MG) por terem aceitado a realização deste trabalho em suas propriedades e pelas informações fornecidas.

Aos meus familiares, principalmente Venício, Irani, Lucivone, Ítalo e Maiton, que sempre estiveram mais presentes em minha vida, a todos os demais que me deram forças para continuar, sempre. Obrigado por fazerem parte da minha história.

E a quem mais, de alguma forma, contribuiu para realização deste trabalho.

## RESUMO

AGUIAR, Maria Ivanilda de, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, Fevereiro de 2008. **Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais**. Orientador: Raphael Bragança Alves Fernandes. Co-orientadores: Eduardo de Sá Mendonça, Irene Maria Cardoso; Teógenes Senna de Oliveira.

A qualidade do solo refere-se a sua funcionalidade dentro dos ecossistemas naturais ou manejados. As principais funções do solo estão relacionadas com a capacidade deste em sustentar a atividade biológica, promover o crescimento e saúde das plantas e animais e manter a qualidade ambiental. O uso intensivo do solo leva a perda da qualidade do mesmo, desta forma, há necessidade na adoção de sistemas de manejo conservacionistas, procurando a preservação da qualidade do solo. Neste sentido, os sistemas agroflorestais (SAFs) representam uma alternativa, por buscar maior equilíbrio do agroecossistema, onde a consorciação de culturas tradicionais com o componente arbóreo favorece a diversificação do sistema radicular, que fornece contínuo aporte de matéria orgânica e condiciona favoravelmente o meio físico. Partindo-se da hipótese de que o manejo agroflorestal melhora a qualidade física do solo, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a qualidade física do solo em áreas sob sistemas agroflorestais, comparando-os com cultivos a pleno sol. Para tal foram coletadas amostras de solo, nas camadas de 0-10, 10-20 e 20-40 cm de profundidade, em duas propriedades de agricultura familiar, localizadas na Zona da Mata mineira e no Semi-árido cearense. Em ambas as propriedades foram coletados solos sob sistemas agroflorestais (SAF), cultivos a pleno sol (CPS) e mata secundária (MS), sendo esta última utilizada como referência. Com estas amostras avaliou-se em laboratório: carbono orgânico total, argila dispersa em água, índice de floculação, densidade de partículas, densidade do solo, porosidade, condutividade hidráulica do solo saturado, curva de retenção da água no solo, intervalo hídrico ótimo e estabilidade de agregados. Adicionalmente, avaliou-se a resistência do solo à penetração e condutividade hidráulica do solo saturado diretamente no campo. Os SAFs promoveram melhoria na qualidade física do solo, refletida pela redução nos valores de argila dispersa em água, de densidade do solo e resistência à penetração, assim como no aumento da retenção de

água dentro da faixa disponível às plantas e no intervalo hídrico ótimo. Os sistemas avaliados na Zona da Mata apresentaram respostas mais significativas ao manejo adotado, devido a textura mais argilosa, assim como o maior tempo de adoção dos sistemas, comparativamente ao observado para a área do Semi-árido.

## ABSTRACT

AGUIAR, Maria Ivanilda de, M.Sc., Federal University of Viçosa, February 2008. **Soil physical quality in agroforestry systems.** Advisor: Raphael Bragança Alves Fernandes. Co-advisors: Eduardo de Sá Mendonça, Irene Maria Cardoso; Teógenes Senna de Oliveira.

The soil quality refers to its functionality within the ecosystems natural or managed. The main functions of the soil are related to the ability to sustain this into biological activity, to promote growth and health of plants and animals and maintaining environmental quality. The intensive use of the soil leads to loss of quality of it this way, there is a need in the adoption of management systems conservationist, trying to preserve soil quality. In this sense, the agroforestry systems (SAFs) represent an alternative, to seek greater balance of agroecosystems, where the intercropping of traditional crops with the tree component encourages the diversification of the root system, which provides continuous input of organic matter and positively conditions the environment. Based on the hypothesis that the management agroforest improves physical quality of the soil, this study aimed to assess the quality of soil physics in areas under agroforestry systems, comparing them with cultures at full sun. Soil samples were collected in layers of 0-10, 10-20 and 20-40 cm deep, in two farms of family agriculture, located in the Zona da Mata mining and Semi-arid Ceará, Brazil. In both farms, soil samples were collected under agroforestry systems (SAF), cultures at full sun (CPS) and secondary forest (MS). Forest area was used as a reference. With these samples are evaluated in the laboratory: total organic carbon, water dispersed clay, flocculation index, particles density, bulk density, porosity, soil saturated hydraulic conductivity, water retention curve, least limiting water range and stability of aggregates. Additionally, evaluate the resistance of penetration of the soil and the soil saturated hydraulic conductivity directly in the field. The SAFs promoted improvement in the physical quality of the soil, reflected by the reduction in the values of water dispersed clay, bulk density and resistance of penetration, as well as increasing the retention of water within the range available to the plants and least limiting water range. The systems evaluated in the Zona da Mata showed most significant answers to management adopted because your texture with more clay content and greater time of system adoption, compared with observed in the semi-arid area.

## ÍNDICE

	Página
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	5
2.1. Sistemas agroflorestais .....	5
2.2. Qualidade do solo .....	6
2.2.1. Indicadores de qualidade física do solo .....	7
2.2.1.1. Densidade do solo .....	8
2.2.1.2. Porosidade .....	9
2.2.1.3. Condutividade hidráulica do solo em meio saturado .....	10
2.2.1.4. Curva de retenção da água no solo .....	11
2.2.1.5. Resistência mecânica do solo à penetração .....	12
2.2.1.6. Intervalo hídrico ótimo .....	13
2.2.1.7. Estabilidade de agregados .....	14
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	16
3.1. Localização e descrição das áreas de estudo .....	16
3.2. Amostragem do solo .....	18
3.3. Caracterização química e mineralogia da fração argila .....	19
3.4. Carbono orgânico total .....	19
3.5. Indicadores físicos avaliados em laboratório .....	22
3.5.1. Composição granulométrica, argila dispersa em água, densidade de partículas e índice de floculação .....	22
3.5.2. Densidade, densidade máxima e densidade relativa do solo .....	22
3.5.3. Porosidade total, macro e microporosidade .....	23
3.5.4. Condutividade hidráulica do solo em meio saturado .....	24
3.5.5. Curva de retenção da água no solo .....	25
3.5.6. Intervalo hídrico ótimo .....	26
3.5.7. Estabilidade de agregados .....	27
3.6. Indicadores físicos avaliados a campo .....	28
3.6.1. Resistência mecânica do solo à penetração .....	28
3.6.2. Condutividade hidráulica do solo saturado a campo .....	29
3.7. Análises estatísticas .....	29
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	31
4.1. Carbono orgânico total .....	31
4.2. Composição granulométrica, argila dispersa em água, índice de floculação e densidade de partículas .....	34

4.3. Densidade, densidade máxima e densidade relativa do solo .....	38
4.4. Porosidade total, macro e microporosidade .....	43
4.5. Condutividade hidráulica do solo em meio saturado .....	46
4.6. Curva de retenção da água no solo .....	50
4.7. Resistência mecânica do solo à penetração .....	55
4.8. Intervalo hídrico ótimo .....	61
4.9. Estabilidade de agregados .....	65
5. CONCLUSÕES .....	71
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	72

## 1. INTRODUÇÃO

A qualidade do solo está relacionada com sua funcionalidade dentro dos ecossistemas naturais ou manejados e significa a capacidade deste em sustentar a atividade biológica, promover o crescimento e a saúde das plantas e animais, e manter a qualidade ambiental (Doran & Parkin, 1994). Esta capacidade resulta de interações entre inúmeros processos químicos, físicos e biológicos de natureza complexa (Tótolá & Chaer, 2002) e sofre alterações com o manejo (Reichert et al., 2003). O emprego de práticas não sustentáveis pode causar a degradação de sua qualidade física, química e biológica, diminuindo a qualidade do solo (Costa et al., 2003; Nunes, 2003), o que, muitas vezes pode ser de difícil reversão.

A perda da qualidade do solo, em seus aspectos químico, físico e biológico, provoca a redução da capacidade do solo em exercer suas funções diversas. A diminuição da qualidade química interfere nos teores de fósforo e nitrogênio, na matéria orgânica, na capacidade de troca catiônica e no pH do solo, enquanto que a perda da qualidade biológica produz efeitos negativos na atividade de enzimas no solo, na biomassa microbiana, no quociente metabólico e nas taxas de mineralização do nitrogênio (Tótolá & Chaer, 2002), com implicações diretas sobre desenvolvimento das plantas, assim como nas demais funções do solo. Quanto à perda da qualidade física, esta afeta diretamente o espaço poroso do solo, de forma a prejudicar o fornecimento de água e de oxigênio, limitando o desenvolvimento das plantas (Tormena et al., 1998) e a atividade de organismos no solo (Cortés-Tarrá et al., 2003; Leonardo, 2003). Mais especificamente, a deterioração da qualidade física do solo implica em condições desfavoráveis de estruturação do solo, com formação de agregados pouco estáveis, reduzida porosidade, elevada densidade (Islam & Weil, 2000; Nunes, 2003; Carvalho et al., 2004b), maior resistência à penetração de raízes (Martins et al., 2002; Carvalho et al., 2004b) e reduzida capacidade de retenção de

umidade (Tormena et al., 1998), resultando em condições que restringem o movimento da água e as trocas gasosas no perfil do solo, influenciando dessa forma, diversos processos fundamentais para que o solo exerça suas funções diversas.

Apesar da qualidade física do solo ser tema freqüente de vários estudos, são raros os trabalhos no mundo e, em especial, no Brasil, que tratem deste tema em solos sob Sistemas Agroflorestais (SAFs). Mesmos nos estudos em áreas sob manejo agroflorestal verifica-se maior freqüência de abordagem de aspectos de química, fertilidade e biologia do solo, carecendo-se de dados acerca da qualidade física do solo.

Os SAFs têm sido considerados como sistemas de manejo que buscam conservar as condições do solo o mais próximas das condições naturais. Nesses sistemas, busca-se maior equilíbrio do ecossistema manejado a partir do aumento da diversidade de espécies cultivadas, em que culturas tradicionais são consorciadas com componentes arbóreos e/ou animais, havendo um melhor aproveitamento dos componentes do agroecossistema, no tempo e no espaço (Nair, 1993). Por sua constituição, os SAFs possuem sistemas radiculares diversos que propiciam um contínuo aporte de matéria orgânica e condicionam favoravelmente o meio físico do solo, melhorando as condições de infiltração e retenção de água (FAO, 1995; Breman & Kessler, 1997). Neste sentido, Carvalho et al. (2004b) sugerem que solo sob sistema agroflorestal apresenta qualidade física superior, por favorecer menor densidade, maior porosidade, menor resistência à penetração e maior agregação.

Os SAFs constituem sistemas de produção adaptáveis a diferentes regiões, contribuindo para o estabelecimento de modelos de produção mais estáveis, podendo amenizar as adversidades encontradas pela agropecuária (FAO, 1995; Breman & Kessler, 1997), sendo recomendados como alternativa econômica, assim como na recuperação de solos degradados em diversas regiões do Brasil (Baggio, 1992; Dubois, 1992; Macedo, 1992; Wandelli et al., 1997; Peneireiro, 1999; Mendonça et al., 2001; Franco et al., 2002).

Na Zona da Mata de Minas Gerais, alguns agricultores, em parceria com o Centro de Tecnologias Alternativas da Zona da Mata (CTA-ZM) e a Universidade Federal de Viçosa (UFV), iniciaram em 1993 um processo de experimentação participativa com sistemas agroflorestais, principalmente, com a cultura do café (Cardoso et al., 2001). Estes SAFs foram conceituados pelos próprios agricultores

experimentadores (Souza, 2006) como sendo sistemas que possuem ao menos um estrato arbóreo diversificado, um estrato arbustivo (principalmente o café, podendo ter outras espécies) e um estrato herbáceo (podendo ser leguminosas introduzidas como adubação verde, vegetação espontânea ou mesmo alimentícia).

Os sistemas anteriormente descritos foram desenhados e redesenhados pelos próprios agricultores adaptando-os à sua realidade, em concordância com sua lógica e seu tempo. Recentemente essa experimentação foi sistematizada de forma participativa, e os dados sistematizados indicaram que, na comparação entre sistemas de café em monocultivo e em SAFs, a produção de café em alguns casos pode ser menor neste último, entretanto, seu retorno econômico é maior, devido o menor custo de produção e a maior oferta de outros produtos. A sistematização indicou também que a partir da implantação dos SAFs, o manejo das propriedades foi alterado, ocorrendo maior diversificação e integração entre os agroecossistemas, aumentando a relação custo/benefício da produção do café com reflexos no orçamento familiar. Estes sistemas foram considerados importantes também para o restabelecimento da paisagem da Zona da Mata, podendo ser integrados aos sistemas naturais preservados por exigência legal, como é o caso do Parque Estadual da Serra do Brigadeiro, localizado na região (Souza, 2006).

Em outra região do Brasil, no semi-árido do Ceará, desde 1989, alguns agricultores, em parceria com ESPLAR - Centro de Pesquisa e Assessoria cultivam suas lavouras com base agroecológica, que buscam a sustentabilidade ambiental, observando os processos que ocorrem na natureza, utilizando-se técnicas que favoreçam a ciclagem de nutrientes e a fertilidade (química, física e biológica) do solo (Sousa, 2006).

Dentre as práticas adotadas, os agricultores consorciavam milho, feijão e algodão e deixam árvores nativas crescerem junto aos consórcios, caracterizando um sistema agroflorestal. Os agricultores reconhecem a importância destas práticas para a preservação do meio ambiente, motivando-os a continuarem adotando estes sistemas. Dentre os benefícios ambientais, encontra-se a conservação e melhoria da qualidade do solo. Além da preservação do meio ambiente, a proposta interessa aos agricultores, pois permite aliar técnica, cultura e tradição, além do aumento da renda e da oportunidade de uma alimentação livre de agrotóxicos e, conseqüentemente, de melhoria na qualidade de vida (Sousa, 2006).

Sistemas que mantenham e/ou promovam a melhoria na qualidade do solo são de extrema relevância nas duas regiões, por motivos opostos, mas que em ambas podem dificultar, dependendo do manejo adotado, o desenvolvimento agrícola. Na Zona da Mata mineira ocorrem chuvas intensas, com alta capacidade erosiva e solos profundos, portanto muito intemperizados e lixiviados. A região semi-árida possui temperaturas elevadas, pluviosidade reduzida e solos pouco profundos, ou seja, menos intemperizados e menos lixiviados do que os solos da Zona da Mata. Alguns trabalhos desenvolvidos na região semi-árida (Alencar et al., 2004; Maia et al., 2004; Otutumi et al., 2004; Xavier et al., 2004) e na Zona da Mata (Mendonça et al., 2001; Franco et al., 2002) mostram que a adoção de sistemas que priorizam a biodiversidade e que promovam a proteção do solo, como por exemplo, os sistemas agroflorestais (SAFs), são capazes de manter a qualidade do solo em condições semelhantes e/ou melhores que a condição de solo sob vegetação natural.

No caso da região semi-árida, em particular, as características físicas do solo nessas áreas são consideradas mais limitantes à produção agrícola, em comparação com as características químicas (Sousa, 2006). No caso da Zona da Mata a manutenção da qualidade física pode garantir o bom desenvolvimento da atividade biológica, contribuindo para melhorar a ciclagem dos nutrientes.

O presente projeto parte da hipótese de que o manejo agroflorestal melhora a qualidade física do solo, em ambas as regiões, melhorando a estrutura e, conseqüentemente, a densidade, capacidade de infiltração e retenção de umidade e favorecendo a penetração das raízes. As alterações destas características podem servir como indicadores de qualidade do solo.

Desta forma, o objetivo geral deste trabalho foi avaliar a qualidade física de solos em áreas manejadas com sistemas agroflorestais (SAFs) e em cultivos a pleno sol, comparando-os com solos sob mata. Especificamente, avaliou-se a estabilidade de agregados, densidade do solo, resistência do solo à penetração, porosidade, condutividade hidráulica e retenção de água do solo, além de se estimar o intervalo hídrico ótimo (IHO) nos diferentes sistemas estudados.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Sistemas agroflorestais**

As práticas agrícolas adotadas na agricultura convencional muitas vezes ocasionam diminuição contínua da qualidade do solo, resultando em baixas produtividades. Diante desta constatação, verifica-se uma crescente busca por agroecossistemas capazes de conservar os recursos naturais, dentre estes, o solo. Neste contexto, os sistemas agroflorestais (SAFs) têm se mostrado uma alternativa viável para amenizar os danos causados pela agricultura convencional, recuperando e/ou mantendo a qualidade ambiental e as vantagens econômicas do agroecossistema (Alegre & Cassel, 1996; Jackson & Wallace, 2000; Hairiah et al., 2006; Jianbo, 2006).

Sistemas agroflorestais ou agroflorestas (SAFs) podem ser definidos como sendo uma forma de múltiplos cultivos que sejam compostos de, pelo menos, uma espécie destinada a produção agrícola (anual ou perene) e uma espécie arbórea, interagindo biologicamente (Somarriba, 1992). De um modo geral, os SAFs são utilizados com alguns dos seguintes objetivos: diversificação da produção, diminuindo os efeitos da sazonalidade, incremento dos níveis da matéria orgânica no solo, fixação biológica do nitrogênio atmosférico, ciclagem de nutrientes, modificação do microclima e otimização do sistema de produção, tendo em vista o conceito de produção sustentável (Somarriba, 1992). Segundo a FAO (1995), os SAFs são considerados, ainda, como estimulantes à sustentabilidade ambiental por favorecerem a preservação da fauna e da flora, a fixação biológica de nitrogênio e a ciclagem de nutrientes. Maia et al. (2004) consideram que a adoção desses sistemas em solos anteriormente cultivados sob manejo não conservacionista, pode resultar no estabelecimento de um novo estado de equilíbrio no ambiente solo, observado pela

melhoria de indicadores biológicos. Além disso, a implantação de SAFs pode transformar de forma benéfica a vegetação da área utilizada, melhorando a qualidade da serapilheira, fertilidade do solo e favorecendo os estágios sucessivamente mais avançados da macrofauna edáfica, com predomínio de saprófitas (Peneireiro, 1999).

Os SAFs dirigidos por sucessão natural representam sistemas de produção capazes de recuperar áreas degradadas, aliando produção à conservação, recuperação, manutenção, ou ainda, melhoria da qualidade dos recursos naturais (Peneireiro, 1999). Por proporcionarem um aumento na espessura da camada de liteira, os SAFs favorecem a presença de minhocas que promovem a construção de galerias, proporcionando incremento na macroporosidade e redução da densidade do solo (Hairiah et al., 2006).

Em regiões semi-áridas, onde a baixa disponibilidade de água é um dos principais fatores limitantes da produção agrícola, os SAFs podem amenizar os efeitos da evaporação através dos resíduos vegetais depositados na superfície do solo, mantendo a umidade do solo, em níveis mais elevados por um maior período de tempo (Kinama et al., 2005).

## **2.2. Qualidade do solo**

O entendimento da qualidade do solo é fundamental tendo em vista a necessidade de adoção de estratégias para um manejo sustentável dos diversos sistemas de produção (Sans, 2000; Tótola & Chaer, 2002), um objetivo muito almejado nos dias atuais. A qualidade do solo refere-se às condições ótimas para que o solo funcione adequadamente. O funcionamento do solo depende da interação de processos químicos, físicos e biológicos, que mantêm um fluxo constante e uma natureza heterogênea (Tótola & Chaer, 2002). Desta forma, inferir sobre qualidade do solo de forma numérica torna-se uma tarefa difícil, entretanto, estimativas sobre a qualidade do solo podem ser feitas dentro de um marco referencial (Reichert et al., 2003).

As funções que o solo pode exercer na natureza são a de promover meio para o crescimento das plantas; regular e compartimentalizar o fluxo de água no ambiente;

estocar e promover a ciclagem de elementos na biosfera e atuar como um tampão ambiental (Larson & Pierce, 1994).

A qualidade física do solo descreve como o solo permite a infiltração, retenção e disponibilidade de água às plantas, córregos e subsuperfície, responde ao manejo e resiste à degradação, permite as trocas de calor e de gases com a atmosfera e raízes das plantas, e permite o crescimento das raízes (Reichert et al., 2003).

Tendo em vista que a qualidade do solo envolve uma combinação de propriedades físicas, químicas e biológicas que fornecem meios para o funcionamento do solo, o monitoramento adequado da qualidade do solo só poderá ser feito utilizando-se propriedades e/ou atributos que reflitam a capacidade de produção do solo e a sua sustentabilidade. Para isso é necessário definir as funções do solo e identificar as propriedades e/ou atributos associados a estas (Doran & Parkin, 1994). Estas propriedades ou atributos devem representar indicadores capazes de mostrar mudanças ocorridas na qualidade do solo, refletindo alterações da sua condição frente ao uso da terra e sistemas de manejo.

Para ser de utilidade prática, os indicadores de qualidade devem ser sensíveis às variações de manejo, correlacionar-se com as funções do solo, ser de fácil mensuração e de baixo custo; que possibilitem o entendimento dos processos do ecossistema e que sejam compreensíveis e úteis para o agricultor (Doran & Zeiss, 2000).

### **2.2.1. Indicadores de qualidade física do solo**

A estrutura do solo é um dos indicadores mais importantes para o crescimento das plantas, uma vez que influi diretamente nas condições de adensamento, compactação, encrostamento, infiltração de água e suscetibilidade do solo à erosão (Campos et al., 1995).

A estrutura pode ser avaliada por meio da densidade do solo, macro e microporosidade, estabilidade de agregados, resistência à penetração e infiltração da água no solo. Estes indicam o efeito do manejo, sendo de fácil mensuração, com respostas rápidas e de razoável precisão (Campos et al., 1995; Doran, 1997).

Em monocultivo de café na Zona da Mata mineira, a densidade do solo, a argila dispersa em água, a macroporosidade e a estabilidade de agregados mostraram-se sensíveis para avaliar mudanças na qualidade do solo, podendo estas, serem priorizadas como indicadores físicos de qualidade do solo (Nunes, 2003).

A matéria orgânica, que se relaciona com inúmeras propriedades do solo, também é considerada um dos melhores indicadores de qualidade do solo (Reichert et al., 2003). Com respeito à sua ação sobre as propriedades físicas do solo, ela exerce influência direta sobre a agregação e, indiretamente, sobre as demais propriedades físicas do solo (Bayer & Mielniczuk, 1999).

A própria curva de retenção de água no solo pode ser considerada um indicador que pode ser usado na avaliação da qualidade do solo, por estar relacionada com as funções do solo de retenção e transporte de água (Doran & Parkin, 1994). Mais recentemente o índice S, um fator associado à curva de retenção, tem sido também utilizado em estudos de qualidade do solo.

Outros autores destacam o intervalo hídrico ótimo (IHO) como indicador de alterações nas propriedades físicas do solo, uma vez que este integra em um único parâmetro 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 et al., 2004), podendo ser usado como índice integrador de qualidade física do solo (Reichert et al., 2003).

#### **2.2.1.1. Densidade do solo**

A densidade do solo ( $D_s$ ) relaciona-se com a estrutura, uma vez que esta é função do arranjo e orientação das partículas do solo, assim como da quantidade e geometria dos espaços porosos.

