

QUALIDADE DE UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO SOB  
SISTEMAS FLORESTAIS E PASTAGEM, EM CONCEIÇÃO DE  
MACABÚ-RJ

**DAVID SILVA GOMES**

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO NORTE FLUMINENSE DARCY  
RIBEIRO

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
FEVEREIRO - 2016

QUALIDADE DE UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO SOB  
SISTEMAS FLORESTAIS E PASTAGEM, EM CONCEIÇÃO DE  
MACABÚ-RJ

**DAVID SILVA GOMES**

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal”

Orientador: Prof. Cláudio Roberto Marciano

CAMPOS DOS GOYTACAZES – RJ  
FEVEREIRO - 2016

FICHA CATALOGRÁFICA

Preparada pela Biblioteca do CCT / UENF

95/2016

Gomes, David Silva

Qualidade de um argissolo vermelho-amarelo sob sistemas florestais e pastagem, em Conceição de Macabú, RJ / David Silva Gomes. – Campos dos Goytacazes, 2016.

64 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) -- Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Laboratório de Solos. Campos dos Goytacazes, 2016.

Orientador: Claudio Roberto Mariano.

Área de concentração: Solos e nutrição de plantas.

Bibliografia: f. 50-64.

1. QUALIDADE FÍSICA DO SOLO 2. MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO 3. FERTILIDADE DO SOLO 4. DENSIDADE DO SOLO 5. DISTRIBUIÇÃO POR TRATAMENTO DOS POROS DO SOLO I. Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias. Laboratório de Solos II. Título

CDD 631.8

QUALIDADE DE UM ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO SOB  
SISTEMAS FLORESTAIS E PASTAGEM, EM CONCEIÇÃO DE  
MACABÚ-RJ

**DAVID SILVA GOMES**

“Dissertação apresentada ao Centro de Ciências e Tecnologias Agropecuárias da Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, como parte das exigências para obtenção do título de Mestre em Produção Vegetal”

Aprovada em 29 de fevereiro de 2016.

Comissão Examinadora:

---

Prof. Francisco Costa Zaia (D.Sc., Produção Vegetal) – Pesagro/Rio – CEPPAR

---

Prof. Gilmar Santos Costa (D.Sc., Produção Vegetal) – IFF/Campus Campos  
Guarus

---

Prof. Vicente de Paulo Santos de Oliveira (D.Sc., Engenharia Agrícola) –  
IFF/Campus Campos Centro

---

Prof. Cláudio Roberto Marciano (D.Sc., Solos e Nutrição de Plantas) – UENF  
Orientador

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e pelo seu amor puro e verdadeiro, por me dar força para superar as dificuldades;

Aos meus pais, pelo incentivo, orientação, educação, amor, confiança e força a mim dada;

Ao meu irmão, Mateus, por todo carinho, amor, incentivos, conselhos e orações;

À minha namorada, Renata Nogueira, pelo apoio, incentivo, amor e por estar ao meu lado em todos os momentos;

À Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, pela oportunidade de realização desse curso;

À CAPES, pela bolsa de Mestrado concedida, imprescindível suporte financeiro nessa etapa acadêmica e profissional de minha vida;

Ao Sr. José Laércio Paixão Flores, proprietário da Fazenda Carrapeta, por permitir a coleta de amostras de solo e, mais ainda, pela iniciativa de revegetação das áreas estudadas;

Ao meu orientador, Dr. Cláudio Roberto Marciano, pela orientação, atenção, confiança e ensinamentos;

Aos técnicos do Laboratório de Solos da UENF, Ederaldo, pela coleta das amostras, e Vanilda e Kátia, pelas análises químicas;

Ao Lucas Faustino, que participou diretamente deste trabalho, ajudando e incentivando;

Aos amigos, David Pessanha