Além das estrutura, a textura do solo também estar relacionada com a densidade do solo, sendo observado maiores valores para solos arenosos, nos quais são frequentemente observados valores entre 1,35 a 1,85 kg dm<sup>-3</sup> (Araújo et al., 2004a), enquanto nos solos argilosos esta se apresenta na faixa de 0,95 a 1,25 kg dm<sup>-3</sup> (Araújo et al., 2004b; Tormena et al., 1998). Os menores valores observados para

os solos argilosos podem ser decorrentes da microagregação das partículas de argila, que aumenta a porosidade intra-agregado, diminuindo a densidade (Klein, 2005). Já os solos arenosos apresentam maiores valores de densidade devido ao maior peso específico das partículas de quartzo que compõem a fração areia e ao menor teor de matéria orgânica comumente verificada nestes solos.

Tendo em vista as variações da densidade, em especial aquelas decorrentes da textura, esta isoladamente não constitui um adequado indicador da qualidade física do solo, devendo ser associada com outras propriedades e características do solo ou ainda referenciada com valores de densidade máxima ( $D_m$ ) que o solo pode atingir, obtendo-se assim o que se denomina de valor de densidade relativa ( $D_r$ ), que é dada pela divisão da densidade do solo ( $D_s$ ) pela densidade máxima ( $D_m$ ) que este solo pode atingir ( $D_r = D_s/D_m$ ).

A densidade máxima do solo pode ser obtida por meio do teste de Proctor normal, e ocorre quando o solo encontra-se em um determinado teor de umidade, usualmente denominado como umidade ótima para compactação. Valores de densidade relativa variando entre 0,72 e 0,84 são citados na literatura como representando condições ótimas ao desenvolvimento das plantas (Klein, 2002). Já 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 (Ferrerias et al., 2001).

#### **2.2.1.2. Porosidade**

A porosidade do solo é reflexo direto da estrutura e textura do solo, sendo os poros determinados pelo arranjo e geometria das partículas, diferindo quanto à forma, comprimento, largura e tortuosidade. O estudo dos poros é usualmente realizado baseando-se no diâmetro dos poros, distinguindo-se macro e microporos do solo, aos quais são associados os ambientes onde ocorrerão os processos de aeração e drenagem, para os primeiros e, de retenção de água, para os últimos.

Solos arenosos, por possuírem partículas maiores, apresentam espaço poroso constituído por poros de maior diâmetro (macroporos), por outro lado o volume total de poros é menor nestes solos quando comparados aos de textura argilosa, onde a

formação de microagregados pelas partículas de argila aumenta a microporosidade (Klein, 2005).

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

A porosidade reflete o efeito do manejo do solo, podendo sofrer alteração na referida relação macro e microporosidade, tendo em vista a freqüente redução dos poros de maior diâmetro verificada com o uso do solo, que ocorre devido a quebra de agregados e conseqüente entupimento de poros.

### **2.2.1.3. Condutividade hidráulica do solo em meio saturado**

A condutividade hidráulica do solo determina o fluxo de água no solo, sendo dependente de propriedades do solo como distribuição de tamanho e forma das partículas, tortuosidade, superfície específica e porosidade. Estas apresentam reflexo na geometria porosa dos solos (Libardi, 2005).

A condutividade hidráulica apresenta valores mais elevados quanto mais poroso, fraturado ou agregado for o solo, sendo menor em solos densos e compactos. No entanto, ela não depende unicamente da porosidade total do solo, mas, em especial das dimensões destes e da atividade das argilas que o formam (Reichardt & Timm, 2004). É amplamente aceito que em solos arenosos, apesar de apresentarem menor porosidade total, a condutividade hidráulica seja maior do que em solos argilosos, muito embora existam citações de trabalhos que indiquem uma relação inversa entre conteúdo de areia e condutividade hidráulica (Jarvis & Messing, 1995). Solos muito argilosos e altamente agregados resultam em uma estrutura mais porosa capaz de permitir maiores valores de condutividade hidráulica. Neste sentido, a

interação entre textura e estrutura dos solos é que vai determinar o comportamento da condutividade hidráulica do solo (Carvalho et al., 2004a).

Em meio saturado, quando todos os poros estão totalmente preenchidos por água, a condutividade hidráulica é máxima, decrescendo à medida que o solo perde umidade (Libardi, 2005). A condutividade hidráulica do solo saturado pode ser obtida tanto em laboratório quanto em campo, sendo o método mais utilizado para sua determinação o do permeâmetro de carga constante. A determinação da condutividade hidráulica em campo pode ser vantajosa por apresentar uma aproximação das condições reais, podendo diminuir a incidência de erros, em comparação à determinação em laboratório. Porém a determinação em campo é associada uma maior variabilidade de resultados, além disso, a determinação executada em laboratório exige menor esforço físico, além de ser relativamente mais prática e rápida (Carvalho et al., 2004).

Uma das formas de estimar a condutividade em campo é utilizando o permeâmetro de Guelph, um permeâmetro de carga hidráulica constante. Este, apesar de ser pouco usado, apresenta como vantagens a leveza do aparelho, a facilidade de poder ser operado por no mínimo duas pessoas, a rapidez dos ensaios e a pouca quantidade de água exigida por ensaio.

#### **2.2.1.4. Curva de retenção de água no solo e índice S**

Os solos argilosos, por possuírem maior quantidade de material coloidal, maior espaço poroso, principalmente, poros de menores diâmetros e maior superfície adsortiva, possuem maior capacidade de reter água, em relação aos solos arenosos. Desta forma, solos de textura argilosa retêm mais umidade em toda a faixa de potencial comumente avaliada.

Por outro lado, solos mais intemperizados, mesmo com elevada proporção de argila, podem apresentar capacidade de retenção de água na faixa disponível às plantas relativamente menor, devido à sua alta porosidade e excessiva drenagem. Os Latossolos que apresentam baixa capacidade de armazenamento de água para as plantas, podem ter esta propriedade incrementada à medida que se eleva a densidade

do solo pela transformação de parte dos macroporos em microporos (Oliveira et al., 2004).

Segundo Dexter (2004), o valor da inclinação da curva de retenção de água em seu ponto de inflexão, ou seja, onde o ponto de curvatura é zero, é indicador de qualidade do solo. Este valor é considerado como o índice S. Quanto menor for o valor de S menor será a inclinação da curva de retenção de água no solo, correspondendo a um solo desestruturado (Machado, 2006). Por ser baseado na curva de retenção, o índice S reflete mudanças ocorridas no solo quanto à sua densidade e teor de matéria orgânica. Considera-se que valores de S superiores a 0,030 são adequados ao crescimento de raízes (Dexter, 2004).

#### **2.2.1.5. Resistência mecânica do solo à penetração**

A resistência mecânica do solo à penetração tenta representar a força que as raízes das plantas devem exercer para romper o solo. Esta é influenciada diretamente pela densidade do solo, proporcionando um indicativo do estado de compactação do solo, sendo variável com o conteúdo de umidade, textura e estrutura do solo. A resistência à penetração mostra-se útil na avaliação da qualidade física do solo por permitir a identificação de valores potencialmente limitantes ao crescimento das raízes, além de possibilitar o estabelecimento de valores críticos de umidade e de densidade do solo (Imhoff et al., 2000).

O valor de resistência à penetração de 2,0 MPa tem sido o mais indicado na literatura como impeditivo ao desenvolvimento do sistema radicular da maioria das culturas (Taylor et al., 1966; Tormena et al., 1998, 1999). No entanto há indicações de culturas que se desenvolvem normalmente até valores superiores a 3,0 MPa (Beuther & Centurion, 2003), assim como há plantas que já sofrem limitações em valores de 1,4 MPa (Foloni et al., 2003). Vale destacar que plantas nativas intrínsecas de regiões onde predominam solos naturalmente endurecidos podem suportar valores bem mais expressivos que os citados anteriormente, uma vez que estas possuem adaptações que garantem seu desenvolvimento.

O uso agrícola do solo pode provocar alterações na resistência do solo à penetração, modificando-a de forma negativa, devido a degradação da estrutura do

solo. Desta forma, solos cultivados ou pastejados, em geral, apresentam maior resistência à penetração quando comparados com solos sob vegetação natural.

#### **2.2.1.6. Intervalo hídrico ótimo**

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é um índice que está diretamente relacionado à estrutura do solo, integrando condições do solo relacionadas ao crescimento das plantas. O crescimento das plantas nos diferentes estágios de desenvolvimento é afetado diretamente pelo conteúdo de água e oxigênio e pela resistência do solo à penetração de raízes. As plantas demandam oxigênio e água para seu crescimento, no entanto, a saturação em água e a aeração são inversamente proporcionais, ou seja, excesso de água pode resultar em taxa de difusão e conteúdo de oxigênio reduzidos. Além disso, o teor de água controla, juntamente como densidade e textura, a resistência que o solo irá exercer à penetração das raízes. Assim, o aumento no teor de água reduz a aeração e a resistência do solo à penetração. A dinâmica destes fatores provoca interações que regulam o crescimento e funcionamento das raízes (Reichert et al., 2003), sendo necessário o entendimento de suas relações. Desta forma, o IHO procura delimitar a faixa de umidade não limitante ao crescimento das plantas, relacionando aeração, resistência à penetração, densidade do solo e água disponível, representando uma ferramenta indicativa de qualidade do solo.

Por integrar em um só índice os fatores físicos diretamente relacionados com o desenvolvimento das plantas, o IHO é considerado um índice de qualidade estrutural do solo (Reichert et al., 2003). Este é delimitado em seu limite superior pela umidade na capacidade de campo e/ou pela umidade em que a porosidade de aeração do solo seja maior ou igual a 10%. Seu limite inferior é delimitado pela umidade no ponto de murcha permanente e/ou pela umidade em que a resistência do solo à penetração atinja valores impeditivos ao crescimento das plantas. A faixa de umidade não limitante ao crescimento das plantas, delimitada pelo IHO, é reduzida à medida que a densidade do solo aumenta (Silva & Kay, 1997), uma vez que o aumento desta diminui a porosidade de aeração e aumenta a resistência à penetração, em consequência da degradação da estrutura do solo.

O IHO correlaciona-se positivamente com a matéria orgânica do solo (Kay et al., 1997). Desta forma, práticas agrícolas que reduzem o teor de matéria orgânica levam à uma redução na faixa de água ótima ao desenvolvimento das plantas. Portanto, a adoção de práticas de manejo que aportem resíduos vegetais ao solo pode reduzir os prejuízos causados à estrutura do solo, favorecendo o IHO (Leão et al., 2004).

#### **2.2.1.7. Estabilidade de agregados**

A estabilidade dos agregados varia com as características inerentes ao solo e com os sistemas de manejo. Solos que sofreram intenso revolvimento provocam a quebra de agregados, podendo reduzir drasticamente a estabilidade de agregados. Com o rompimento dos agregados, a matéria orgânica que estava em seu interior é desprotegida, acelerando seu processo de decomposição, diminuindo cada vez mais a resistência destes agregados.

A formação e estabilização de macroagregados são observadas em solos com maior teor de matéria orgânica, visto que esta representa um eficiente agente cimentante, já que forma ligações, por meio de cátions polivalentes, de seus polímeros com as superfícies inorgânicas do solo (Tisdall & Oades, 1982). Desta forma, sistemas que promovam aporte de matéria orgânica e reduzam ou eliminem o revolvimento do solo favorecem a formação e estabilidade de agregados, proporcionando o predomínio de agregados maiores que 2,0 mm (macroagregados).

Na avaliação da estabilidade de agregados são utilizados alguns índices, como diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e o índice de estabilidade de agregados (IEA), propostos por Kemper & Chepil (1965). O DMP é tanto maior quanto maior for a percentagem de agregados grandes, e demonstra a estabilidade da estrutura frente à ação de desagregação da água, podendo indicar o grau de susceptibilidade do solo à erosão hídrica (Castro Filho et al., 1998; Bertol et al., 2004). O DMG representa uma estimativa do tamanho dos agregados de maior ocorrência. O IEA denota uma medida de agregação total do solo e não considera a distribuição por classes de agregados. Quanto menor for a quantidade de agregados de menor diâmetro maior será o IEA.

Um adequado estado de agregação irá promover boas condições de aeração do solo, suprimento de nutrientes, resistência mecânica do solo à penetração, retenção e armazenamento de água e bom desenvolvimento radicular, sendo de grande importância para a produtividade das culturas.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Localização e descrição das áreas de estudo

O presente trabalho foi desenvolvido em duas propriedades de agricultura familiar, localizadas na Zona da Mata de Minas Gerais (domínio da Mata Atlântica) e no Semi-árido do Ceará (domínio da Caatinga).

Na Zona da Mata mineira o estudo foi desenvolvido em uma área de produção de café, assessorada pelo Centro de Tecnologias Alternativas da Zona da Mata (CTA-ZM). A propriedade situa-se em Araponga, município localizado no sudeste de Minas Gerais. A temperatura média da região é de 18 °C, a precipitação anual varia de 1.200 a 1.800 mm, com um período seco de 2 a 4 meses entre junho e setembro. O relevo regional é montanhoso, com declividade variando de 20 a 45 % nas encostas e altitudes de 900 a 1.800 m (Engevix, 1995). A propriedade avaliada encontra-se nas coordenadas 20°41' S e 42°31' W. O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Amarelo de textura argilosa.

Nesta propriedade foram avaliados solos sob três tipos de uso: cultivo do café (*Coffea arabica*) a pleno sol (CPS<sub>A</sub>), cultivo do café em sistema agroflorestal (SAF<sub>A</sub>) e mata secundária (MS<sub>A</sub>), sendo este último utilizado como referência. A área de mata é constituída de uma formação secundária de Mata Atlântica.

Os cultivos de café (CPS<sub>A</sub> e SAF<sub>A</sub>) foram implantados em uma área anteriormente degradada pelos cultivos sucessivos de pastagem, milho, arroz e feijão. Após 7 anos de cultivos de arroz, o solo estava com a fertilidade reduzida, dificultando o desenvolvimento adequado das culturas. Então, com objetivo de cobrir o solo, foram plantados capim-napier (*Pennisetum purpureum* Schum. cv. Napier), uva-do-japão (*Hovenia dulcis*) e o sobrasil (*Colubrina glandulosa*) e, em parte da

área, mudas de ingá (*Inga sessilis e Inga subnuda*). Após três anos o solo foi adubado com 100 a 150 g m<sup>-2</sup> de NPK (4-18-8) e teve a acidez corrigida. O plantio de café foi então efetuado, em espaçamento de 3,0 x 1,0 m. Para o estabelecimento do café retirou-se o capim e as demais espécies, ficando apenas as árvores de ingá, distribuídas aleatoriamente na parte onde estas haviam sido plantadas. Atualmente, na área denominada SAF<sub>A</sub>, o café é cultivado sob o ingá há 13 anos. A área recebe uma aplicação anual de calcário (em menor quantidade do que a área CPS<sub>A</sub>) e duas de Supermagro. Apresenta pouca incidência de espécies espontâneas, sendo desnecessária a prática de capinas.

Na área de cultivo a pleno sol (CPS<sub>A</sub>), o cafezal vem sendo manejado, também há 13 anos, sendo anualmente aplicado de 150 a 200 g planta<sup>-1</sup> de NPK (20-5-20), calcário e Supermagro, duas vezes ao ano. O controle das espécies espontâneas é feito por meio de roçagem, sendo o material resultante depositado sobre a superfície do solo.

No semi-árido cearense o estudo foi desenvolvido em uma área de produção de milho (*Zea mays*), feijão (*Vigna unguiculata*) e algodão, assessorada pelo ESPLAR - Centro de Pesquisa e Assessoria. A propriedade localiza-se no município de Choró. A temperatura média anual do município é de 27 °C, a precipitação média anual é de 992 mm (IPECE, 2004). A propriedade onde foi desenvolvido o estudo situa-se nas coordenadas 4°50' S e 39°08' W. O solo destas áreas foi classificado como Argissolo Vermelho Amarelo Eutrófico abrupto, de textura arenosa.

Na propriedade selecionada foram avaliados solos sob três tipos de uso: consórcio de milho, feijão e algodão a pleno sol (CPS<sub>C</sub>), consórcio de milho, feijão e algodão sob sistema agroflorestal (SAF<sub>C</sub>) e mata secundária (MS<sub>C</sub>), sendo este último utilizado como referência. A área de mata é constituída de uma formação secundária de Caatinga arbórea arbustiva.

A implantação dos sistemas de cultivo foi feita em uma área originalmente com capoeira, que teve sua vegetação desmatada e queimada no ano de 2001.

O sistema agroflorestal (SAF<sub>C</sub>) é composto, atualmente, por um extrato arbóreo formado por espécies nativas da caatinga, sendo realizado o cultivo em consórcio de milho e feijão, cultivados durante o período chuvoso. A utilização das árvores (SAF) vem sendo empregada há, aproximadamente, quatro anos, quando se

permitiu que a regeneração natural ocorresse. As árvores estão dispostas aleatoriamente na área, sendo representadas principalmente pelas espécies aroeira (*Myracrodruon urundruva*), sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia*), umburana (*Amburana cearensis*) e outras. O manejo das plantas espontâneas é realizado pela capina com enxada manual, sendo feito um enleiramento do material proveniente desta capina de 5 em 5 metros. Não é realizada nenhuma adubação ou correção química no solo desta área.

Na área do consórcio a pleno sol (CPS<sub>C</sub>), o plantio das culturas milho e feijão é realizado a cada ano durante o período chuvoso no meio das fileiras de algodão, que foi plantado em 2003 em fileiras a cada 5,0 x 1,0 m. O manejo das plantas espontâneas é o mesmo descrito para a área anterior. Nesta área, também, não é realizada nenhuma adubação ou correção química no solo.

### **3.2. Amostragem do solo**

Para a caracterização e avaliação da qualidade física do solo, foram coletadas amostras de solo em cada uso (MS<sub>A</sub>, SAF<sub>A</sub>, CPS<sub>A</sub>, MS<sub>C</sub>, SAF<sub>C</sub> e CPS<sub>C</sub>). Em cada uma dessas áreas, representando os diferentes usos avaliados nos dois municípios, foram delimitadas de forma aleatória quatro subáreas (consideradas repetições), de aproximadamente 30 m<sup>2</sup>. Em cada subárea, três camadas foram amostradas (entre linha): 0 a 10, 10 a 20 e 20 a 40 cm de profundidade. Para cada camada, três amostras deformadas foram obtidas que, depois de homogeneizadas, compuseram uma amostra composta. Desta forma, considerando as duas regiões, os três usos de cada uma, as quatro subáreas em cada uso e as três profundidades, foram coletadas 72 amostras compostas, nas quais foram determinadas composição granulométrica, argila dispersa em água, densidade de partículas, estabilidade de agregados, análise química de rotina e carbono orgânico total. Na camada de 0 a 10 cm de cada subárea foram coletadas (entre linha) quatro amostras deformadas que, uma vez homogeneizadas, compuseram uma amostra composta de, aproximadamente, 18 kg para o ensaio de Proctor.

Amostras indeformadas foram obtidas em anéis volumétricos de 5 cm de diâmetro e 5 cm de altura, utilizando-se um amostrador tipo Uhland. Essas amostras

foram coletadas nas entre linhas de plantio em cada subárea descrita anteriormente, nas camadas de 5 a 10, 15 a 20 e 35 a 40 cm de profundidade. Desta forma, considerando as duas regiões, os três usos de cada uma, as quatro subáreas em cada uso e as três camadas, foram obtidas 72 amostras indeformadas, que foram destinadas à determinação de densidade do solo, condutividade hidráulica e microporosidade.

Para fins de determinação do intervalo hídrico ótimo (IHO), em cada um dos três usos em cada município, foram coletadas, na camada de 0 a 10 cm de profundidade, 40 amostras indeformadas (dez em cada subárea) em anéis semelhantes aos já descritos anteriormente. Estas amostras foram coletadas tanto na linha como nas entre linha de cultivo, a fim de se obter maior variação na densidade do solo. Considerando as duas regiões e os três usos em cada uma, foram coletadas 240 amostras indeformadas para a o IHO.

### **3.3. Caracterização química e mineralógica da fração argila**

As características químicas e mineralógicas dos solos estudados, nas duas regiões, encontram-se nos quadros 1 e 2 e na figura 1.

### **3.4. Carbono orgânico total**

O carbono orgânico total (COT) foi quantificado por oxidação da matéria orgânica via úmida com  $K_2Cr_2O_7$   $0,167 \text{ mol L}^{-1}$  em meio sulfúrico com aquecimento externo (Yeomans & Bremner, 1988).

Quadro 1 - Características químicas dos solos sob mata secundária e sob os diferentes sistemas de manejo, município de Araponga, MG<sup>1</sup>

Uso	pH H <sub>2</sub> O	P	K	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H + Al	T	V	m	P <sub>rem</sub>
	-- mg dm <sup>-3</sup> --			----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			----- % -----		mg L <sup>-1</sup>		
0-10 cm											
<b>MAS</b>	4,84	3,2	40,8	0,03	0,07	0,85	17,5	17,7	1,1	81,1	14,8
<b>SAF<sub>A</sub></b>	5,62	4,8	117,5	2,77	0,57	0,00	8,5	12,2	29,8	0,0	23,0
<b>CPS<sub>A</sub></b>	6,15	7,9	99,8	3,52	0,61	0,00	6,7	11,0	39,7	0,0	26,1
10-20 cm											
<b>MAS</b>	4,96	2,0	25,5	0,00	0,03	0,65	14,7	14,8	0,7	86,9	12,8
<b>SAF<sub>A</sub></b>	5,32	2,1	109,0	0,59	0,19	0,36	11,1	12,1	8,0	31,9	18,8
<b>CPS<sub>A</sub></b>	5,26	1,9	86,3	0,48	0,14	0,48	9,7	10,6	8,0	37,6	18,0
20-40 cm											
<b>MAS</b>	5,16	1,2	17,8	0,01	0,02	0,45	10,7	10,8	0,7	85,3	12,8
<b>SAF<sub>A</sub></b>	5,13	1,2	56,8	0,24	0,11	0,42	9,8	10,3	5,0	47,3	14,3
<b>CPS<sub>A</sub></b>	5,33	3,8	61,5	0,36	0,11	0,40	7,5	8,1	7,8	39,4	14,2

<sup>1</sup>(pH: 1:2,5; H+Al: Extrator com Ca(OAc)<sub>2</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> pH 7,0; Ca, Mg e Al Extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; K e P Extrator Mehlich-1(Defelipo & Ribeiro, 1981); P<sub>rem</sub> (Alvarez V. et al., 2000)); T: capacidade de troca catiônica total; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; P<sub>rem</sub>: fósforo remanescente; MS<sub>A</sub>: mata secundária; SAF<sub>A</sub>: sistema agroflorestal; CPS<sub>A</sub>: cultivo a pleno sol; A: Araponga.

Quadro 2 - Características químicas dos solos sob mata secundária e sob os diferentes sistemas de manejo, no município de Choró, CE<sup>1</sup>

Uso	pH H <sub>2</sub> O	P	K	Na	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Al <sup>3+</sup>	H + Al	T	V	P <sub>rem</sub>
	----- mg dm <sup>-3</sup> -----				----- cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> -----			----- % -----		mg L <sup>-1</sup>	
0-10 cm											
<b>MS<sub>C</sub></b>	6,32	5,6	117,5	10	2,06	0,35	0,00	2,8	5,5	49,2	54,6
<b>SAF<sub>C</sub></b>	6,42	3,6	80,0	14	2,57	0,36	0,00	3,0	6,1	50,2	52,6
<b>CPS<sub>C</sub></b>	6,47	2,7	76,5	12	1,70	0,20	0,00	2,5	4,6	45,6	56,5
10-20 cm											
<b>MS<sub>C</sub></b>	6,52	1,9	68,5	13	1,42	0,25	0,00	2,4	4,2	43,2	55,4
<b>SAF<sub>C</sub></b>	6,51	1,4	51,5	16	2,01	0,41	0,00	2,9	5,4	45,0	50,3
<b>CPS<sub>C</sub></b>	6,61	0,7	56,0	14	1,13	0,26	0,00	2,3	3,8	40,0	52,4
20-40 cm											
<b>MS<sub>C</sub></b>	6,44	2,4	68,8	12	1,64	0,48	0,00	3,0	5,3	43,5	49,3
<b>SAF<sub>C</sub></b>	6,30	1,0	47,0	20	1,81	0,55	0,00	3,1	5,6	44,1	48,7
<b>CPS<sub>C</sub></b>	6,73	0,9	55,5	16	1,15	0,42	0,00	2,4	4,1	41,6	53,3

<sup>1</sup>(pH: 1:2,5; H+Al: Extrator com Ca(OAc)<sub>2</sub> 0,5 mol L<sup>-1</sup> pH 7,0; Ca, Mg e Al Extrator KCl 1 mol L<sup>-1</sup>; K e P Extrator Mehlich-1(Defelipo & Ribeiro, 1981); P<sub>rem</sub> (Alvarez V. et al., 2000)); T: capacidade de troca catiônica total; V: saturação por bases; m: saturação por alumínio; P<sub>rem</sub>: fósforo remanescente; MS<sub>C</sub>: mata secundária; SAF<sub>C</sub>: sistema agroflorestal; CPS<sub>C</sub>: consórcio a pleno sol; C: Choró.

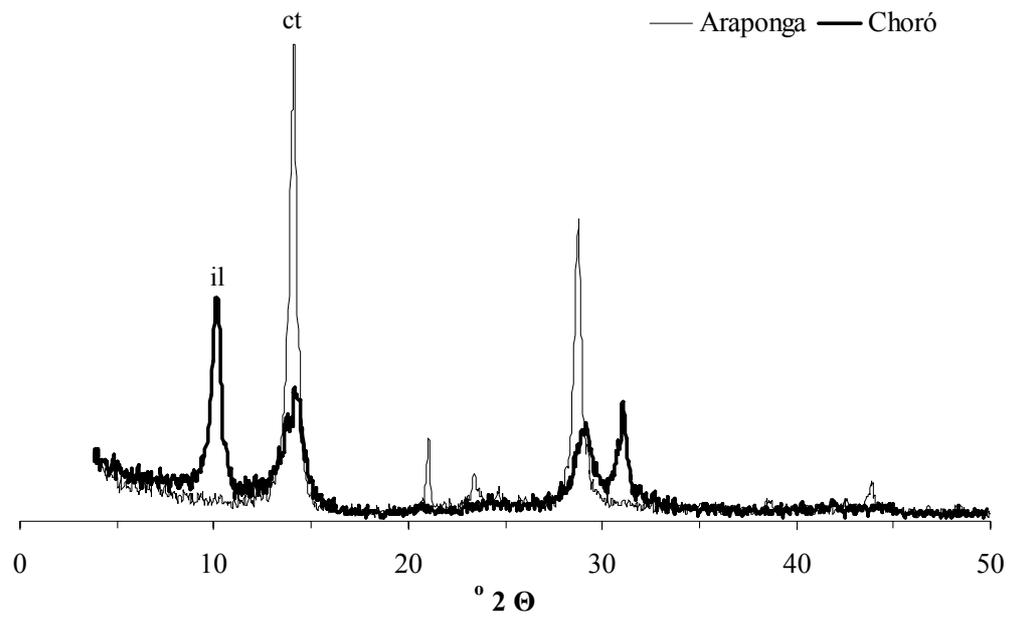


Figura 1 – Difratoograma de raios-X da fração argila dos solos estudados em Araponga (MG) e Choró (CE). il: illita; ct: caulinita ( $K_{\alpha}$  Co)

**B**

### **3.5. Indicadores físicos avaliados em laboratório**

#### **3.5.1. Composição granulométrica, argila dispersa em água, densidade de partículas e grau de flocação**

A análise textural 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 a  $0,1 \text{ mol L}^{-1}$  (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).

A argila dispersa em água (ADA) foi determinada seguindo metodologia descrita para análise granulométrica, com agitação rápida (12.000 rpm por 15 minutos) e suprimindo-se o uso do dispersante químico (EMBRAPA, 1997).

A densidade de partículas do solo ( $D_p$ ) foi obtida segundo o método do balão volumétrico, utilizando-se álcool como líquido penetrante (EMBRAPA, 1997).

O grau de flocação (GF) foi calculado utilizando-se a equação 1, conforme EMBRAPA (1997).

$$GF = \left( \frac{\text{argila} - ADA}{\text{argila}} \right) \cdot 100 \quad (1)$$

#### **3.5.2. Densidade, densidade máxima e densidade relativa do solo.**

Para a determinação de densidade do solo ( $D_s$ ) foi utilizado o método do anel volumétrico (EMBRAPA, 1997), com as amostras indeformadas coletadas nos anéis cilíndricos anteriormente descritos.

A densidade máxima do solo ( $D_m$ ) foi obtida a partir do ensaio de Proctor normal, no ponto de umidade ótima para compactação, seguindo procedimentos descrito na Norma Técnica ABNT/NBR 7182/86 (ABNT, 1986). Resumidamente, o solo foi inicialmente peneirado em peneira de 4,8 mm, sendo determinado sua

umidade residual. Posteriormente, foram preparadas cinco ou seis amostras de 2,5 kg cada uma. Em uma destas amostras foi-se adicionando volumes de água conhecidos até que fosse possível moldurar o solo com a mão. Considerou-se que este era o ponto onde a umidade é ótima para a compactação. Nas demais amostras foram acrescentadas água buscando-se atingir umidades aproximadamente 4 e 2% a menos e a mais do que o conteúdo de água considerado como ótimo para compactação. Após umedecidas as amostras foram compactadas no cilindro de Proctor.

Para cada amostra, inicialmente um volume de 1/3 da altura do cilindro era preenchido com solo que, na seqüência, recebia 25 golpes do soquete. Em seguida, mais 1/3 da altura era preenchido e compactado. E finalmente, o último terço do cilindro recebia mais um 1/3 de sua altura em solo, que na seqüência também era 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 para determinação de umidade e densidade.

Os valores de umidade e suas respectivas densidades foram plotados em um gráfico ajustando-se uma equação de regressão quadrática. O ponto máximo da curva foi calculado, obtendo-se o valor de densidade máxima ( $D_m$ ) e o valor de umidade no ponto ótimo para compactação associado.

A densidade relativa ( $D_r$ ) foi obtida empregando-se a equação 2.

$$D_r = \frac{D_s}{D_m} \quad (2)$$

### **3.5.3. Porosidade total, macro e microporosidade**

A porosidade total ( $P_T$ ) foi determinada pela relação entre densidade do solo ( $D_s$ ) e densidade de partículas do solo ( $D_p$ ), conforme equação 3. A microporosidade ( $P_{MI}$ ) foi obtida a partir da quantidade de água retida nas amostras indeformadas de solo submetidas à tensão de -0,006 MPa (60 cm de  $H_2O$ ). A macroporosidade ( $P_{MA}$ ) foi calculada pela diferença entre a porosidade total e a microporosidade ( $P_{MA}=P_T-P_{MI}$ ). Todos os procedimentos foram efetivados segundo EMPRAPA (1997).

$$PT = 1 - \frac{Ds}{Dp} \quad (3)$$

### 3.5.4. Condutividade hidráulica do solo em meio saturado

Para o estudo da condutividade hidráulica foram utilizados permeômetros de carga constante, sendo usado frascos de Mariote para manter a carga constante exercida por uma lâmina de água de 2 cm sobre as amostras de solo saturadas (EMBRAPA, 1997). O valor da condutividade hidráulica em meio saturado ( $K_e$ ) foi calculado utilizando-se a equação 4, baseada na Lei de Darcy. Os valores de  $K_e$ , determinados nas condições ambientais de temperatura, foram recalculados para a temperatura de referência de 20 °C ( $K_0$ ) empregando-se a equação 5.

$$K_e = -\frac{\frac{V}{At}}{-\frac{l}{L} + 1} \quad (4)$$

$$K_0 = K_e \cdot \frac{\eta_e}{\eta_{20}} \quad (5)$$

onde:

V = volume da água percolado da coluna de solo (mL);

t = tempo (s);

A = área transversal da coluna de solo (cm<sup>2</sup>);

l = lâmina de água mantida sobre a coluna de solo (cm);

L = altura da coluna de solo;

$\eta_e$  = viscosidade dinâmica da água na temperatura ambiente (momento da determinação);

$\eta_{20}$  = viscosidade dinâmica da água a 20 °C (0,01002 p).

### 3.5.5. Curva de retenção de água no solo e índice S

Para a obtenção da curva de retenção da água no solo utilizaram-se amostras com estrutura preservada, nas quais foram determinados a umidade ( $\theta$ ) no equilíbrio com os potenciais: -0,004; -0,006 e -0,008 MPa, aplicados em uma mesa de tensão (Topp & Zebchuk, 1979), e -0,01; -0,03; -0,05; -0,07; -0,1; -0,5 e -1,5 MPa, aplicados em placas porosas dispostas em câmeras de pressão (Klute, 1986).

A curva característica da retenção da água no solo foi ajustada pelo modelo proposto por Van Genuchten (1980), descrito na equação 6, que associa os valores de umidade obtidos no equilíbrio com os respectivos potenciais. A umidade de saturação ( $\theta_s$ ) e a umidade residual ( $\theta_r$ ), constantes no modelo, foram tratadas como variáveis independentes, sendo assumidas como equivalentes à porosidade total e umidade em equilíbrio com o potencial de -1,5 MPa, respectivamente. O parâmetro  $m$  foi considerado dependente de  $n$ , equivalendo a  $1-1/n$ . Na obtenção deste ajuste foi utilizado o software SWRC (Dourado Neto et al., 1990).

O índice S foi calculado a partir dos parâmetros de ajuste da curva, como proposto por Van Genuchten (1980) utilizando-se a equação 7.

$$\theta = \theta_r + \frac{(\theta_s - \theta_r)}{\left[1 + (\alpha\psi)^n\right]^m} \quad (6)$$

$$S = -n \cdot (\theta_s - \theta_r) \left[1 + \frac{1}{m}\right]^{-(1+m)} \quad (7)$$

onde:

$\theta$  = Umidade do solo ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\theta_r$  = Umidade do solo na tensão de 1,5 MPa ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\theta_s$  = Umidade do solo saturado ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\psi$  = Potencial da água no solo (MPa);

$\alpha$ ,  $m$ ,  $n$  = parâmetros empíricos da equação, obtidos pelo ajuste do modelo.

### 3.5.6. Intervalo hídrico ótimo

Para a definição do intervalo hídrico ótimo (IHO), as 40 amostras indeformadas coletadas em cada uso foram separadas em 10 grupos, com cada grupo contendo quatro repetições. Cada grupo de amostras foi submetido a um dos seguintes potenciais de água no solo: -0,004; -0,006 e -0,008 MPa aplicados em uma mesa de tensão (Topp & Zebchuk, 1979), e -0,01; -0,03; -0,05; -0,07; -0,1; -0,5 e -1,5 MPa, em placas porosas dispostas em câmeras de pressão (Klute, 1986). As amostras foram mantidas na mesa de tensão ou na placa porosa até atingir o ponto de equilíbrio, quando então foram retiradas do equipamento e submetidas à determinação da resistência à penetração (RP).

A determinação da RP foi realizada utilizando-se um penetrômetro eletrônico Marconi, modelo MA-933, conforme indicações de Tormena et al. (1998). Os ensaios foram realizados no centro de cada amostra, em toda a extensão da altura do anel, descartando-se os valores obtidos nos 0,5 cm das extremidades superior e inferior. A média dos valores obtidos nas quatro repetições foi utilizada para o cálculo do IHO.

Após a determinação de RP, as amostras foram pesadas e levadas à estufa a 105 °C por 24 horas, para a determinação da umidade ( $\theta$ ) e na seqüência, da densidade do solo ( $D_s$ ).

Os valores de RP foram ajustados em relação à  $D_s$  e  $\theta$ , utilizando-se um modelo de regressão não-linear proposto por Busscher (1990), conforme equação 8. Os valores de  $\theta$  foram ajustados em relação à  $D_s$  e ao potencial da água no solo ( $\psi$ ), utilizando-se um modelo de regressão não-linear proposto por Tormena et al. (1998), conforme equação 9. Os parâmetros de ajuste destas equações foram obtidos utilizando-se o software Statistica®.

$$RP = a.\theta^b .Ds^c \quad (8)$$

$$\theta = EXP(d + e.Ds).\psi^f \quad (9),$$

onde:

a, b, c, d, e, f = parâmetros de ajuste.

Na determinação do IHO foi utilizado um algoritmo desenvolvido em EXCEL<sup>®</sup> (Leão & Silva, 2004). Com o algoritmo foi gerado um gráfico a partir das equações 10, 11, 12 e 13, geradas com base nas equações 8 e 9. Essas equações relacionam  $D_s$  com:  $\theta$  na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ), equivalente ao conteúdo de água no potencial de -0,01 MPa;  $\theta$  no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ), equivalente ao conteúdo de água no potencial de -1,5 MPa;  $\theta$  em que a porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) for  $\leq 0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e  $\theta$  em que a resistência à penetração ( $\theta_{RP}$ ) atinge 2,0 MPa. Os limites indicados anteriormente foram utilizados no algoritmo supracitado a partir de dados de literatura, sendo para  $\theta_{CC}$ ,  $\theta_{PMP}$ ,  $\theta_{PA}$  e  $\theta_{RP}$  considerados os valores propostos, respectivamente, por Haise et al. (1955), Richards & Weaver (1944), Grable & Siemer (1968) e Taylor et al. (1966), todos referenciados em Leão & Silva (2004).

$$\theta_{CC} = EXP(d + e.D_s).0,01^f \quad (10)$$

$$\theta_{PMP} = EXP(d + e.D_s).1,5^f \quad (11)$$

$$\theta_{RP} = \left( \frac{2}{a.D_s^c} \right)^{\frac{1}{b}} \quad (12)$$

$$\theta_{PA} = \left( 1 - \frac{D_s}{D_p} \right) - 0,1 \quad (13)$$

O IHO foi definido como a área entre o limite superior e inferior dos conteúdos de água correspondendo às curvas geradas. O limite superior é dado pelo menor valor de umidade determinado pela capacidade de campo ou porosidade de aeração. Já o limite inferior é o maior valor de umidade determinado pela resistência à penetração ou pelo ponto de murcha permanente.

### 3.5.7. Estabilidade de agregados do solo

A distribuição percentual das classes de tamanho dos agregados foi realizada em amostras de agregados de 2 a 4 mm de diâmetros, por meio do tamisamento úmido, utilizando-se um aparelho de Yoder (EMBRAPA, 1997). O tamisamento foi

efetuado utilizando-se um conjunto de peneiras com malhas de 0,105; 0,25; 0,5; 1; e 2 mm de abertura. Foram obtidas seis classes de tamanhos de agregados, definidas pelos seguintes intervalos de diâmetros: < 0,105 mm; 0,105 a 0,25 mm; 0,25 a 0,5 mm; 0,5 a 1 mm; 1 a 2 mm e 2 a 4 mm (Kemper & Chepil, 1965). A partir dos dados obtidos, foram calculados os índices: diâmetro médio geométrico (DMG), diâmetro médio ponderado (DMP) e índice de estabilidade de agregados (IEA). Nos cálculos dos índices DMP, IEA e DMG foram utilizadas as equações 14, 15 e 16, respectivamente, de acordo com Kemper & Chepil (1965).

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad (14)$$

$$IEA = \left( \frac{Ps - wp_{0,105} - areia}{Ps - areia} \right) \cdot 100 \quad (15)$$

$$DMG = EXP \frac{\sum_{i=1}^N wp_i \cdot \log x_i}{\sum_{i=1}^N w_i} \quad (16)$$

onde:

$x_i$  = diâmetro médio das classes (mm);

$w_i$  = proporção de cada classe em relação ao total;

$Ps$  = massa da amostra seca (g);

$wp_{0,105}$  = massa dos agregados da classe <0,105 mm (g);

$wp$  = massa dos agregados de cada classe (g);

$areia$  = proporção de areia ( $g \cdot kg^{-1}$ ).

### 3.6. Indicadores físicos avaliados a campo

#### 3.6.1. Resistência do solo à penetração

A resistência do solo à penetração foi realizada em dois períodos do ano (chuvoso e seco), utilizando-se um penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR-STOLF (Stolf et al., 1983). Os ensaios foram realizados em quatro pontos de cada subárea delimitadas à campo, até a profundidade de 50 cm, nos dois períodos estudados, nas áreas situadas nos municípios de Araponga e Choró.

Apenas na época seca, em Choró, a avaliação foi efetuada até a profundidade de 30 cm, tendo em vista a grande resistência do solo. Os dados obtidos foram convertidos para MPa empregando-se um arquivo desenvolvido em EXCEL<sup>®</sup>, utilizando-se a metodologia descrita por Stolf (1991), com adaptações. No momento da determinação da resistência à penetração nos dois períodos do ano estudados foram coletadas amostras de solo para determinação da umidade.

### **3.6.2. Condutividade hidráulica do solo saturado a campo**

A condutividade hidráulica em meio saturado em condições de campo foi determinada em cada área de estudo, sendo realizada uma determinação por sub área, utilizando-se um permeâmetro de Guelph (Reynolds et al., 1992). Com o equipamento foi determinada a taxa constante de infiltração da água no solo de 0 a 20 cm de profundidade com duas cargas constantes (5 e 10 cm de coluna de água). A partir dos valores de volume de água percolado em um determinado intervalo de tempo, calculou-se a condutividade hidráulica ( $K_c$ ), expressa em  $m\ h^{-1}$ .

### **3.7. Análises estatísticas**

Os resultados obtidos foram analisados estatisticamente dentro de um esquema experimental em parcelas sub-divididas, em que os usos constituíram os tratamentos (parcela), e as camadas, com restrições a casualização, representaram os tratamentos da sub parcela (Steel et al., 1997, Quadro 3). Assim, os dados obtidos foram submetidos à análise de variância e o desdobramento das interações uso x camadas foi realizado independentemente da significância, de modo a confirmar os efeitos do uso, mediante contrastes ortogonais (Quadro 4), dentro dessas camadas do perfil do solo. Para esses procedimentos foi utilizado o “Sistema para Análises Estatísticas e Genéticas” (SAEG), desenvolvido pela Universidade Federal de Viçosa. Os procedimentos estatísticos foram realizados separadamente para as duas regiões estudadas.

Quadro 3 – Análise de variância, considerando o uso e a profundidade do solo

Fonte de Variação	Graus de Liberdade
Uso	2
Resíduo A [Rep. + (Rep. x Uso)]	9
Camada	2
Resíduo B (Rep. x Cam.)	6
Uso x Camada	4
Resíduo C	13

Uso: solo sob mata, sob SAF e sob cultivo a pleno sol; Rep: repetição; Cam: camada

Quadro 4 – Contrastes ortogonais (C) utilizados na comparação entre os diferentes usos

Usos	C1	C2
MS	-2	0
SAF	1	1
CPS	1	-1

MS: mata secundária; SAF: Sistema agroflorestal; CPS: Cultivo a pleno sol.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Carbono orgânico total**

Nos dois ambientes estudados, Mata Atlântica e Caatinga, o teor de carbono orgânico total (COT) diminui nas camadas mais profundas do solo (Figura 2). Este é um comportamento comum (Wendling et al., 2005; Fialho et al., 2006; Maia et al., 2006; Marcolin 2006) e ocorre devido ao maior acúmulo de material vegetal na superfície do solo. Em Choró (Figura 2B), a variação em profundidade foi pequena, sendo que os valores da segunda camada (10-20 cm) praticamente igualam-se aos da última (20-40 cm).

As áreas situadas no ambiente de Caatinga, por sua baixa produção natural, apresentaram valores de COT muito inferiores aos observados nas áreas localizadas na Zona da Mata mineira (Figura 2). A variação de temperatura existente entre as duas regiões também contribui para esta diferença. No entanto, a textura pode ser a maior determinante da diferença encontrada. Os maiores teores de argila do Latossolo contribuem para um maior acúmulo de carbono orgânico, uma vez que nestas condições há maior proteção da matéria orgânica no solo (Bayer & Mieniczuk, 1999).

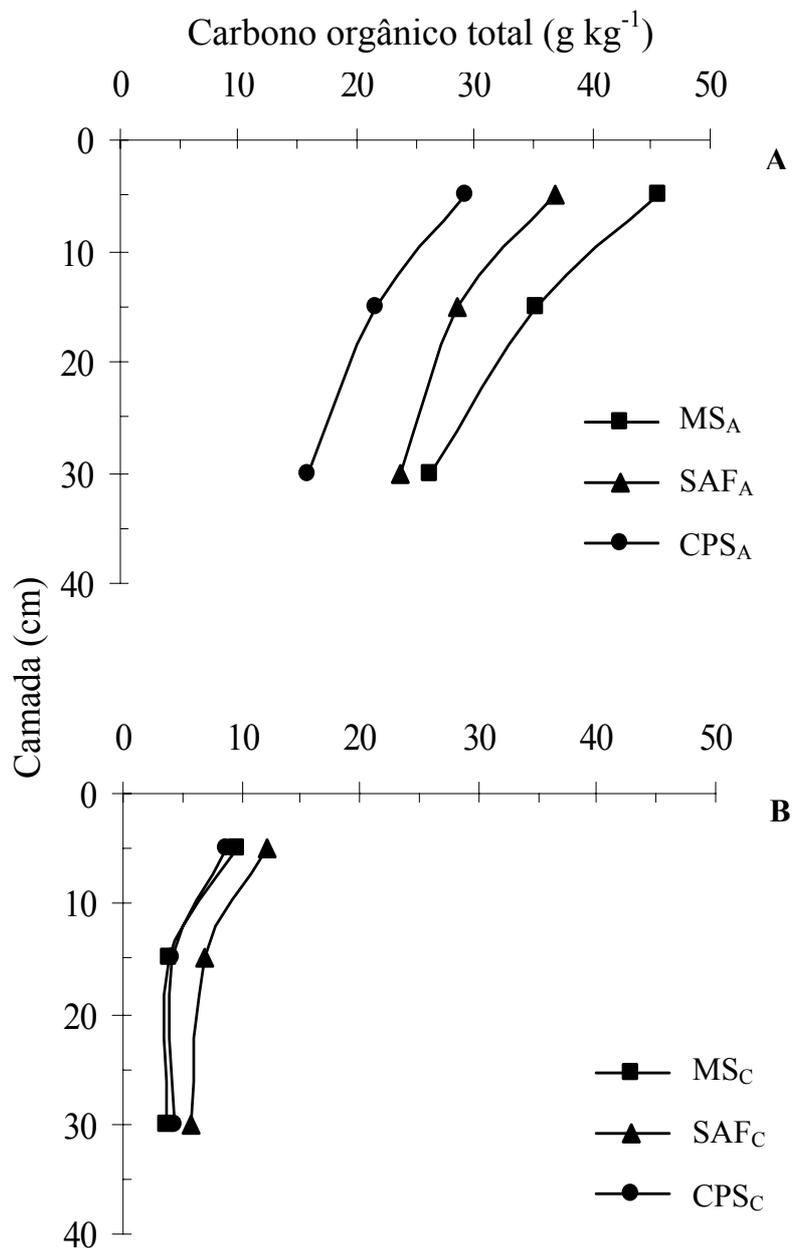


Figura 2 - Carbono orgânico total do solo nos sistemas avaliados em Araponga (A): MS<sub>A</sub> mata secundária, SAF<sub>A</sub>, sistema agroflorestal, CPS<sub>A</sub> cultivo a pleno sol; e Choró (B) MS<sub>C</sub>, mata secundária; SAF<sub>C</sub>, sistema agroflorestal; CPS<sub>C</sub>, consórcio a pleno sol.

Os resultados de COT na área de mata ( $MS_A$ ) de Araponga (Figura 2A) foram, para todas as camadas avaliadas, maiores que os observados para as áreas cultivadas (Quadro 5). Wendling et al. (2005), trabalhando com áreas sob plantio direto obtiveram resultados semelhantes, relatando uma drástica redução do COT do solo cultivado em relação à mata nativa. Considerando apenas as áreas cultivadas, a área sob manejo agroflorestal ( $SAF_A$ ) apresentou valores significativamente superiores aos verificados na área onde o café é cultivado a pleno sol ( $CPS_A$ ), mostrando o potencial do  $SAF_A$  em aportar e manter carbono orgânico no solo. Apenas para a camada de 10 a 20 cm a diferença não foi significativa entre  $CPS_A$  e  $SAF_A$  (Quadro 5). A maior adição de material orgânico proveniente das árvores promove maior acúmulo de COT no solo, quando comparado com cultivos solteiros (Mendonça et al., 2001; Hairiah et al., 2006; Maia et al., 2006).

Já em Choró, os resultados obtidos de COT indicaram não haver diferença entre a área sob mata ( $MS_C$ ) e as áreas cultivadas ( $SAF_C$  e  $CPS_C$ ) (Quadro 5), entretanto, a área de  $SAF_C$  apresentou valores superiores aos observados em  $CPS_C$  (Figura 2B). Assim como em Araponga (MG), a área sob SAF em Choró proporcionou maior aporte de carbono em relação ao cultivo a pleno sol.

Embora a opção de análises por contrastes não permita tal comparação, os dados numéricos obtidos indicam uma superioridade dos valores de COT do  $SAF_C$  em relação a  $MS_C$ . Tal fato parece indicar que em ambientes onde o aporte de matéria orgânica pela vegetação natural é reduzido, como é o caso da Caatinga, em decorrência da baixa produção, sistemas de cultivo bem manejados podem não só promover condições semelhantes à natural, como melhorá-las. Trabalhos com Argissolo Vermelho-Amarelo e um Neossolo Flúvico (Otutumi et al., 2004) e com Neossolo Quartzarênico (Xavier et al., 2006) verificaram teores de COT semelhantes entre áreas cultivadas sob manejo agroecológico e áreas sob vegetação natural de Caatinga, sugerindo que o manejo agroecológico não implicou em perdas de carbono dos sistemas. Alencar et al. (2004) e Sousa (2006), por sua vez, verificaram que em Neossolo Quartzarênico e um Argissolo Vermelho-Amarelo, respectivamente, o cultivo orgânico proporcionou maiores estoques de COT comparativamente às áreas sob Caatinga.

Quadro 5 – Significância dos contrastes C1 e C2, quadrado médio do resíduo (QM Res) e coeficiente de variação (CV), calculados para o carbono orgânico total (COT) nos sistemas avaliados em Araponga e Choro

Camada cm	COT			
	C1	C2	Qm Res	CV (%)
<b>Araponga, MG</b>				
0-10	**	*		
10-20	**	ns	0,3656	20,7
20-40	o	o		
<b>Choró, CE</b>				
0-10	ns	*		
10-20	ns	o	0,0408	30,8
20-40	ns	ns		

C1 = MS vs (SAF + CPS); C2 = SAF vs CPS; CV = coeficiente de variação; \*\*, \*, o, ns = significativo ao nível de 1%; 5%; 10% e não significativo, respectivamente.

Quando comparados à Caatinga, os SAFs do semi-árido cearense possuem melhor estratificação da vegetação (natural e cultivada), o que contribui para o maior aporte de carbono. As árvores continuamente produzem material orgânico que cai sobre o solo. As espécies herbáceas espontâneas, por meio das roçagens, e os restos culturais também contribuem com o aporte de carbono até certa profundidade. Na mata da Caatinga este tipo de estratificação não é tão diversificado como poderia ser pensado inicialmente, uma vez que as árvores são mais adensadas que no SAF e, quando rebrotam em cada período chuvoso, formam rapidamente um dossel que promove muito sombreamento, restringido o estabelecimento de espécies herbáceas, que parecem contribuir mais para o aumento no teor de COT no solo.

#### **4.2. Composição granulométrica, argila dispersa em água, índice de floculação e densidade de partículas**

A composição granulométrica observada para as áreas de Araponga permitem enquadrar o solo como da classe textural Argila ou similar, enquanto que os das áreas de Choró indicam ser o solo da classe Areia Franca (Quadro 6).

No município de Araponga, verificou-se que a argila dispersa em água (ADA, Quadro 6), diferiu entre os sistemas cultivados e matas e entre SAF<sub>A</sub> e CPS<sub>A</sub> (C1 e C2, Quadro 7). Esses resultados refletem a redução na floculação das argilas quando o solo é submetido a cultivo, como indicado também pelos valores e contrastes obtidos para o grau de floculação (GF, Quadros 6 e 7).

Quadro 6 – Composição granulométrica, argila dispersa em água (ADA), grau de floculação (GF), e densidade de partículas dos solos (Dp) sob mata secundária e sob diferentes sistemas de manejo, nos municípios de Araponga e Choro

Uso do solo	AG	AF	Silte	Argila	ADA	GF	Dp
	----- g kg <sup>-1</sup> -----					%	kg dm <sup>-3</sup>
<b>Araponga, MG</b>							
----- 0-10 cm -----							
<b>MS<sub>A</sub></b>	308	167	123	402	17	96	2,37
<b>SAF<sub>A</sub></b>	265	123	113	499	26	95	2,61
<b>CPS<sub>A</sub></b>	314	129	135	422	46	89	2,61
----- 10-20 cm -----							
<b>MS<sub>A</sub></b>	265	188	123	425	17	96	2,50
<b>SAF<sub>A</sub></b>	257	126	109	508	42	92	2,59
<b>CPS<sub>A</sub></b>	277	128	147	448	61	86	2,77
----- 20-40 cm -----							
<b>MS<sub>A</sub></b>	237	182	133	447	26	94	2,56
<b>SAF<sub>A</sub></b>	244	116	114	526	38	93	2,60
<b>CPS<sub>A</sub></b>	246	106	138	511	82	84	2,66
<b>Choró, CE</b>							
----- 0-10 cm -----							
<b>MS<sub>C</sub></b>	438	353	70	140	19	73	2,54
<b>SAF<sub>C</sub></b>	434	346	95	125	21	77	2,55
<b>CPS<sub>C</sub></b>	455	352	71	123	19	74	2,66
----- 10-20 cm -----							
<b>MS<sub>C</sub></b>	429	343	77	151	29	63	2,55
<b>SAF<sub>C</sub></b>	412	351	99	138	33	66	2,64
<b>CPS<sub>C</sub></b>	462	340	71	126	27	62	2,74
----- 20-40 cm -----							
<b>MS<sub>C</sub></b>	426	316	124	135	45	64	2,63
<b>SAF<sub>C</sub></b>	411	335	119	134	38	68	2,74
<b>CPS<sub>C</sub></b>	450	337	89	124	35	60	2,61

AG: areia grossa; AF: areia fina; MS<sub>A</sub>: mata secundária, SAF<sub>A</sub>: sistema agroflorestal e CPS<sub>A</sub>: cultivo a pleno sol em Araponga; MS<sub>C</sub>: mata secundária, SAF<sub>C</sub>: sistema agroflorestal e CPS<sub>A</sub> consórcio a pleno sol em Choró.

Quadro 7 – Significância dos contrastes C1 e C2, Quadrado médio do resíduo (QM Res) e coeficiente de variação (CV), calculados para argila dispersa em água (ADA), índice de floculação (GF) e densidade de partículas (Dp), nos sistemas avaliados em Araponga e Choro

	ADA	GF	Dp
<b>Araponga, MG</b>			
----- 0-10 cm -----			
C1	**	**	**
C2	*	*	ns
----- 10-20 cm -----			
C1	**	**	*
C2	o	*	*
----- 20-40 cm -----			
C1	**	*	ns
C2	**	**	ns
QM Res	0,0002	12,72	0,0147
CV (%)	33,8	3,9	4,7
<b>Choró, CE</b>			
----- 0-10 cm -----			
C1	ns	ns	ns
C2	ns	ns	ns
----- 10-20 cm -----			
C1	ns	ns	ns
C2	**	ns	ns
----- 20-40 cm -----			
C1	ns	ns	ns
C2	**	**	ns
QM Res	0,0001	49,9	0,0213
CV (%)	37,1	10,4	5,6

C1 = MS vs (SAF + CPS); C2 = SAF vs CPS; CV = coeficiente de variação; \*\*, \*, o, ns = significativo ao nível de 1%; 5%; 10% e não significativo, respectivamente.

O incremento nos valores de ADA e conseqüente decréscimo nos valores de GF, verificados em SAF<sub>A</sub> e CPS<sub>A</sub> podem ser associados, além do cultivo, à prática da calagem realizada nessas áreas, que leva à redução da atividade do Al<sup>3+</sup> e aumento dos cátions Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> no complexo de troca. A troca de um cátion de maior poder de floculação por cátions de menor capacidade floculante pode contribuir para essa dispersão das argilas. Tanto SAF<sub>A</sub> quanto CPS<sub>A</sub> possuem menores valores de Al<sup>3+</sup> em relação à MS<sub>A</sub> (Quadro 1). Além disso, os maiores teores de carbono orgânico observados nas áreas MS<sub>A</sub> e SAF<sub>A</sub> (Figura 2A) podem estar favorecendo a maior floculação nestas áreas, tendo em vista que o COT é inversamente relacionados com a ADA (Quadro 6).

Em Choró não foram observadas diferenças estatísticas entre os manejos com relação aos teores de ADA, na camada de 0 a 10 cm. Essa observação pode ser associada à similaridade dos teores de COT, assim como do complexo de troca. Por outro lado, na comparação entre áreas cultivadas nas camadas 10 a 20 e 20 a 40 cm houve diferenças, sendo a área sob SAF<sub>C</sub> a que apresentou maior valor de ADA (Quadros 6 e 7). Este efeito pode ser associado aos valores de sódio presentes nestas áreas (Quadro 2), que para a camada superficial é semelhante, porém com acréscimo e maior valor para a área de SAF<sub>C</sub> em relação a de CPS<sub>C</sub>.

Para a densidade de partículas (Dp, Quadro 7), diferenças estatísticas foram observadas entre os sistemas cultivados e mata em Araçuaia. Tais diferenças não eram esperadas, pois as práticas de manejo não afetam a densidade de partículas, cuja determinação não considera o espaço poroso do solo, normalmente afetado pela estrutura. Entretanto os menores teores de COT, devido à oxidação da matéria orgânica, podem ocasionar incremento nos valores de Dp. Isto explicaria valores de Dp na área MS<sub>A</sub>, significativamente inferiores aos observados nas áreas sob cultivo nas duas camadas superiores. Na camada de maior profundidade esse efeito não foi verificado (Quadro 7). No caso de Choró, como o manejo diferenciado das áreas não alterou os teores de COT, e esses são baixos, não houve diferença entre os valores de Dp entre os sistemas (Quadros 6 e 7).

### 4.3. Densidade, densidade máxima e densidade relativa do solo

A densidade do solo ( $D_s$ ) em Araponga (Figura 3A), foi menor para a mata em comparação com as áreas cultivadas e menor para o  $SAF_A$  em relação ao  $CPS_A$  (Quadro 8), indicando maior potencial do  $SAF_A$  em recuperar a densidade do solo em relação ao cultivo de café a pleno sol. Carvalho et al. (2004b) estudando solos do projeto Vitrine de Tecnologias da Embrapa-(Parque Rural, Brasília), também verificaram em um Latossolo Vermelho, de textura argilosa, que o manejo agroflorestal proporcionou menores valores de  $D_s$ .

As diferenças entre os valores de  $D_s$  observadas nas áreas podem ser resultados do efeito que o manejo provoca nos teores de matéria orgânica do solo, uma vez que menor teor de matéria orgânica leva a maior  $D_s$  (Marcolin, 2006) e menor estabilidade da estrutura do solo (Tormena et al., 2004). Assim, a maior  $D_s$  de  $CPS_A$  e menores para  $MS_A$  e  $SAF_A$  ocorreram devido aos maiores valores de COT nas duas últimas áreas comparados a primeira (Figura 1A). Além do efeito da matéria orgânica, eventualmente partículas mais finas de argila dispersas com a calagem e com o impacto das gotas de chuvas nas áreas cultivadas, podem também contribuir para o incremento da  $D_s$ . As partículas dispersas podem ser translocadas verticalmente no perfil e provocar o entupimento de poros. Como nos  $SAF_A$ , além do maior teor de COT, o efeito das gotas de chuva é reduzido devido à sua interceptação pela copa das árvores e usa-se menos calcário, espera-se menor  $D_s$  em relação ao  $CPS_A$ .

Nas áreas de Choró, diferenças estatísticas não foram verificadas entre as  $D_s$  (Figura 3B) das áreas de  $MS_C$  e as áreas de cultivos ( $SAF_C$  e  $CPS_C$ ), mas sim entre as áreas de cultivo (Quadro 8). Embora a análise por contraste não permita a comparação entre  $MS_C$  e  $SAF_C$  os valores numéricos indicam uma menor  $D_s$  no  $SAF_C$  em relação a  $MS_C$ , coincidindo com o comportamento observado para os dados de COT (Figura 1B, Quadro 5). A menor  $D_s$  do  $SAF_C$  evidencia o possível papel das árvores na redução da compactação do solo.

Quadro 8 – Significância dos contrastes C1 e C2, quadrado médio do resíduo (QM Res) e coeficiente de variação (CV), calculados para a densidade do solo (Ds) nos sistemas avaliados em Araponga e Choró

Camada cm	Ds		Qm Res	CV (%)
	C1	C2		
<b>Araponga, MG</b>				
0-10	**	o		
10-20	**	**	0,0108	10,4
20-40	**	**		
<b>Choró, CE</b>				
0-10	ns	**		
10-20	ns	**	0,0046	4,5
20-40	ns	**		

C1 = MS vs (SAF + CPS); C2 = SAF vs CPS; CV = coeficiente de variação; \*\*, \*, o, ns = significativo ao nível de 1%; 5%; 10% e não significativo, respectivamente.

Alencar et al. (2004) verificaram redução do valor de Ds em um Neossolo Quartzarênico cultivado sob manejo orgânico quando comparados com manejo convencional. Já Otutumi et al. (2004) não observaram diferenças entre áreas sob cultivo agroecológico e sob vegetação de Caatinga tanto em Argissolo Vermelho-Amarelo quanto em Neossolo Flúvico

Os resultados de densidade máxima (Dm) e de densidade relativa (Dr) do solo (Quadro 9 e Figura 4) mostram o efeito do uso do solo, em causar modificações nos valores de densidade. Em Araponga, a Dm foi menor na mata, sendo aumentada igualmente nas áreas SAF<sub>A</sub> e CPS<sub>A</sub>, apresentando, ambas, valores muito elevados. A condição natural aliada aos maiores teores de carbono orgânico (Figura 2A) podem explicar os menores valores de Dm em MS<sub>A</sub>. Em um ensaio para avaliar o efeito da matéria orgânica sobre a curva de compactação do solo, Braida et al. (2006) observaram que o aumento dos teores de carbono orgânico reduziram a densidade máxima de um Argissolo de textura franco arenosa e um de Nitossolo de textura argilosa.

Embora valores semelhantes de Dm tenham sido obtidos nas áreas SAF<sub>A</sub> e CPS<sub>A</sub>, os valores de Dr foram menores no SAF<sub>A</sub>. (Figura 4). Os valores de Dr parecem explicar melhor o efeito do manejo e, portanto, representa um indicador melhor de qualidade do solo, evidenciando efeito sobre a estrutura do solo mais intenso na área de cultivo a pleno sol. No entanto, os valores de Dr próximos a unidade, observados na área CPS<sub>A</sub>, nas camadas de 10-20 e 20-40 cm podem ser relacionadas ao fato de a determinação de Dm ter sido realizada apenas na camada de

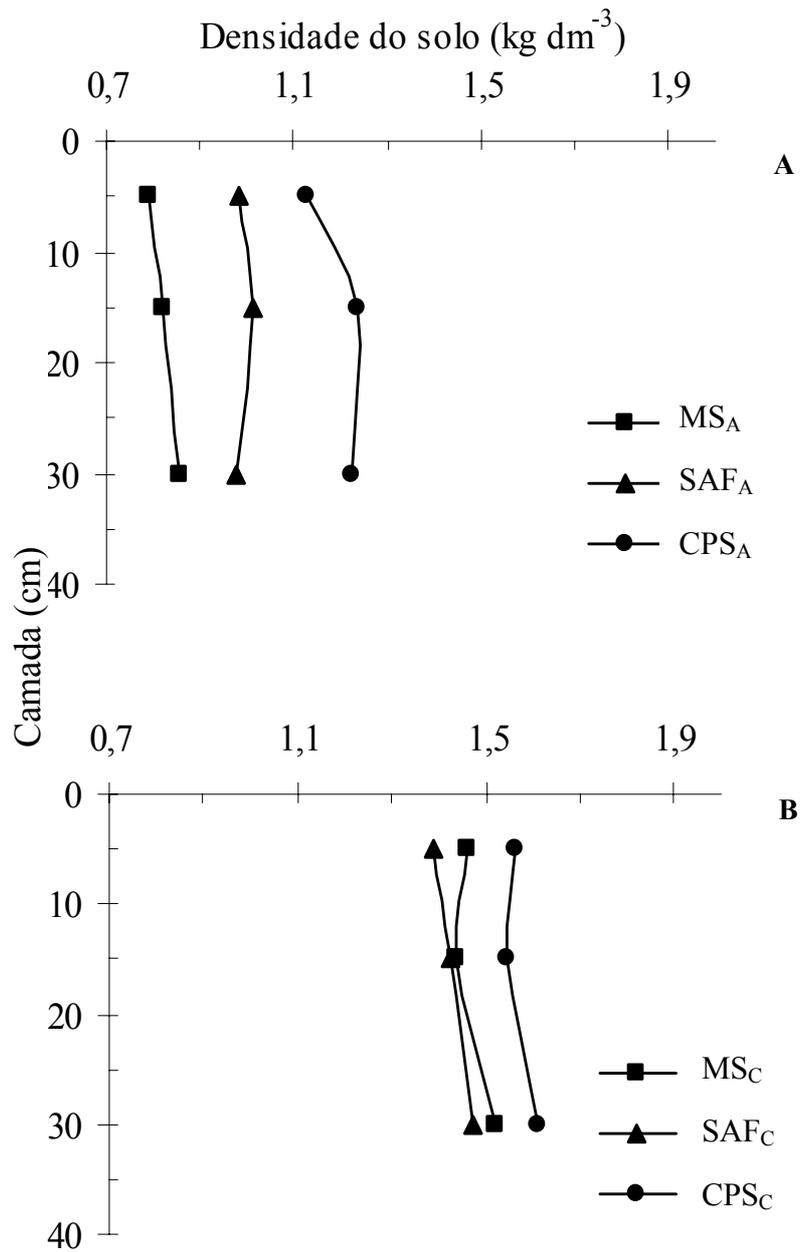


Figura 3 – Densidade do solo nos sistemas avaliados em Araponga (A): MS<sub>A</sub> mata secundária, SAF<sub>A</sub>, sistema agroflorestal, CPS<sub>A</sub> cultivo a pleno sol; e Choró (B) MS<sub>C</sub>, mata secundária; SAF<sub>C</sub>, sistema agroflorestal; CPS<sub>C</sub>, consórcio a pleno sol.

Quadro 9 – Densidade máxima (Dm) do solo na camada de 0-10 cm para os usos avaliados em Araçuaia e Choró

Uso do solo	Dm (kg dm <sup>-3</sup> )
Araçuaia, MG	
<b>MS<sub>A</sub></b>	1,03
<b>SAF<sub>A</sub></b>	1,24
<b>CPS<sub>A</sub></b>	1,25
Choró, CE	
<b>MS<sub>C</sub></b>	1,93
<b>SAF<sub>C</sub></b>	1,94
<b>CPS<sub>C</sub></b>	2,00

MS<sub>A</sub>: mata secundária, SAF<sub>A</sub>: sistema agroflorestal, e CPS<sub>A</sub>: cultivo a pleno sol em Araçuaia; MS<sub>C</sub>: mata secundária, SAF<sub>C</sub>: sistema agroflorestal, e CPS<sub>C</sub>: cultivo a pleno sol em Choró.

0-10 cm, sendo este valor considerado no cálculo de Dr das duas camadas mais profundas, e como há um menor teor de COT nestas camadas é de se esperar uma Dm maior e assim uma menor Dr.

Maiores valores de Dr significam que a Ds se aproximou mais da Dm, o que é um indicador de alta compactação. Esses resultados sugerem, mais uma vez, o potencial do sistema agroflorestal em atenuar a compactação do solo, mantendo o mais distante possível a Ds da Dm, uma vez que os dados observados nesta área manteve-se semelhante a mata nas três camadas amostradas.

Já em Choró, o uso do solo não proporcionou o mesmo efeito verificado em Araçuaia. O valor de Dm em MS<sub>C</sub> foi semelhante e o valor de Dr maior em relação aos SAF<sub>C</sub>, entretanto o valor obtido para a CPS<sub>C</sub> foi maior, indicando maior alteração do solo nesta área e maior propensão à compactação em relação a MS<sub>C</sub> e SAF<sub>C</sub>.

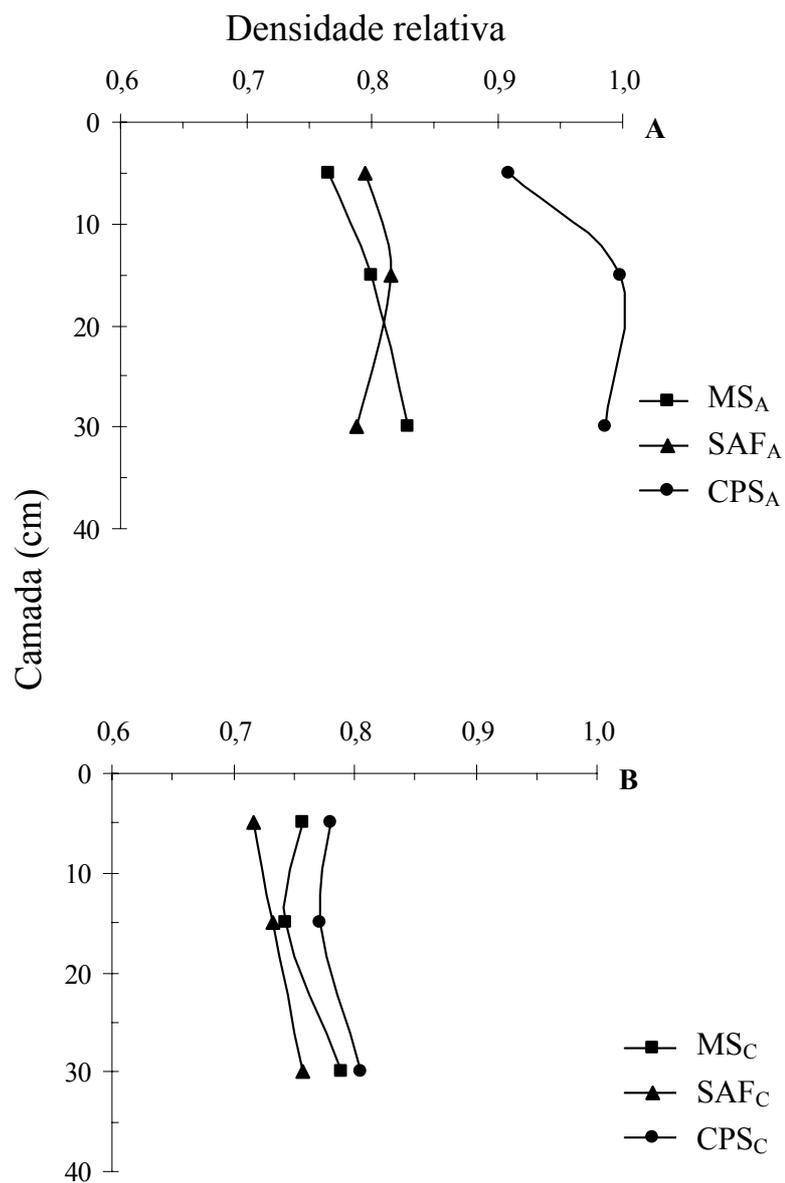


Figura 4 – Densidade relativa do solo dos sistemas avaliados nos sistemas avaliados em Araponga (A):  $MS_A$  mata secundária,  $SAF_A$ , sistema agroflorestal,  $CPS_A$  cultivo a pleno sol; e Choró (B)  $MS_C$ , mata secundária;  $SAF_C$ , sistema agroflorestal;  $CPS_C$ , consórcio a pleno sol.

#### 4.4. Porosidade total, macro e microporosidade

Houve redução da porosidade total ( $P_T$ ) dependendo do manejo do solo em Araponga (Figura 5A). Este efeito foi mais pronunciado no cultivo de café a pleno sol. A redução na  $P_T$  está associada à redução da macroporosidade ( $P_{MA}$ ) e conseqüente incremento da microporosidade ( $P_{MI}$ ). A transformação de macroporos em microporos, como sugerido pelos dados obtidos, é freqüentemente observada com o incremento de atividades com o solo (Carvalho et al., 2004b; Tormena et al., 2004). Os efeitos decorrentes disto, embora possam incrementar a água retida nos microporos, freqüentemente reduzem drasticamente a percolação de água no perfil, afetando sobremaneira, a disponibilidade de água no solo e a alimentação de lençóis freáticos.

A Análise estatística efetuada não diagnosticou variações nos valores de  $P_T$  nas diferentes áreas avaliadas. Houve diferenças entre os sistemas de cultivo ( $SAF_A$  e  $CPS_A$ ) e mata ( $MS_A$ ) quanto à  $P_{MA}$  nas profundidades de 10-20 cm e 20-40 e em relação  $P_{MI}$  na profundidade 10-20 cm (Quadro 10). A ausência de diferenças estatísticas pode estar associada aos altos valores de coeficiente de variação (CV) observados para as determinações efetuadas.

Em Choró, houve menores variações nos valores de  $P_T$ ,  $P_{MA}$  e  $P_{MI}$  entre os sistemas de uso (Figura 5B). Entretanto, diferenças estatísticas puderam ser identificadas entre as áreas  $SAF_C$  e  $CPS_C$ , mas não entre a mata e as áreas cultivadas. A área  $SAF_C$  apresentou maior valor de  $P_T$ , nas camadas de 0 a 10 e de 20 a 40 cm de profundidade comparada a  $CPS_C$ . O mesmo ocorrendo em relação à  $P_{MA}$  e  $P_{MI}$ , mas somente nas duas últimas camadas avaliadas (Quadro 10).

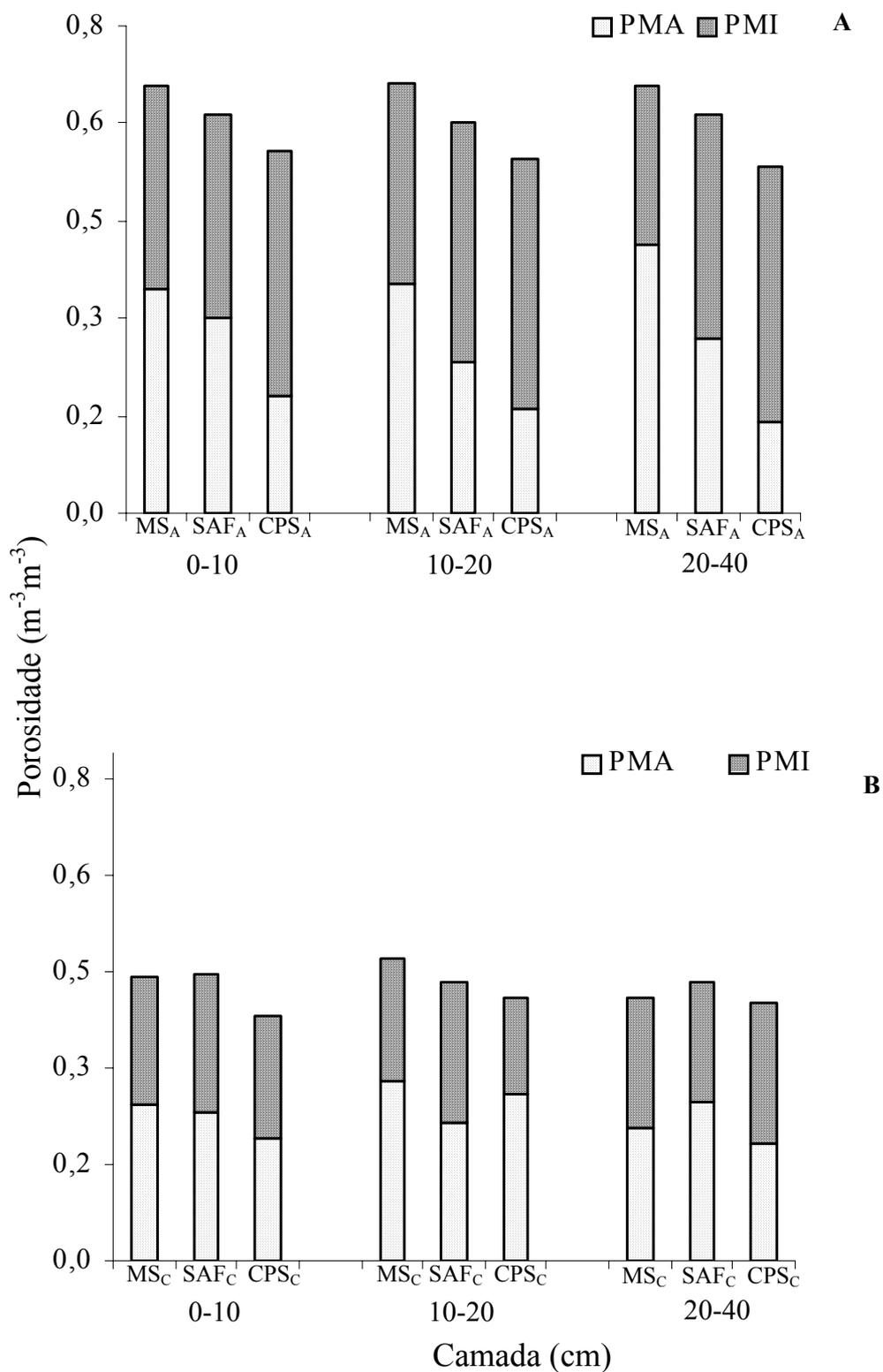


Figura 5 – Valores médios de porosidade total, macroporosidade, e microporosidade do solo nos sistemas avaliados em Araponga (A): MS<sub>A</sub> mata secundária, SAF<sub>A</sub>, sistema agroflorestal, CPS<sub>A</sub> cultivo a pleno sol; e Choró (B) MS<sub>C</sub>, mata secundária; SAF<sub>C</sub>, sistema agroflorestal; CPS<sub>C</sub>, consórcio a pleno sol.

Quadros 10 – Significância dos contrastes C1 e C2, Quadrado médio do resíduo (QM Res) e coeficiente de variação (CV), calculados para porosidade total (P<sub>T</sub>), macroporosidade (P<sub>MA</sub>), microporosidade (P<sub>MI</sub>) observados nos sistemas avaliados em Araponga e Choró

	P <sub>T</sub>	P <sub>MA</sub>	P <sub>MI</sub>
<b>Araponga, MG</b>			
----- 0-10 cm -----			
C1	ns	ns	ns
C2	ns	ns	ns
----- 10-20 cm -----			
C1	ns	*	ns
C2	ns	ns	ns
----- 20-40 cm -----			
C1	ns	**	*
C2	ns	ns	ns
QM Res	0,025	0,0142	0,0065
CV (%)	25,8	44,2	23,5
<b>Choró, CE</b>			
----- 0-10 cm -----			
C1	ns	ns	ns
C2	*	ns	ns
----- 10-20 cm -----			
C1	ns	ns	ns
C2	ns	ns	**
----- 20-40 cm -----			
C1	ns	ns	ns
C2	**	**	o
QM Res	0,0009	0,0023	0,0006
CV (%)	7,0	20,7	12,3

C1 = MS vs (SAF + CPS); C2 = SAF vs CPS; CV = coeficiente de variação; \*\*, \*, °, ns = significativo ao nível de 1%; 5%; 10% e não significativo, respectivamente.

#### 4.5. Condutividade hidráulica do solo em meio saturado

Os resultados de condutividade hidráulica do solo foram expressivamente diferentes considerando as duas regiões estudadas, fato pelo qual optou-se por mostrá-los em escalas diferentes possibilitando melhor visualização das diferenças entre sistemas de uso do solo dentro de cada região (Figura 6).

Em Araçuaia, a condutividade hidráulica em meio saturado ( $K_0$ ) obtida em laboratório foi maior na mata ( $MS_A$ ), sendo reduzida com o uso do solo (Figura 5). As diferenças observadas entre  $MS_A$  e os sistemas de cultivo  $SAF_A$  e  $CPS_A$  (Quadro 11) evidenciam a redução da  $K_0$  quando se retira a mata, com conseqüências ambientais do ponto de vista hidrológico, poucas vezes mensuradas ou mesmo referenciadas quando se discute a relação entre as atividades agrícolas e os recursos hídricos.

Os valores de  $K_0$  observados na  $MS_A$  foram bastante elevados (Borges et al., 2005), refletindo a elevada porosidade total e macroporosidade notados nesta área. Com relação às áreas cultivadas, os resultados obtidos evidenciam maior  $K_0$  no  $SAF_A$  em detrimento do  $CPS_A$  (Figura 5A). No entanto, não houve diferença estatística (Quadro 11), provavelmente devido ao elevado coeficiente de variação observado para essa análise. A condutividade hidráulica é sabidamente um procedimento analítico que apresenta elevada variabilidade em decorrência da instabilidade espacial (horizontal e vertical) inerente ao solo, bem como dos efeitos da coleta sobre a amostra obtida, que normalmente sofrem alguma perturbação, em especial, algum selamento superficial.

Os dados de condutividade hidráulica obtidos no campo (Quadro 12) indicaram a mesma tendência de redução da condutividade hidráulica com a substituição da mata, entretanto indicaram maior semelhança entre as áreas cultivadas (Quadros 11 e 12).

A avaliação feita em campo permitiu redução no coeficiente de variação (Quadro 11). Como este tipo de análise reduz-se o efeito causado pelo possível selamento superficial da amostra no momento da coleta, além de permitir que o fluxo de água ocorra nas diversas direções do solo, enquanto que a determinação feita em laboratório só permite que este ocorra verticalmente. Geralmente, o exame da condutividade hidráulica não é efetuado em campo por ser um procedimento trabalhoso, que exige elevado consumo de água e de mão de obra, além de ser lento e

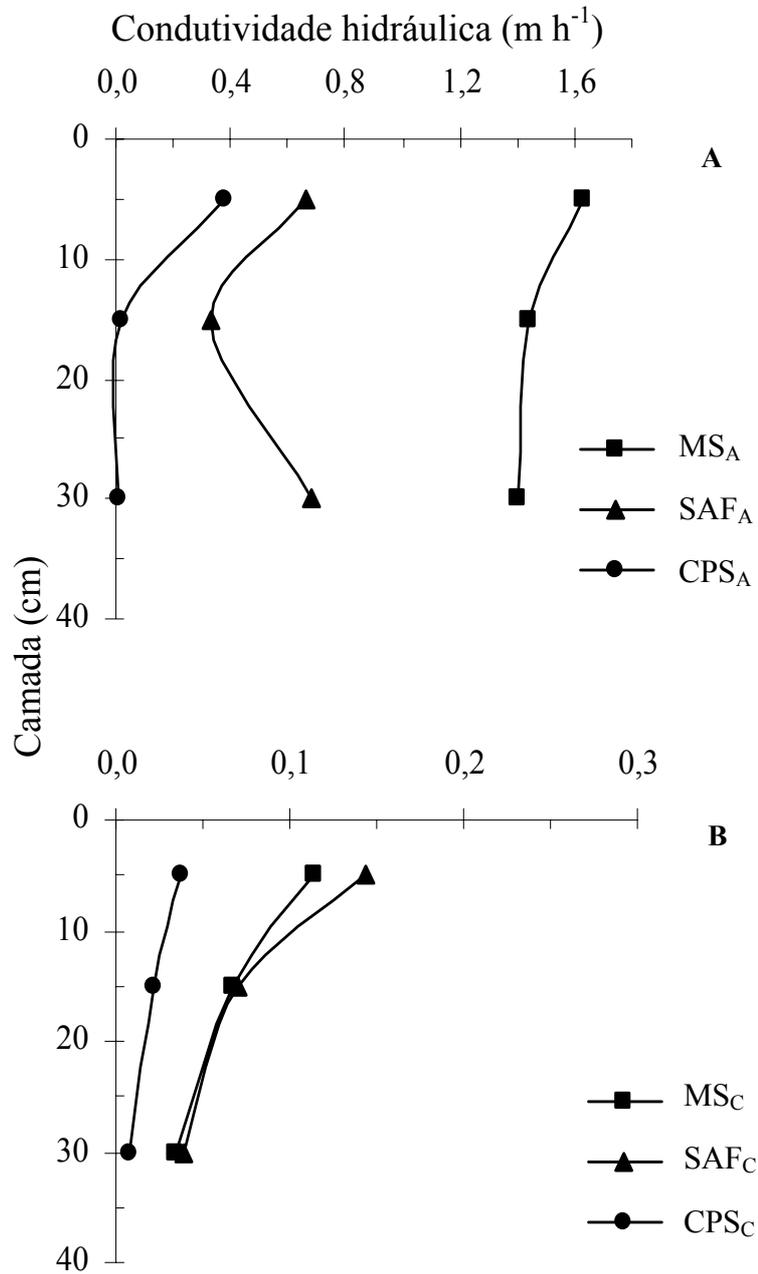


Figura 6– Valores médios de condutividade hidráulica do solo meio saturado ( $m h^{-1}$ ) obtidos em laboratório para os sistemas avaliados em Araponga (A): MS<sub>A</sub> mata secundária, SAF<sub>A</sub>, sistema agroflorestal, CPS<sub>A</sub> cultivo a pleno sol; e Choró (B) MS<sub>C</sub>, mata secundária; SAF<sub>C</sub>, sistema agroflorestal; CPS<sub>C</sub>, consórcio a pleno sol.

Quadro 11 – Significância dos contrastes C1 e C2, quadrado médio do resíduo (QM Res) e coeficiente de variação (CV), calculados para a condutividade hidráulica em meio saturado determinada em laboratório ( $K_0$ ) e em campo ( $K_C$ ) nos sistemas avaliados em Araponga e Choró

Camada cm	Condutividade hidráulica em meio saturado			
	C1	C2	Qm Res	CV (%)
<b>Araponga, MG</b>				
$K_0$ 0-10	**	ns		
$K_0$ 10-20	**	ns	3.404,05	81,3
$K_0$ 20-40	*	ns		
$K_C$ 0-30	**	ns	3.414,87	74,6
<b>Choró, CE</b>				
$K_0$ 0-10	ns	*		
$K_0$ 10-20	ns	ns	34,34	98,2
$K_0$ 20-40	ns	ns		
$K_C$ 0-30	o	*	103,08	48,32

C1 = MS vs (SAF + CPS); C2 = SAF vs CPS; CV = coeficiente de variação; \*\*, \*, o, ns = significativo ao nível de 1%; 5%; 10% e não significativo, respectivamente;  $K_0, K_C$  = Condutividade hidráulica do solo em meio saturado determinadas em laboratório e campo, respectivamente.

Quadro 12 – Valores médios de condutividade hidráulica do solo saturado em campo na camada de 0-30 cm para os usos do solo avaliados em Araponga e Choró

Uso do solo	$K_C$ m h <sup>-1</sup>
<b>Araponga, MG</b>	
<b>MS<sub>A</sub></b>	2,04
<b>SAF<sub>A</sub></b>	0,23
<b>CPS<sub>A</sub></b>	0,22
<b>Choró, CE</b>	
<b>MS<sub>C</sub></b>	0,30
<b>SAF<sub>C</sub></b>	0,26
<b>CPS<sub>C</sub></b>	0,08

MS<sub>A</sub>: mata secundária, SAF<sub>A</sub>: sistema agroflorestal, e CPS<sub>A</sub>: cultivo a pleno sol em Araponga; MS<sub>C</sub>: mata secundária, SAF<sub>C</sub>: sistema agroflorestal, e CPS<sub>C</sub>: cultivo a pleno sol em Choró.

caro (Carvalho et al., 2004a). No entanto, a utilização do permêmetro de Guelph diminuiu as dificuldades, pois exige para sua operação menos mão-de-obra, menor quantidade de água e é relativamente rápido.

Assim, em Araponga, como nos dados observados em laboratório ( $K_0$ ), os resultados de  $K_c$  para o solo sob mata foram os maiores. De acordo com a classificação do Soil Survey Staff (1993), conforme citação de Borges et al. (2005), os valores observados na mata caracterizam uma permeabilidade rápida ( $> 0,254 \text{ m h}^{-1}$ ). Já as áreas de  $SAF_A$  e  $CPS_A$  se enquadram na classe de permeabilidade moderada a rápida ( $0,254$  a  $0,127 \text{ m h}^{-1}$ ). Os valores identificados tanto em mata como nas áreas cultivadas no município mineiro são superiores ao observados por Borges et al. (2005), que verificaram para um Latossolo Vermelho sob vegetação remanescente de Floresta Atlântica, um valor médio de  $0,094 \text{ m h}^{-1}$  (permeabilidade moderada), e sob cana de açúcar, valor médio de  $0,036 \text{ m h}^{-1}$  (permeabilidade lenta a moderada).

Os dados de  $K_0$  obtidos em Choró (solo de textura arenosa) são visivelmente inferiores aos verificados em Araponga (solos de textura argilosa). Os valores de  $P_T$  e, em especial, os de  $P_{MA}$  obtidos justificam tal comportamento (Figura 5B). Os baixos teores de matéria orgânica e de argila prejudicam a existência de uma melhor agregação neste solo.

Considerando as áreas avaliadas no Ceará (Figura 6B), notam-se semelhanças entre a  $K_0$  de  $MS_C$  e  $SAF_C$ , ambas superiores aos obtidos para  $CPS_C$ . Embora a análise estatística (Quadro 11) indique valores de  $K_0$  significativamente maiores, entre  $SAF_C$  e  $CPS_C$ , apenas para a camada mais superficial (0-10 cm).

Já a avaliação efetuada em condição de campo ( $K_c$ ) identificou diferenças significativas entre as áreas avaliadas, sendo a condutividade hidráulica reduzida com a substituição da mata pelas áreas de cultivo, e reduzida ainda mais quando o solo é submetido ao consórcio a pleno sol (Quadro 12). Considerando estes resultados, as áreas  $SAF_C$  e  $MS_C$  apresentam permeabilidade rápida, enquanto a área  $CPS_C$  apresenta permeabilidade moderada (Soil Survey Staff, 1993, citado por Borges et al. 2005).

#### 4.6. Curva de retenção de água no solo e índice S

Os ajustes efetuados com o modelo proposto por Van Genuchten (1980) foram eficientes para descrever a curva de retenção de água nos solos dos diferentes usos e ambientes estudados (Figuras 7 e 8, Quadro 13).

Nas áreas estudadas em Araponga observa-se que o uso do solo provocou um acréscimo na capacidade de retenção da umidade no solo, ocasionando uma movimentação ascendente das curvas de água no solo, com  $CPS_A$  apresentando maiores valores de umidade (Figura 7). Esses resultados podem ser associados aos incrementos verificados nos valores de microporosidade (Figura 5A).

Os contrastes utilizados para testar os parâmetros do modelo de Van Genuchten foram significativos quanto à umidade residual ( $\theta_r$ ), que corresponde a água retida no solo no potencial de -1,5 MPa, considerado como equivalente ao ponto de murcha permanente. Isto indica uma maior umidade nas áreas cultivadas quando comparadas com a mata no referido potencial. Apesar de não ter sido feita a comparação estatística entre os valores de umidades retidas no potencial de -0,01 MPa (equivalente à capacidade de campo), os resultados indicam (Figura 7) que a água retida neste ponto também é maior à medida que se intensifica o manejo do solo. Fato semelhante foi observado por Oliveira et al. (2004) que, trabalhando com um Latossolo Vermelho, observaram que os solos cultivados em diferentes sistemas de manejo, quando comparados com o solo sob vegetação natural de cerrado, apresentaram maior retenção de água em toda a faixa de potencial correspondente à capacidade de campo (-0,006 a -0,01 MPa), possivelmente devido à redução na macroporosidade e aumento na porosidade de retenção de água (microporosidade) provocadas pelo cultivo.

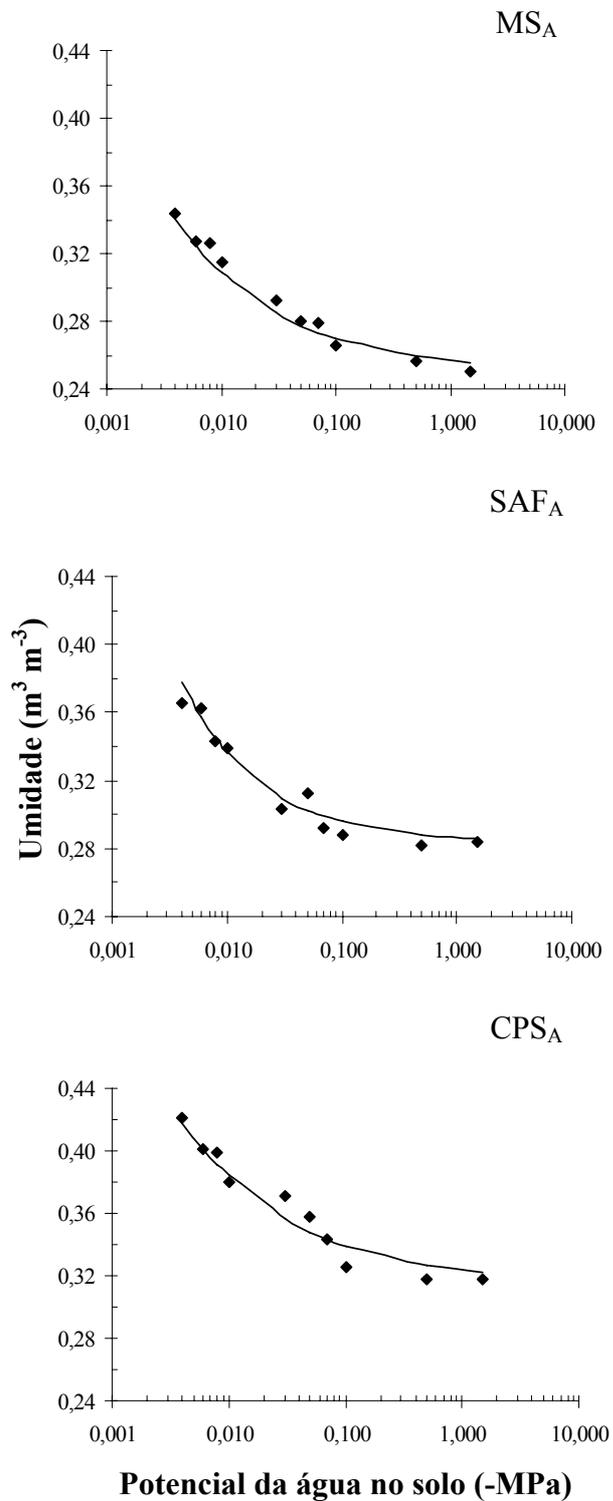


Figura 7 - Curva de retenção de água para os usos do solo avaliados em Araponga. Os pontos representam os dados observados e, a linha, a equação de ajuste conforme modelo de Van Genuchten. MS<sub>A</sub>: mata secundária; SAF<sub>A</sub>: sistema agroflorestal; CPS<sub>A</sub>: cultivos a pleno sol.

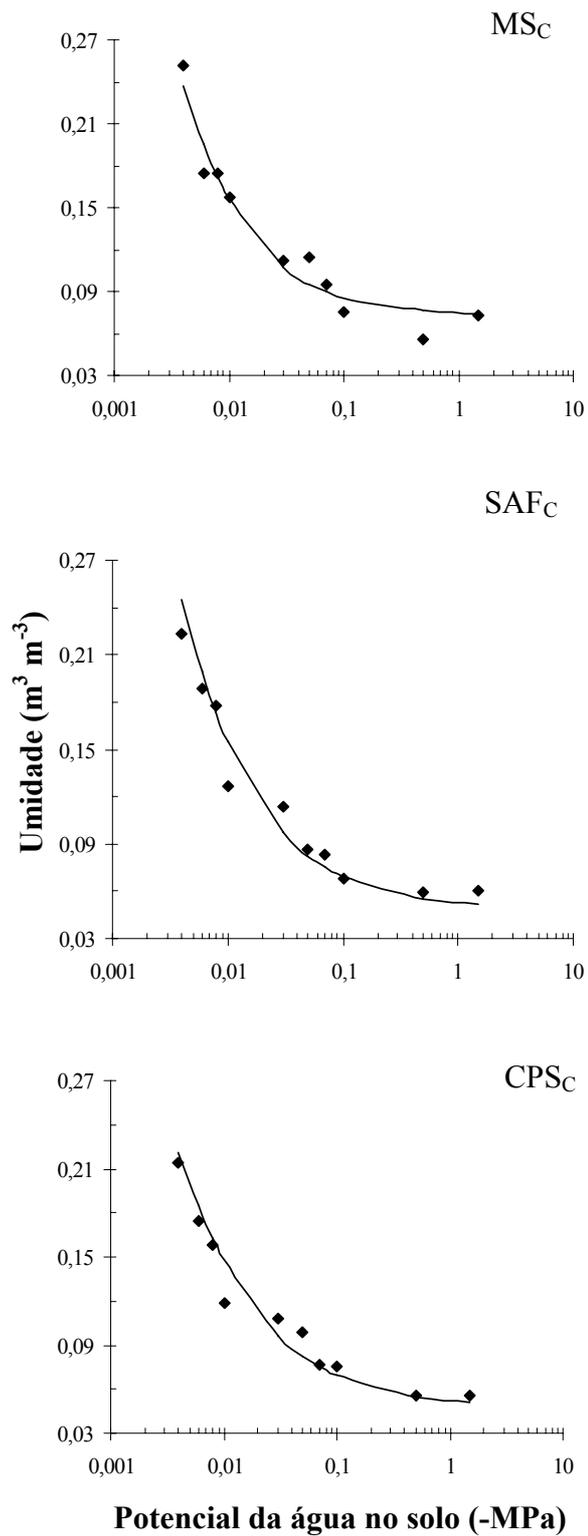


Figura 8 – Curva de retenção de água para os usos do solo avaliados em Choró. Os pontos representam os dados observados e, a linha, a equação de ajuste conforme modelo de Van Genuchten. MS<sub>C</sub>: mata secundária; SAF<sub>C</sub>: sistema agroflorestal; CPS<sub>C</sub>: consórcio a pleno sol.

Quadro 13 - Parâmetros de ajuste da curva de retenção de água no solo de acordo com o modelo proposto por Van Genuchten (1980) e significância dos contrastes C1 e C2, quadrado médio do resíduo (QM Res) e coeficientes de variação (CV) para esses parâmetros, nos sistemas avaliados em Araponga e Choró

	Parâmetros						Coeficiente de ajuste R <sup>2</sup>
	$\theta_s$	$\theta_r$	$\alpha$	m	n	S	
	----- cm <sup>3</sup>	cm <sup>-3</sup> -----	1/cm				
<b>Araponga, MG</b>							
MS <sub>A</sub>	0,65	0,25	0,5432	0,3224	1,4796	0,0905	0,986**
SAF <sub>A</sub>	0,59	0,28	0,1515	0,3905	1,6632	0,0896	0,971**
CPS <sub>A</sub>	0,54	0,32	0,1248	0,3137	1,4581	0,0492	0,930**
C1	**	**	**	ns	ns	o	
C2	*	**	ns	*	*	**	
QM Res	0,0009	0,0001	0,0303	0,0019	0,0140	0,0003	
CV (%)	4,9	3,4	63,7	12,7	7,7	21,1	
<b>Choró, CE</b>							
MS <sub>C</sub>	0,42	0,07	0,0569	0,4497	1,8267	0,1184	0,969**
SAF <sub>C</sub>	0,46	0,05	0,0624	0,3938	1,8401	0,1297	0,980**
CPS <sub>C</sub>	0,41	0,05	0,0701	0,3901	1,6734	0,1050	0,982**
C1	ns	*	ns	ns	ns	ns	
C2	o	ns	ns	ns	ns	ns	
QM Res	0,0010	0,0002	0,0003	0,0061	0,1240	0,0013	
CV (%)	7,2	25,1	28,9	19,1	19,8	30,8	

C1 = MS vs (SAF + CPS); C2 = SAF vs CPS; CV = coeficiente de variação; \*\*, \*, o, ns = significativo ao nível de 1%; 5%; 10% e não significativo, respectivamente;  $\theta_s$ : umidade na saturação;  $\theta_r$ : umidade no ponto de murcha permanente;  $\alpha$ , m e n: parâmetros empíricos; MS<sub>A</sub>: mata secundária, SAF<sub>A</sub>: sistema agroflorestal, e CPS<sub>A</sub>: cultivo a pleno sol em Araponga; MS<sub>C</sub>: mata secundária, SAF<sub>C</sub>: sistema agroflorestal, e CPS<sub>C</sub>: cultivo a pleno sol em Choró.

Quanto aos parâmetros  $m$  e  $n$ , diferenças estatísticas foram verificadas apenas entre as áreas cultivadas, com maior valor na área sob SAF<sub>A</sub>. O significado desses parâmetros ainda não é muito claro, sendo normalmente negligenciado nos trabalhos disponíveis na literatura, o que dificulta maiores discussões.

Com relação ao índice  $S$  (indicador de qualidade do solo), em Araponga, os dados obtidos (Quadro 13) indicaram maior valor para o solo sob mata (MS<sub>A</sub>), significativamente superior ao observado para SAF<sub>A</sub> e CPS<sub>A</sub>, e entre as áreas cultivadas, com maior valor na área de manejo agroflorestal. Silva et al. (2007) também observaram maior índice  $S$  em solo sob SAF comparativamente ao solo submetido ao manejo convencional (pleno sol) e semelhante ao observado em solo sob vegetação natural. Estes resultados sugerem melhor estado físico do solo sob mata e indicam o potencial dos SAFs em melhorar esta condição em relação ao cultivo a pleno sol, uma vez que maiores valores de  $S$  indicam uma maior estruturação do solo, por ser este índice relacionado com a microestrutura do solo (Dexter, 2004). Os resultados apresentados nas áreas de estudo podem ser também relacionados com os teores de COT (Figura 2A) e Ds (Figura 3A), concordando com Silva et al. (2007) e Machado (2006), que mostram uma correlação positiva do índice  $S$  com o COT, assim como uma correlação negativa do referido índice com a densidade do solo.

Em Choró, as curvas de retenção de água foram semelhantes nos diferentes usos do solo avaliados (Figura 8). A ausência de alterações pode ser associada às pequenas variações verificadas nos valores de  $P_T$ ,  $P_{MA}$  e  $P_{MI}$  deste solo. Seguindo essa mesma tendência, os parâmetros de ajuste do modelo de Van Genuchten foram semelhantes para as três áreas avaliadas no semi-árido cearense. As únicas exceções foram verificadas na comparação entre os valores de  $\theta_s$  entre os cultivos SAF<sub>C</sub> e CPS<sub>C</sub> e nos valores de  $\theta_r$  entre a MS<sub>C</sub> e os cultivos (SAF<sub>C</sub> e CPS<sub>C</sub>), com maior  $\theta_s$  na área SAF<sub>C</sub> em relação a CPS<sub>C</sub> e maior  $\theta_r$  na mata em relação às áreas cultivadas.

#### 4.7. Resistência do solo à penetração e umidade do solo

Para todas as áreas avaliadas nos dois biomas estudados, observou-se aumento da resistência do solo à penetração (RP) no período seco, sendo que nas áreas cultivadas este aumento foi bem mais pronunciado (Figuras 9A e 10A). Isto evidencia o efeito da umidade do solo sobre a RP, principalmente quando o solo é submetido à ação antrópica.

Em Araponga, as áreas sob cultivo de café apresentaram maiores RP que a área de mata, nos dois períodos avaliados (Figura 9A). Registros na literatura mostram aumentos nos valores de RP em sistemas cultivados, quando comparadas com a condição natural do solo (Martins et al., 2001; Pedrotti et al., 2002). Comparando-se as áreas cultivadas, SAF<sub>A</sub> e CPS<sub>A</sub>, nota-se que o comportamento da RP foi semelhante, com uma pequena redução na primeira.

De um modo geral, os aumentos de RP foram influenciados pelos menores teores de umidade (Figura 9B), no entanto, o exame de comportamentos peculiares de algumas das áreas indica que outros fatores podem estar determinando os resultados obtidos. A área sob mata, por exemplo, apresentou no período úmido a menor RP, mesmo sendo esta a área onde a umidade foi menor. Outra situação é a verificada para a área CPS<sub>A</sub>, para a qual a umidade é menor na camada mais superficial, que foi justamente a que ofereceu menor RP. Além da umidade, a D<sub>s</sub>, assim como a macroporosidade devem ser consideradas na avaliação da RP. A área MS<sub>A</sub>, mesmo tendo menor umidade, apresenta elevada P<sub>MA</sub> e baixa D<sub>s</sub>, o que pode ter permitido a obtenção de menores valores de RP. Da mesma forma, o aumento de D<sub>s</sub> e a redução da P<sub>MA</sub> em profundidade verificadas na área CPS<sub>A</sub>, possivelmente, podem ter ocasionado o aumento da RP nas camadas inferiores do solo.

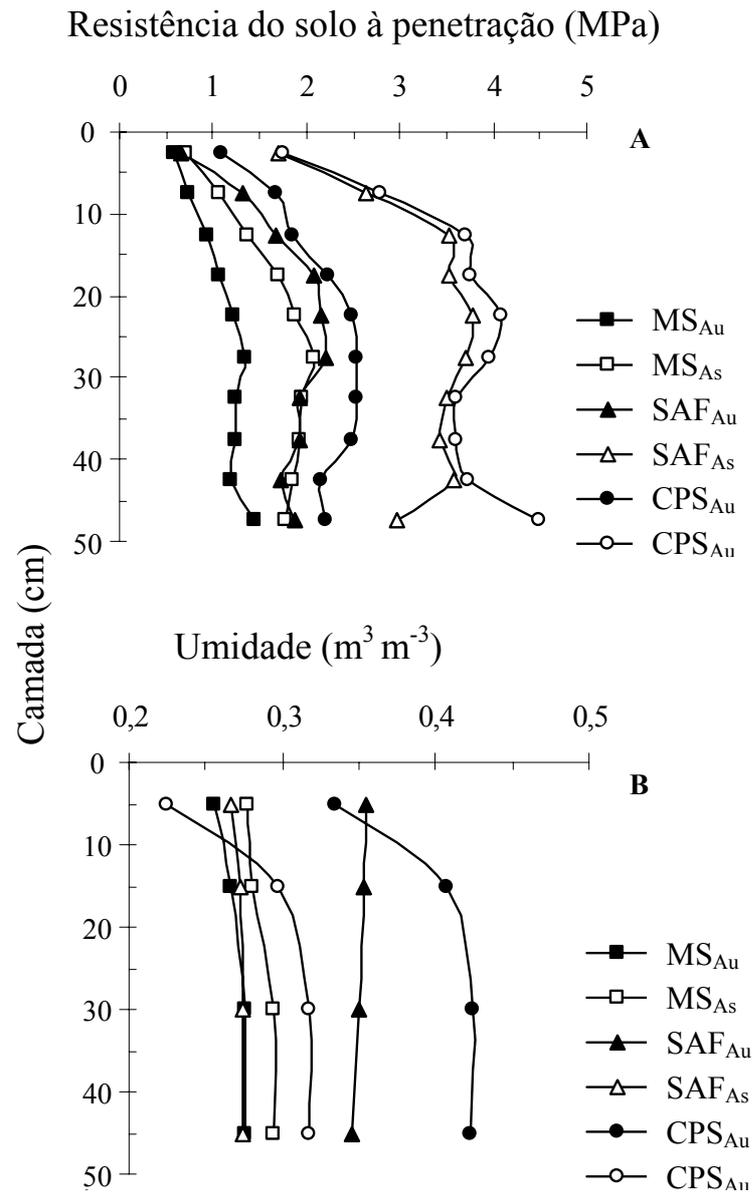


Figura 9 – Resistência do solo à penetração (A) e umidade volumétrica do solo (B) observados em dois períodos do ano (u: período úmido e s: período seco);  $MS_A$ : mata secundária;  $SAF_A$ : sistema agroflorestal;  $CPS_A$ : cultivo a pleno sol, em Araçonga.

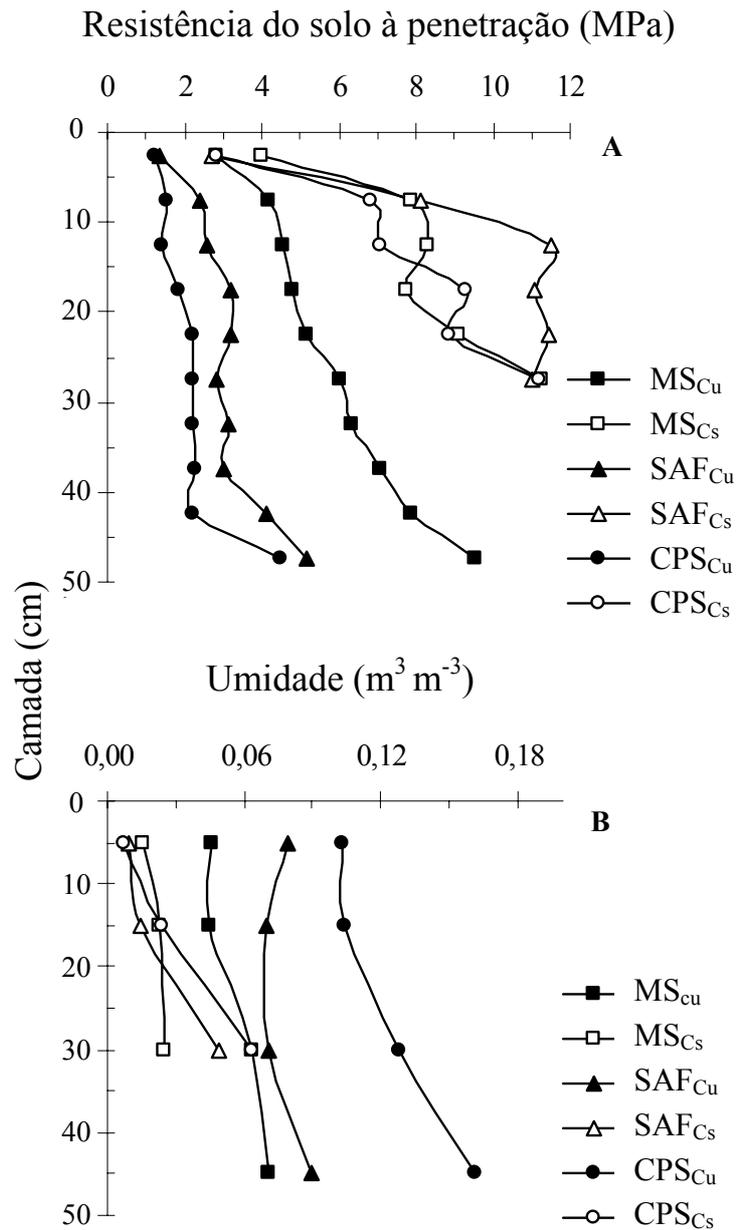


Figura 10 - Resistência do solo à penetração (A) e umidade volumétrica do solo (B) observados em dois períodos do ano (u: período úmido e s: período seco); MS<sub>C</sub>: mata secundária; SAF<sub>C</sub>: sistema agroflorestal; CPS<sub>C</sub>: consórcio a pleno sol em Choró.

Valores de resistência à penetração superiores aos comumente citados na literatura como críticos (2,0 MPa) foram observados para as áreas SAF<sub>A</sub> e CPS<sub>A</sub> a partir das camadas de 15 a 20 cm, no período úmido, e de 5 a 10 cm, no período chuvoso. Entretanto, Tavares Filho et al. (2001) ressaltam que mesmo sendo detectados valores restritivos de RP, caso existam estruturas que permitam a difusão de oxigênio, e condições químicas e de umidade aceitáveis, as raízes terão seu crescimento mantido por meio de pontos de menor resistência, porém podendo apresentar deformações morfológicas.

Os autores anteriormente mencionados ponderam também que a RP obtida pelo penetrômetro é normalmente maior que a resistência real exercida pelo solo à penetração das raízes. Eles verificaram que o desenvolvimento radicular do milho não foi restringido em solo com RP superior a 3,5 MPa, porém, nestes valores a morfologia do sistema radicular foi prejudicada. Effegen (2006) consideraram, em um Latossolo Vermelho distrófico, que valores acima de 5,1 MPa era restritiva ao desenvolvimento radicular do cafeeiro. No presente estudo, os maiores valores observados nos sistemas avaliados em Araponga foram de 2,2 e 3,8 MPa para o SAF<sub>A</sub> nos períodos úmido e seco, respectivamente, e de 2,6 e 4,5 MPa para o CPS<sub>A</sub> nos períodos úmido e seco, respectivamente, enquanto que na MS<sub>A</sub> o maior valor foi de 2,1 MPa observado no período seco, sendo que no período úmido foram todos menores que 1,5 MPa. Os valores intermediários observados no SAF<sub>A</sub> podem ser um indicativo de recuperação da estrutura do solo desta área.

Os dados de umidade obtidos na área estudada em Araponga (Figura 9B) sugerem um ressecamento rápido do solo na camada próxima a superfície na área de cultivo a pleno sol, enquanto que no SAF<sub>A</sub> a umidade é uniforme em todo o perfil analisado, além disso, com exceção da primeira camada, os valores de umidade são maiores para CPS<sub>A</sub>. A menor umidade do solo na superfície do CPS<sub>A</sub> pode ser devido a maior evaporação da água, ocorrida devido a incidência direta do sol sobre a superfície do solo, uma vez que os resíduos oriundo da roçagem das espécies espontâneas não são suficientes para promover uma cobertura eficiente do solo, enquanto que no SAF<sub>A</sub> o solo está totalmente coberto pela manta de serapilheira (proveniente das árvores), diminuindo o efeito da evaporação. Já nas camadas mais profundas a diminuição da umidade do solo ocorrerá mais pela absorção e

transpiração das plantas sendo provável que no SAF<sub>A</sub> o consumo de água pelas árvores provoque a menor umidade em profundidade.

Apesar das árvores no SAF<sub>A</sub> reduzirem a umidade do solo em profundidade, é provável que o sombreamento reduza a demanda de água do café, uma vez que sob estas condições este terá menor transpiração. Jaramillo & Chávez (1999) reportam não haver deficiência de água no solo para um cafezal sombreado com *Inga* sp, durante períodos críticos de umidade, e Neves et al. (2007), avaliando a umidade do solo em sistemas de cafeeiro consorciado com fedegoso, bananeira e ipê-preto e em cultivo convencional, na Zona da Mata mineira, observaram uma pequena diferença no teor de água entre os sistemas estudados, indicando que para região e espécies estudadas, a água não seria um fator limitante para o cultivo consorciado do cafeeiro.

Apesar de a textura arenosa predominar nos solos de Choró, os valores de RP da área foram consideravelmente superiores aos observados em Araponga. A RP é uma característica do solo que está relacionada com sua textura, sendo esperado que solos argilosos apresentem maior RP devido à maior manifestação da coesão entre as partículas de argila em relação às de areia (Pedrotti et al., 2001). Neste sentido a presença da ilita nos solos de Choró (Figura 1) pode ter contribuído para algum efeito sobre a coesão deste solo, ainda que se trate de um solo mais grosseiro. Por outro lado, a RP também é influenciada pela estrutura do solo, e desta forma, solos argilosos que apresentem uma boa estruturação podem apresentar melhor condição para a penetração de raízes, conferindo menores densidades e menor valor de RP, como parece ser o caso das áreas de Araponga.

A observação feita no período úmido em Choró revelou maior RP na área de mata, enquanto que nas áreas cultivadas houve similaridade que se expressa mais em superfície, diminuindo com o aumento de profundidade. Apesar da similaridade entre as áreas cultivadas, os maiores valores de RP foram apresentados na SAF<sub>C</sub>. Esse comportamento pode ser associado à umidade no momento da realização dos ensaios, que foram maiores na área CPS<sub>C</sub> (0,12 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) seguida da área SAF<sub>C</sub> (0,08 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) e MS<sub>C</sub> (0,06 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>). Muito embora esses valores apresentem apenas uma pequena disparidade de umidade, no caso de um solo jovem, raso e com pouca argila, tal diferença pode passar a exercer papel fundamental quanto à RP. Como a capacidade de armazenamento de água do solo é limitada, plantas de maior capacidade de absorção de água, como é o caso das árvores nativas da Caatinga na

mata e no SAF<sub>C</sub>, reduzem mais rapidamente a umidade do solo, incrementando, desta forma, a RP. Outro fator a ser considerado para a redução da umidade do solo é a interceptação da chuva pela parte aérea das plantas. É provável que as árvores presentes em MS<sub>C</sub> e SAF<sub>C</sub> proporcionam maior interceptação da água precipitada, reduzindo desta forma, a quantidade de chuva que alcança o solo e que eventualmente se infiltra no mesmo.

Maiores valores de RP em mata de Caatinga são reportados por outros autores (Otutumi et al., 2004), assim como pelos próprios agricultores locais, que indicam maior dificuldade de cultivo com utensílios manuais em áreas recém desmatadas, reduzida com o uso do solo ao longo dos anos.

Os resultados verificados no período seco não podem ser totalmente explicados pela umidade do solo. Neste período, a umidade na MS<sub>C</sub> não variou, mantendo-se igual a 0,02 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> em todo o perfil estudado, enquanto que na área SAF<sub>C</sub> variou de 0,01 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> nas camadas mais superficiais até 0,05 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup> na camada mais profunda. Já na área CPS<sub>C</sub>, a umidade foi de 0,01 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, na camada 0 a 0,10 m, e 0,06 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>, na camada de 20 a 30 cm. A resistência à penetração não apresentou comportamento uniforme entre as áreas, sendo na primeira camada (5 a 10 cm) verificada situação semelhante à observada no período úmido, ou seja, na área sob mata foram obtidos os maiores valores, seguida do SAF<sub>C</sub> e CPS<sub>C</sub>; na camada de 10 a 15 cm, a RP de SAF<sub>C</sub> praticamente se igualou à da mata, enquanto a do CPS<sub>C</sub> foi menor; nas camadas intermediárias, os valores de SAF<sub>C</sub> superaram os da mata e os valores de CPS<sub>C</sub> permaneceram inferiores. Já na última camada avaliada (25 a 30 cm) o resultado das três áreas foi semelhante.

Os dados de RP apresentados nos diferentes usos do solo em Choró foram elevados, superando, em sua grande maioria, o valor de 3,5 MPa, considerado crítico para o desenvolvimento da cultura do milho (Tavares Filho et al., 2001). Entretanto, durante o período úmido, nas áreas SAF<sub>C</sub> e CPS<sub>C</sub> os valores de RP foram menores que 3,5 MPa desde a superfície até a camada de 35 a 40 cm, possibilitando o desenvolvimento das culturas.

#### 4.8. Intervalo hídrico ótimo

O aumento da densidade do solo provoca simultaneamente redução na porosidade de aeração (PA) e incremento na resistência do solo à penetração, sendo, este efeito, mais pronunciado nas áreas de cultivo onde há maior ação antrópica (Figuras 11 e 12), concordando com o apresentado na literatura (Tormena et al., 1998; 1999; Araújo et al., 2004a; Leão et al., 2004).

Porosidade de aeração ( $\theta_{PA}$ ) menor que a limitante ( $\leq 10\%$ ) ocorreu apenas na área CPS<sub>A</sub>, quando a Ds atingiu valor de 1,26 kg dm<sup>-3</sup>. Isto indica que, com exceção desta área, o desenvolvimento radicular das plantas não sofrerá restrições quanto a aeração nas demais áreas avaliadas, nos diferentes valores de Ds obtidos. A RP, consideravelmente influenciada pela Ds, definiu o limite inferior do IHO e, portanto, pode estar limitando o desenvolvimento das raízes na maioria das áreas avaliadas, em especial nas áreas cultivadas. Efeitos semelhantes a estes são reportados na literatura (Tormena et al., 1998; 1999; Araújo et al., 2004a; 2004b; Leão et al., 2004) que trata da caracterização e avaliação do IHO em Latossolos sobre diferentes coberturas vegetais (cultivados, pastagens, mata).

A Ds é reflexo da porosidade total e da distribuição do tamanho dos poros no solo (Tormena et al., 1998). Este efeito foi notado nos gráficos de IHO onde, de uma forma geral, a retenção de umidade tende a aumentar com o incremento de Ds. Incrementos nos valores de Ds são associados à redução na macroporosidade, resultando em maior quantidade de poros de menor diâmetro, além de proporcionarem maior número de partículas sólidas por unidade de volume de solo, que são capazes de formar ligações com a água. Desta forma, a combinação destes fatores contribui para elevar a umidade retida no solo (Silva & Kay, 1997; Neves Junior, 2005) com o aumento da Ds.

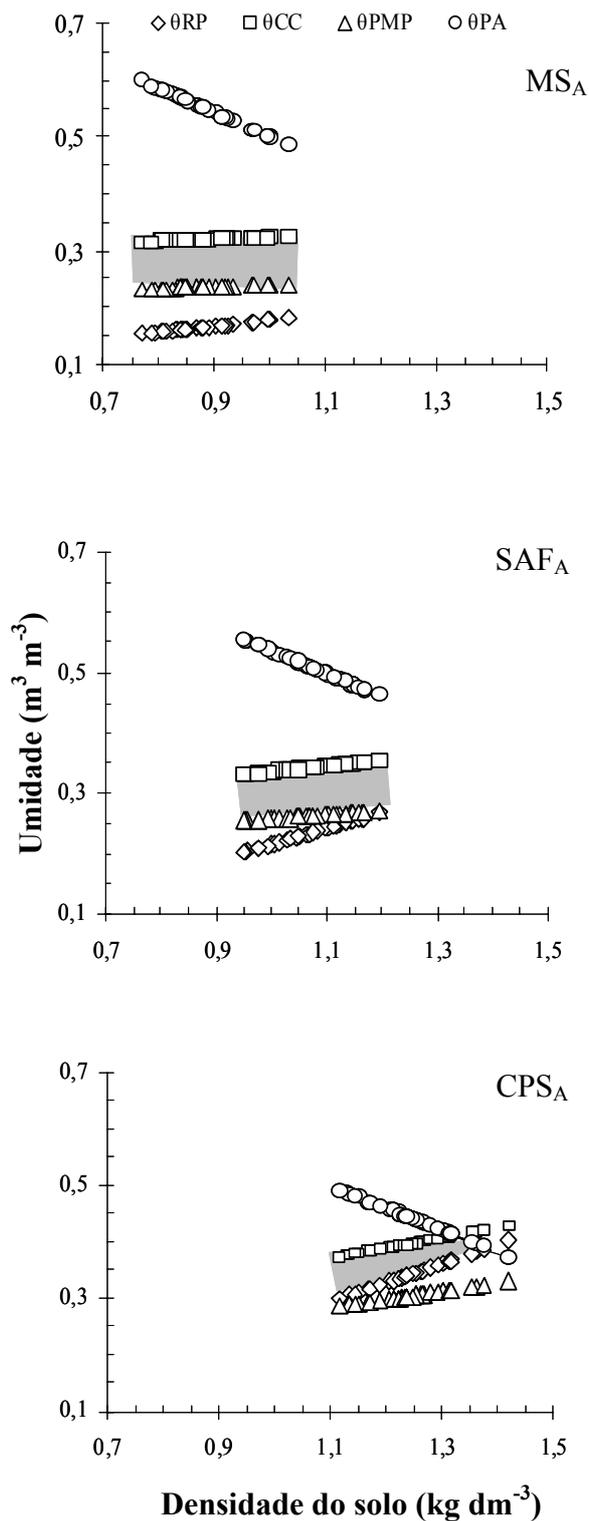


Figura 11 – Variação do conteúdo de água com a densidade do solo (Ds) nos níveis críticos de capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ;  $\psi = -0,01$  MPa), ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ;  $\psi = -1,5$  MPa), porosidade de aeração de 10% ( $\theta_{PA}$ ) e resistência à penetração de 2,0 MPa ( $\theta_{RP}$ ), observados nas áreas de Araponga. A área hachurada representa o intervalo hídrico ótimo (IHO).  $MS_A$ : mata secundária,  $SAF_A$ : sistema agroflorestal e  $CPS_A$ : cultivo a pleno sol em Araponga.

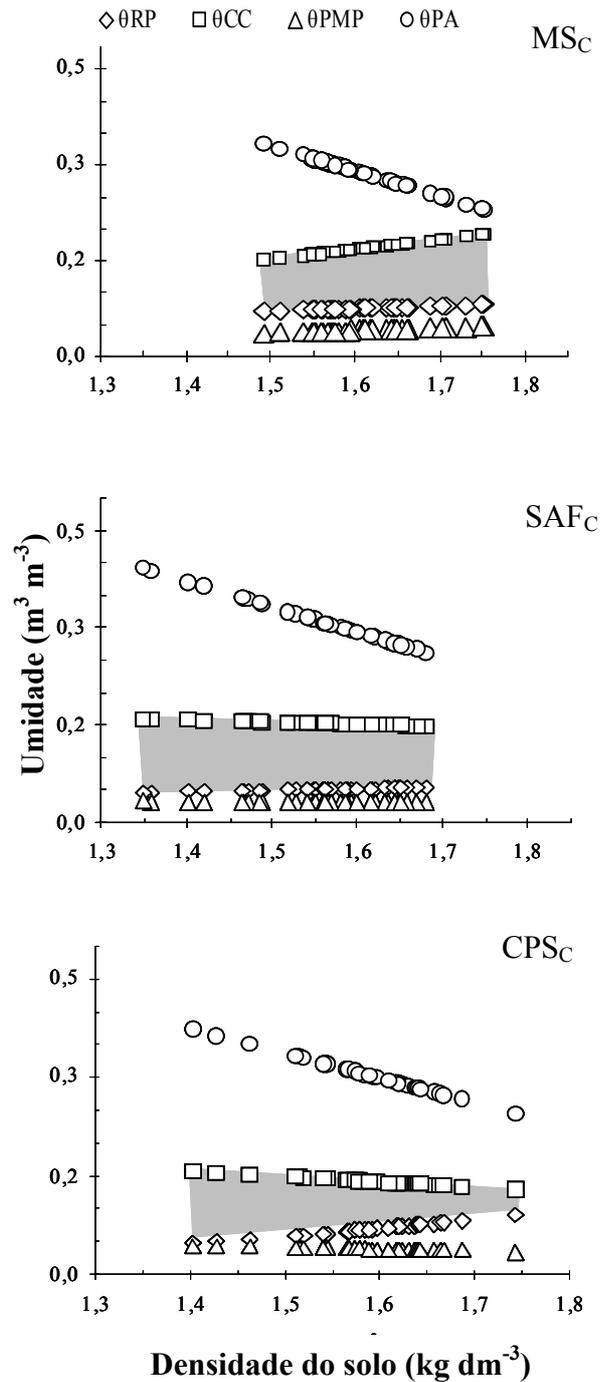


Figura 12 – Variação do conteúdo de água com a densidade do solo ( $D_s$ ) nos níveis críticos de capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ;  $\psi = -0,01$  MPa), ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ;  $\psi = -1,5$  MPa), porosidade de aeração de 10% ( $\theta_{PA}$ ) e resistência à penetração de 2,0 MPa ( $\theta_{RP}$ ), observados nas áreas de Choró. A área hachurada representa o intervalo hídrico ótimo (IHO).  $MS_C$ : mata secundária,  $SAF_C$ : sistema agroflorestal e  $CPS_C$ : consórcio a pleno sol em Choró.

Nota-se homogeneidade nos valores de IHO em toda a faixa de  $D_s$  apresentada em  $MS_A$  e  $SAF_A$ , assim como uma semelhança entre estas áreas quanto ao valor total de IHO, mesmo com intervalo de  $D_s$  em maiores valores no  $SAF_A$ . Nas áreas avaliadas em Araponga, o IHO foi equivalente a  $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  nas áreas  $MS_A$  e  $SAF_A$ , constante ao longo da faixa de  $D_s$  obtida em cada área. Na área  $CPS_A$ , a amplitude de valores foi de 0 a  $0,07 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ .

Para a área de mata ( $MS_A$ ),  $\theta_{RP}$  e  $\theta_{PA}$  não apresentaram restrições ao desenvolvimento das raízes, uma vez que os limites superiores e inferiores do IHO foram delimitados unicamente pelos valores correspondentes às umidades na capacidade de campo ( $\theta_{CC}$ ) e no ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ). A mesma situação foi observada para o  $SAF_A$ , à exceção do ponto de maior  $D_s$  verificado ( $1,14 \text{ kg dm}^{-3}$ ), onde a  $\theta_{RP}$  igualou-se à  $\theta_{PMP}$ . Resultado semelhante foi verificado por Araújo et al. (2004a), que verificaram para um Latossolo Vermelho distrófico sob mata nativa, que praticamente em toda variação de  $D_s$  considerada, o IHO foi delimitado pelas umidades correspondentes à  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{PMP}$ , o que os autores associaram às boas condições físicas da área.

Os resultados observados para o  $SAF_A$ , semelhantes aos da  $MS_A$ , indicam um restabelecimento da qualidade física do solo tendo em vista que o solo sobre o qual este manejo foi adotado encontrava-se em estado de degradação pelo plantio sucessivo de arroz.

A área sob cultivo a pleno sol ( $CPS_A$ ) apresentou os menores valores de IHO em toda a faixa de densidade apresentada. Nesta, o IHO foi definido com o limite superior dado pela  $\theta_{CC}$  e, o inferior pela  $\theta_{RP}$ , até a  $D_s$  de  $1,26 \text{ kg dm}^{-3}$ , a partir deste ponto, a  $\theta_{PA}$  passou a definir o limite superior do IHO. Valores de  $D_s$  iguais ou superiores a  $1,32 \text{ kg dm}^{-3}$  ocasionaram um IHO equivalente à zero, o que caracteriza a  $D_s$  crítica, ou seja, aquela que teoricamente não permite o desenvolvimento radicular independente das demais condições do solo. Uma vez que nesta situação a difusão de oxigênio poderá ser insatisfatória, assim como a RP impeditiva ao adequado crescimento das raízes.

Nas áreas de Choró, o IHO teve seus limites definidos em todas as áreas avaliadas pelas umidades equivalentes à  $\theta_{CC}$  e  $\theta_{RP}$ , em toda a amplitude de valores de  $D_s$  observada. As áreas  $MS_C$  e  $SAF_C$  apresentaram valor de IHO praticamente

constante, mesmo com o incremento dos valores de  $D_s$ . No caso da área  $CPS_C$ , o IHO foi reduzido com o aumento da densidade do solo, porém não atingindo um valor zero ( $D_s$  crítica).

A amplitude de valores de IHO variou de 0,07 a 0,11  $m^3 m^{-3}$  para a área  $MS_C$ ; de 0,09 a 0,11  $m^3 m^{-3}$  para  $SAF_C$  e, de 0,04 a 0,11  $m^3 m^{-3}$ , para  $CPS_C$ . Esses valores foram ligeiramente superiores aos observados para as áreas de Araponga, o que não era esperado tendo em vista a natureza argilosa dos Latossolos da última área. Segundo Tormena et al. (1998) os Latossolos argilosos apresentam microagregação bastante desenvolvida comportando-se similarmente aos solos arenosos em termos de retenção de água. Estes autores encontraram valores semelhantes aos aqui obtidos para um Latossolo Roxo de textura argilosa e, no mesmo trabalho, citam o estudo de Silva et al. (1994), que também verificaram similares aos do presente estudo.

#### **4.9. Estabilidade de agregados**

Todas as áreas estudadas em Araponga apresentaram valores elevados de diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA) (Quadro 14), sendo estes superiores aos comumente observados na literatura (Castro Filho et al., 1998; Dufranc et al., 2004; Wendling et al., 2005). Estes elevados índices são resultantes da ocorrência das duas classes de agregados maiores (4-2 e 2-1 mm; Quadro 15), influenciando todos os índices, uma vez que DMP é tanto maior quanto maior for a percentagem de agregados grandes, enquanto o DMG representa uma estimativa das classes de agregados de maior ocorrência (Castro Filho et al., 1998).

O solo da área sob mata ( $MS_A$ ) diferiu das áreas cultivadas quanto ao DMP e DMG nas duas camadas inferiores (Quadro 16), o que era esperado tendo em vista o manejo adotado e a redução dos valores de COT, que contribuem para a agregação. Wendling et al. (2005) também observaram que solos cultivados tiveram seus índices de agregação reduzidos em relação à mata nativa.

Quadro 14 – Diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA) nas áreas avaliadas nos municípios de Araponga e Choro

	DMP	DMG	IEA
<b>Araponga, MG</b>			
----- 0-10 cm -----			
<b>MS<sub>A</sub></b>	2,63	2,59	98,7
<b>SAF<sub>A</sub></b>	2,52	2,34	98,4
<b>CPS<sub>A</sub></b>	2,39	2,22	98,5
----- 10-20 cm -----			
<b>MS<sub>A</sub></b>	2,62	2,44	98,1
<b>SAF<sub>A</sub></b>	2,18	1,97	97,1
<b>CPS<sub>A</sub></b>	2,17	2,00	98,2
----- 20-40 cm -----			
<b>MS<sub>A</sub></b>	2,44	2,25	98,1
<b>SAF<sub>A</sub></b>	1,96	1,77	97,2
<b>CPS<sub>A</sub></b>	1,91	1,78	98,1
<b>Choró, CE</b>			
----- 0-10 cm -----			
<b>MS<sub>C</sub></b>	1,96	1,63	91,44
<b>SAF<sub>C</sub></b>	1,86	1,50	89,90
<b>CPS<sub>C</sub></b>	2,01	1,65	91,07
----- 10-20 cm -----			
<b>MS<sub>C</sub></b>	1,61	1,28	87,33
<b>SAF<sub>C</sub></b>	1,47	1,19	86,48
<b>CPS<sub>C</sub></b>	1,60	1,25	85,42
----- 20-40 cm -----			
<b>MS<sub>C</sub></b>	1,29	1,06	84,03
<b>SAF<sub>C</sub></b>	1,56	1,27	87,49
<b>CPS<sub>C</sub></b>	1,22	0,98	82,52

MS<sub>A</sub>: mata secundária, SAF<sub>A</sub>: sistema agroflorestal e CPS<sub>A</sub>: cultivo a pleno sol em Araponga; MS<sub>C</sub>: mata secundária, SAF<sub>C</sub>: sistema agroflorestal e CPS<sub>C</sub>: consórcio a pleno sol em Choró.

Quadro 15 – Distribuição das classes de tamanho dos agregados obtida nos diferentes usos do solo avaliados nos municípios de Araponga e Choró

Uso do solo	Classe de tamanho dos agregados (mm)					
	4 – 2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,105	< 0,105
-----Distribuição dos agregados (%)-----						
<b>Araponga, MG</b>						
----- 0-10 cm -----						
<b>MS<sub>A</sub></b>	78,5	16,9	1,6	1,1	0,6	1,3
<b>SAF<sub>A</sub></b>	75,1	13,9	5,5	2,8	1,2	1,5
<b>CPS<sub>A</sub></b>	67,9	19,1	6,4	3,7	1,5	1,4
----- 10-20 cm -----						
<b>MS<sub>A</sub></b>	79,1	15,3	1,9	1,1	0,7	1,9
<b>SAF<sub>A</sub></b>	57,5	23,9	9,2	4,8	1,8	2,9
<b>CPS<sub>A</sub></b>	57,8	22,0	10,8	5,2	2,3	1,8
----- 20-40 cm -----						
<b>MS<sub>A</sub></b>	68,9	22,1	3,8	2,1	1,2	1,8
<b>SAF<sub>A</sub></b>	49,7	29,3	10,9	5,3	2,0	2,0
<b>CPS<sub>A</sub></b>	45,8	25,3	15,7	8,1	3,2	1,9
<b>Choró, CE</b>						
----- 0-10 cm -----						
<b>MS<sub>C</sub></b>	53,3	18,1	5,6	7,4	7,3	8,3
<b>SAF<sub>C</sub></b>	48,6	19,4	7,7	6,9	7,7	9,8
<b>CPS<sub>C</sub></b>	53,4	22,3	4,2	5,4	6,0	8,6
----- 10-20 cm -----						
<b>MS<sub>C</sub></b>	39,9	18,5	9,8	9,7	10,1	12,3
<b>SAF<sub>C</sub></b>	34,4	19,0	11,0	10,8	11,6	13,1
<b>CPS<sub>C</sub></b>	40,4	17,5	7,1	9,3	11,7	14,1
----- 20-40 cm -----						
<b>MS<sub>C</sub></b>	28,7	15,9	12,5	14,5	12,9	15,5
<b>SAF<sub>C</sub></b>	39,6	14,3	10,1	11,9	12,1	12,1
<b>CPS<sub>C</sub></b>	24,6	21,4	8,8	12,8	15,4	16,9

MS<sub>A</sub>: mata secundária, SAF<sub>A</sub>: sistema agroflorestal e CPS<sub>A</sub>: cultivo a pleno sol em Araponga; MS<sub>C</sub>: mata secundária, SAF<sub>C</sub>: sistema agroflorestal e CPS<sub>C</sub>: consórcio a pleno sol em Choró.

Quadro 16 – Avaliação da significância dos contrastes C1 e C2, quadrado médio do resíduo (QM Res) e coeficiente de variação (CV), calculados para diâmetro médio ponderado (DMP), diâmetro médio geométrico (DMG) e índice de estabilidade de agregados (IEA) observados nos sistemas avaliados em Araponga e Choro

	DMP	DMG	IEA
<b>Araponga, MG</b>			
----- 0-10 cm -----			
C1	ns	o	ns
C2	ns	ns	ns
----- 10-20 cm -----			
C1	**	**	ns
C2	ns	ns	ns
----- 20-40 cm -----			
C1	**	**	ns
C2	ns	ns	ns
QM Res	0,0714	0,0742	1,0474
CV (%)	11,6	19,7	1,0
<b>Choro, CE</b>			
----- 0-10 cm -----			
C1	ns	ns	ns
C2	ns	ns	ns
----- 10-20 cm -----			
C1	ns	ns	ns
C2	ns	ns	ns
----- 20-40 cm -----			
C1	ns	ns	ns
C2	ns	ns	ns
QM Res	0,1216	0,0862	17,95
CV (%)	21,5	22,4	4,9

C1 = MS vs (SAF + CPS); C2 = SAF vs CPS; CV = coeficiente de variação; \*\*, \*, <sup>o</sup>, ns = significativo ao nível de 1%; 5%; 10% e não significativo, respectivamente. nível de 1%; 5%; 10% e não significativo, respectivamente.

Os índices DMP e DMG não diferiram entre as áreas cultivadas SAF<sub>A</sub> e CPS<sub>A</sub> (Quadro 16). Já o índice IEA não indicou diferenças entre a mata (MS<sub>A</sub>) e as áreas cultivadas e nem entre essas últimas. Wendling et al. (2005) ponderam ser o IEA um indicador menos sensível que os demais para expressar modificações provocadas na estabilidade dos agregados em função dos usos e manejos do solo, talvez por ser este calculado com base apenas na classe de agregados menores que 0,105 mm, determinada por diferença, e que engloba, além dos agregados, a argila dispersa durante o processo de agitação da amostra.

A redução nos valores de DMP e DMG com a profundidade (Quadro 14), com efeito mais pronunciado nas áreas cultivadas, pode ser associada à redução dos teores de COT, como relatado por Wendling et al. (2005) e Maia et al. (2006).

Os resultados observados para as áreas de Araçuaia sugerem uma boa resistência dos agregados dos solos à ação da água, uma vez que considerando as três camadas avaliadas, as duas classes de agregados de maior diâmetro contribuíram com mais de 94, 83 e 79% dos agregados totais para as áreas MS<sub>A</sub>, SAF<sub>A</sub> e CPS<sub>A</sub>, respectivamente (Quadro 15). Não foram observadas diferenças significativas para as três áreas quanto à distribuição das diferentes classes de agregados na camada superior do solo (Quadro 17) sendo, no entanto, nas duas maiores profundidades, verificada superioridade da mata em relação às áreas cultivadas (C1), em especial das classes de maior tamanho. A ausência de significância na primeira camada, embora não esperada, pode ter ocorrido devido ao elevado coeficiente de variação observado para algumas destas classes.

Para as áreas de Choró não houve diferenças significativas para os índices de agregação avaliados (Quadro 16), assim como para a distribuição de tamanho de classes de agregados (Quadro 17). Vale ressaltar que o solo destas áreas é composto, predominantemente, por partículas de areia (aproximadamente 75%), sendo a estrutura deste constituída por grãos simples. Desta forma, a maioria dos materiais que ficam retidos, principalmente nas peneiras de maiores diâmetros eram formados por cascalho (peneira de malha de 2 mm) e partículas de areia, e não por agregados como é sugerido pelo resultado da análise (Quadro 15). Como as partículas de cascalho e de areia mais grossa apresentam maior massa, proporcionam valores de DMP, DMG e IEA consideravelmente elevados (Quadro 14), uma vez que estes são calculados com base no peso, o que não condiz com a realidade.

Quadro 17 – Avaliação da significância dos contrastes C1 e C2, Quadrado médio do resíduo (QM Res) e coeficiente de variação (CV), calculados para as classes de tamanho dos agregados obtida nos diferentes usos do solo avaliados nos municípios de Araponga

Uso do solo	Classe de tamanho dos agregados (mm)					
	4 – 2	2-1	1-0,5	0,5-0,25	0,25-0,105	< 0,105
<b>Araponga, MG</b>						
----- 0-10 cm -----						
C1	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C2	ns	ns	ns	ns	ns	ns
----- 10-20 cm -----						
C1	*	*	*	*	o	ns
C2	ns	ns	ns	ns	ns	ns
----- 20-40 cm -----						
C1	*	ns	*	*	o	ns
C2	ns	ns	ns	ns	ns	ns
QM Res	167,82	36,32	23,50	7,55	1,25	1,27
CV (%)	20,1	28,9	66,4	72,5	69,2	60,9
<b>Choro, CE</b>						
----- 0-10 cm -----						
C1	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C2	ns	ns	ns	ns	ns	ns
----- 10-20 cm -----						
C1	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C2	ns	ns	ns	ns	ns	ns
----- 20-40 cm -----						
C1	ns	ns	ns	ns	ns	ns
C2	ns	ns	ns	ns	ns	ns
QM Res	166,60	23,60	12,00	15,17	16,22	16,58
CV (%)	32,0	26,3	40,6	39,6	38,3	33,1

C1 = MS vs (SAF + CPS); C2 = SAF vs CPS; CV = coeficiente de variação; \*\*, \*, <sup>o</sup>, ns = significativo ao nível de 1%; 5%; 10% e não significativo, respectivamente.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos evidenciam o potencial dos sistemas agroflorestais em conservar mais a estrutura do solo quando comparados aos sistemas convencionais comumente utilizados nas duas regiões estudadas.

Em Araçuaia, no bioma Mata Atlântica, o sistema agroflorestal, comparado ao cultivo a pleno sol, proporcionou melhor qualidade física do solo, como demonstrada pela redução nos valores de argila dispersa em água, de densidade do solo e resistência à penetração, assim como no aumento da retenção de água dentro da faixa disponível às plantas e no intervalo hídrico ótimo.

Em Choró, no bioma Caatinga, o cultivo do solo não provocou modificações significativas para a maioria dos indicadores avaliados, no entanto, os resultados observados sob manejo agroflorestal sugeriram certa indicação de melhorias na qualidade física do solo comparados com o consórcio a pleno sol e com a própria Caatinga.

As respostas mais significativas verificadas no manejo adotado na Zona da Mata mineira podem ser associadas à textura mais argilosa do Latossolo, assim como ao maior tempo de adoção dos sistemas. A textura argilosa permite que uma estrutura verdadeira ocorra no solo, a qual pode sofrer os efeitos do uso e manejo. Na textura arenosa, presente no Argissolo do semi-árido cearense, diferenças são mais difíceis de serem detectadas, tendo em vista o fato de o solo apresentar estrutura muito pouco desenvolvida.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALEGRE, J.C.; CASSEL, D.K. Dynamics of physical properties under alternative systems to slash-and-burn. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 58: 39-48, 1996.
- ALENCAR G.V.; MENDONÇA, E.S.; OLIVEIRA, T.S. Avaliação de sistemas de produção de olerícolas orgânicas e convencionais no município de Guaraciaba do Norte-CE. In: OLIVEIRA, T. S. (coord.) *Solo e Água: aspectos de uso e manejo com ênfase no semi-árido nordestino*. Fortaleza, Departamento de Ciências do Solo, UFC, 2004. p 76- 104.
- ALVAREZ V., V.H.; NOVAIS, R.F.; DIAS, L.E.; OLIVEIRA, J.A. Determinação e uso de fósforo remanescente. *Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo*, 52:27-32, 2000.(Boletim Informativo)
- ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 337-345, 2004a.
- ARAÚJO, M.A.; TORMENA, C.A.; INOUE, T.T.; COSTA, A.C.S. Efeitos da escarificação na qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférrico após treze anos de semeadura direta. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 459-504, 2004b.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA – ABNT. NBR 7182/86 *Solo: ensaio de compactação*. Rio de Janeiro, 1986. 10p.
- BAGGIO, A.J. Alternativas agroflorestais para a recuperação de solo degradados na região Sul do país. In: *SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS*, 1992, Curitiba. Anais. Curitiba: UFPR, 1992. p.126-131.
- BORGES, M.J.; PISSARRA, T.C.T.; VALERI, S.V.; OKUMURA, E.M. Reflorestamento compensatório com vistas à retenção de água no solo da bacia hidrográfica Córrego Palmital, Jaboticabal, SP. *Scientia Forestalis*, 69:93-103, 2005.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Eds.) *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 9-26.
- BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J.A; LEITE, D.; AMARAL, A.J.; ZOLDAN JUNIOR, W.A. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas comparadas às de campo nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28:155-163, 2004.

- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38:849-856, 2003.
- BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30:605-614, 2006.
- BREMAN, H.; KESSLER, J.J. The potential benefits of agroforestry in the Sahel and other semi – arid regions. *European Journal of Agronomy*, 7: 25-33, 1997.
- BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. *Transactions of the ASAE*, Saint Joseph, 3:519-524, 1990.
- CAMPOS, B.C.; REINERT, D.J.; NICOLODI, R.; RUEDELL, J.; PETRERE, C. Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 19:121-126, 1995.
- CARDOSO, I.M.; GUIJT, I.; FRANCO, F.S.; CARVALHO, P.S.; FERREIRA NETO, P.S. Continual learning for agroforestry system design: university, NGO and farmer partnership in Minas Gerais, Brazil. *Agri-Systems*, 60:235-257, 2001.
- CARVALHO, L.A.; CRUZ, A.C.R.; ROCHA, G.C.; LIBARDI, P.L. Condutividade Hidráulica do Solo em Condições de Campo. In: OLIVEIRA, T. S. (coord.) *Solo e Água: aspectos de uso e manejo com ênfase no semi-árido nordestino*. Fortaleza: Departamento de Ciências do Solo, UFC, 2004a. p.374-399.
- CARVALHO, R.; GOEDERT, W.J.; ARMANDO, M.S. Atributos físicos da qualidade de um solo sob sistema agroflorestal. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39:1153-1155, 2004b.
- CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A.L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo das amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22:527-538, 1998.
- CORTÉS-TARRÁ, I. L.; LUIZÃO, F.; FERNANDES, E; WANDELLI, E; TEIXEIRA, W; MORAIS, W.; BARROS, E. Relações entre os grupos funcionais da macrofauna e o volume dos macro-poros do solo em sistemas agrossilviculturais da Amazônia Central. *CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL*, 6, 2003, Fortaleza. Anais, Fortaleza: Editora da Universidade Federal do Ceará, 2003. p.643-645
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27:527-535, 2003
- DEFELIPO, B.V.; RIBEIRO, A.C. Análise química do solo. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1981. 17p. (Boletim Extensão, 29).
- 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, 2004

- DORAN, J.W. Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 26, 1997, Rio de Janeiro. Palestras, Rio de Janeiro: SBCS, 1997. (CD-ROM).
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.) Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, Soil Science Society of America, 1994, p. 3-21. (Special Publication, 35).
- DORAN, J.W.; ZEISS, M.R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. *Applied Soil Ecology*, 15: 3-11, 2000.
- DOURADO NETO, D.; JONG VAN LIER, Q. de; BOTREL, T. A.; LIBARDI, P. L. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo utilizando o modelo de Genuchten. *Engenharia Rural*, 1:92-102, 1990.
- DUBOIS, J.C.L. Alternativas agrofloretais para a recuperação de solo degradados na região Norte do país. In: SIMPÓSIO NACIONAL DA RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1992, Curitiba. Anais. Curitiba: UFPR, 1992. p.107-125.
- DUFRANC, G.; DECHEN, S.C.F.; FREITAS, S.S. CAMARGO, O.A. Atributos físicos, químicos e biológicos relacionados com a estabilidade de agregados de dois Latossolos em plantio direto no Estado de São Paulo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28:505-517, 2004;
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Manual de métodos de análise de solo. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p.
- ENGEVIX. Caracterização do meio físico da área autorizada para a criação do Parque Estadual da Serra do Brigadeiro - Relatório técnico final dos estudos - 8296 - RG-H4-003/94, "VER. 1". IEF/BIRD/PRÓ-FLORESTA/SEPLAN, 1995. 34 p.
- EFFEGEN, T.A.M. Atributos do solo em função de tratos culturais em lavouras de cafeeiro *conilon* no sul do estado do Espírito Santo. Universidade Federal do Espírito Santo, 2006. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Alegre: UFES, 2006, 91p.
- FAO-ORGANIZACION DE LAS NACIONES UNIDAS PARA LA AGRICULTURA Y LA ALIMENTACION. Consulta de expertos sobre la avance de la agrofloresteria en zona aridas y semiaridas da america latina ey caribe. Santiago, 1995, 152p. (Série zonas Aridas y Semiaridas, nº1).
- FERRERAS, L.A.; BATISTA, J.J.; AUSILIO, A.; PECORARI, C. Parâmetros físicos del suelo en condiciones no perturbadas y bajo laboro. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 36:161-170, 2001
- FIALHO, J.S.; GOMES, V.F.F.; OLIVEIRA, T.S.; SILVA JÚNIOR, J.M.T. Indicadores da qualidade do solo em áreas sob vegetação natural e cultivo de bananeira na Chapada do Apodi-CE. *Revista Ciência Agrônômica*, 37:250-257, 2006.
- FOLONI, J.S.S.; CALONEGO, J.C.; LIMA, S.L. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 38:947-953, 2003.

- FRANCO, F.S.; COUTO, L.; CARVALHO, A.F.; JUCKSCH, I.; FERNANDES FILHO, E. I.; SILVA, E.; MEIRA NETO, J.A.A. Quantificação da erosão em sistemas agroflorestais e convencionais na zona da mata de Minas Gerais. *Revista Árvore*, 26: 751-760, 2002.
- HAIRIAH, K.; SULISTYANI, H.; SUPRAYOGO, D.; WIDIANTO; PURNOMOSIDHI, P.; WIDODO, R.H.; NOORDWIJK, M.V. Litter layer residence time in forest and coffee agroforestry systems in Sumberjaya, West Lampung. *Forest Ecology and Management*, 224: 45-57, 2006.
- IMHOFF, S.; SILVA, A. P. da; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade de um solo sob pastagem. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 35:1493–1500, 2000.
- IPECE – Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Perfil Básico Municipal, Choró. Fortaleza: SEPLAN – Secretaria do Planejamento e Coordenação, Governo do Estado do Ceará, 2004.10p
- ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 79: 9-16, 2000.
- JAKSON, N.A.; WALLACE, C.K. Tree pruning as means of controlling water use in na agroforestry system in Kenya. *Forest Ecology and Management*, 126: 133-148, 2000.
- JARAMILLO, R.; CHAVEZ, C.B. Aspectos hidrológicos em um bosque y em plantaciones de café (*Coffea arábica*) al sol y bajo sombra. *Canicafé*, 50: 97-105, 1999.
- JIANBO, L. Energy end economic benefits of two agroforestry systems in northern and southern China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 116: 255-262, 2006
- JARVIS, N.J.; MESSING, L. Near-saturated hydraulic conductivity in soils of contrasting texture measured by tension infiltrometers. *Soil Science Society of America Journal*, 59:27-34, 1995.
- KAY, B.D., SILVA, A.P., BALDOCK, J.A. Sensitivity of soil structure to changes in organic carbon content: predictions using pedotransfer functions. *Journal of Soil Science*, 77:655-667, 1997.
- KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. (ed.) *Methods of soil analysis*. American Society of Agronomy, 1965. p. 449-510.
- KINAMA, J.M.; STIGER, C.J.; ONG, C.K.; NG'NA'A, J.K.; GICHAKI, F.N. Evaporation from soils below sparse crops in cartour hedgerow agroforestry in semi-arid Kenya. *Agricultural and Forest Meteorology*, 130: 149-162, 2005.
- KLEIN, V. A. Densidade relativa – um indicador de qualidade física do solo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 14, 2002, Cuiabá. Resumos expandidos. Cuiabá: SBCS, 2002. (CD-ROM).
- KLEIN, V. A. Propriedades do solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira. *Passo Fundo*: ed. UPF, 2005. 61 p.

- KLUTE, A. Water retention: laboratory methods. In: BLACK, C.A. (ed.) *Methods of Soil analysis. I. Physical and mineralogical methods*. 2 ed. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of American, 1986. p. 635-662.
- LARSON, W.E.; PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, Soil Science Society of America Special Publication Number 35, 1994. p.37-51.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P. A simplified Excel<sup>®</sup> algorithm from estimating the least limiting water range of soils. *Scientia 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. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28:415-423, 2004.
- LEONARDO, H.C.L. Indicadores de qualidade de solo e água para a avaliação do uso sustentável da microbacia hidrográfica do Rio Passo Cue, região oeste do estado do Paraná. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2003. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Piracicaba: USP, 2003, 121p.
- LIBARDI, P.L. Dinâmica da água no solo. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 2005, 335p.
- MACEDO, R.L.G. Sistemas agroflorestais com leguminosas arbóreas para recuperar áreas degradadas por atividades agropecuárias. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 1992, Curitiba, Anais. Curitiba: UFPR, 1992. p.288-297.
- MACHADO, J.L. Qualidade física de solo em distintos sistemas de uso e manejo quantificada pelo índice S. Universidade Estadual de Maringá, 2006. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Maringá: UEM, 2006, 45p.
- MAIA, S.M.F.; XAVIER, F.A.S.; AGUIAR, M.I.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S.; ARAÚJO FILHO, J.A. Sistemas agroflorestais no trópico semi-árido cearense. In: OLIVEIRA, T.S. (coord.) *Solo e Água: aspectos de uso e manejo com ênfase no semi-árido nordestino*. Fortaleza, Departamento de Ciências do Solo, UFC, 2004. p.105-131
- MAIA, S.M.F.; XAVIER, F.A.S.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S.; ARAÚJO FILHO, J.A. Impactos de sistemas agroflorestais e convencional sobre a qualidade do solo no semi-árido cearense. *Revista Árvore*, 30:837-848, 2006.
- MARCOLIN, C.D. Propriedades físicas de Nitossolo e Latossolo argilosos sob plantio direto. Universidade de Passo Fundo, 2006. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal). Passo Fundo: UPF, 2006. 98p.
- MARTINS, S.G; SILVA, M.L.N; CURI, N; FERREIRA, M.M. Avaliação de atributos de um Latossolo Vermelho distroférrico sob diferentes povoamentos florestais. *Cerne*, 8: 32-41, 2002
- MENDONÇA, E.S.; LEITE, L.F.C.; FERREIRA NETO, P.S. Cultivo do café em sistemas agroflorestais: uma opção para a recuperação de solos degradados. *Revista Árvore*, 25: 375-383, 2001.
- NAIR, P. K. R. *An introduction to agroforestry*. Dordrecht: Kluwer, 1993. 499p.

- NEVES, Y.P.; MARTINEZ, H.E.P.; SOUZA, C.M.; CECON, P.R. Teor de água e fertilidade do solo com cafeeiros cultivados em sistemas agroflorestais. *Revista Árvore*, 31:575-588, 2007.
- NEVES JUNIOR, A.F. Avaliação da qualidade física de solos em pastagens degradadas da Amazônia. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 2005. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Piracicaba: USP, 2005, 65p.
- NUNES, L.A.P.L. Qualidade de um solo cultivado com café e sob mata secundária no Município de Viçosa-MG. Universidade Federal de Viçosa, 2003. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) Viçosa: UFV, 2003, 102p.
- OLIVEIRA, G.C.; DIAS JUNIOR, M.S.; RESCK, D.V.S, CURI, N. Caracterização química e físico-hídrica de um Latossolo Vermelho após vinte anos de manejo e cultivo do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 327-336, 2004.
- OTUTUMI, A.T.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S.; LIMA, P.J.B.F. Qualidade do solo em sistemas de cultivo agroecológico no município de Taúa-CE. In: OLIVEIRA, T. S. (coord.) Solo e Água: aspectos de uso e manejo com ênfase no semi-árido nordestino. Fortaleza, Departamento de Ciências do Solo, UFC, 2004. p.1-30.
- PEDROTTI, A.; PAULEITTO, E.A.; CRESTANA, S.; FERREIRA, M.M.; DIAS JUNIOR, M.S.; GOMES, A.S.; TURATTI, A.L. Resistência mecânica à penetração de um Planossolo submetido a diferentes sistemas de cultivo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25:521-529, 2001.
- PENEIREIRO, F.M. Sistemas Agroflorestais Dirigidos Pela Sucessão Natural: Um Estudo de Caso. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, 1999. Tese (Mestrado em Ciências Florestais). Piracicaba: USP, 1999, 139p.
- REICHARDT, K.; TIMM, L.C. Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações. Barueri, São Paulo: Manole, 2004. 478p.
- 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, 2003, Ribeirão Preto. Palestras. Ribeirão Preto: SBCS, 2003 (CD-ROM).
- REYNOLDS, W.D.; VIEIRA, S.R.; TOPP, G.C. An assessment of the single-head analysis for the constant head well permeameter. *Canadian Journal Soil Science*, 72:489-501, 1992.
- 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). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29:297-300, 2005b
- SANS, L.M.A. Avaliação da qualidade do solo. In: OLIVEIRA, T.S.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; ROMERO, R.E.; SILVA, J.E.C. (eds). Agricultura, sustentabilidade e o semi-árido. Fortaleza, UFC, SBCS, 2000. p. 170-213.

- SILVA, A.P.; KAY, B.D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Science Society of America Journal*. 61: 877-883, 1997.
- SILVA, G.L.; OLIVEIRA, T.S.; LIMA, H.V.; ARAUJO FILHO, J.A. Índice de qualidade do solo em sistemas agroflorestais no semi-árido cearense. IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIAS DO SOLO, 31, 2007, Gramado. Resumo expandido. Gramado: SBCS, 2007. (CD-ROM).
- SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. *Soil Science Society of America Journal*, 58:1775-1781, 1994.
- SOMARRIBA, E. Revisiting the past: an essay on agroforestry definition. *Agroforestry Systems*, 19:233-240, 1992.
- SOUSA, A.F. Indicadores de sustentabilidade em sistemas agroecológicos por agricultores familiares do semi-árido cearense. Universidade Federal do Ceará, 2006. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Fortaleza: UFC, 2006, 93p.
- SOUZA, H.N. Sistematização da experiência participativa com sistemas agroflorestais: rumo à sustentabilidade da agricultura familiar na Zona da Mata de mineira. Universidade Federal de Viçosa, 2006. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas). Viçosa: UFV, 2006, 127p.
- STEEL, R.G.D., TORRIE, J.H., DICKKEY, D. Principles and procedures of statistics: a biometrical approach. 3 ed. Boston : WCB/McGraw Hill, 1997. 666p.
- STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto de resistência do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 15:229-235, 1991.
- STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI, U.L. Recomendações para uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/PLANALSUCAR-STOLF. 1983. p.1-9. (Série Penetrômetro de Impacto. Boletim Técnico, 1).
- TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G.M.C.; GUIMARÃES, M.F.; FONSECA, I.C.B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 25:725-730, 2001.
- TAYLOR, H.M.; ROBERSON, G.M.; PARKER JUNIOR, J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. *Soil Science*, 102: 18-22, 1966.
- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soil. *Journal Soil Science*, 33:141-162, 1982.
- TOPP, G.C.; ZEBCHUK, W. The determination of soil water desorption curves for soil cores. *Canadian Journal Soil Science*, 59:19-26, 1979.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDE, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22:573-581, 1998.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDE, P.L. Soil physical quality of a Brazilian Oxisol under two tillage systems using the least limiting water range approach. *Soil and Tillage Research*, 52:223-232, 1999.

- TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S.; FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28:1028-1031, 2004
- TÓTOLA, M.R.; CHAER, G.M. Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. *Tópicos em Ciências do Solo*, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, 2:195-276, 2002.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 44:892-898, 1980.
- WANDELLI, E.V.; PERIN, R.; SOUSA, S.G. Sistemas agroflorestais: uma alternativa para recuperação de áreas degradadas na Amazônia Ocidental. In: SIMPÓSIO NACIONAL DE RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS, 3. 1997, Ouro Preto. *Trabalhos voluntários: Resumos*, Ouro Preto: SOBRADE: UFV, 1997. p.488-493.
- WENDLING, B.; JUCKSCH, I.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L. Carbono orgânico e estabilidade de agregados de uma Latossolo Vermelho sob diferentes manejos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 40: 487-495, 2005.
- XAVIER, F.A.S.; MAIA, S.M.F.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S. Compartimentos da matéria orgânica do solo em sistemas orgânicos e convencional na Chapada da Ibiapaba-CE. In: OLIVEIRA, T. S. (coord.) *Solo e Água: aspectos de uso e manejo com ênfase no semi-árido nordestino*. Fortaleza, Departamento de Ciências do Solo, UFC, 2004. p.31-57.
- XAVIER, F.A.S.; MAIA, S.M.F.; OLIVEIRA, T.S.; MENDONÇA, E.S. Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânicos e convencional na Chapada da Ibiapaba – CE. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30:247-258, 2006.
- YEOMANS, J.C.; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 19: 1467-1476, 1988.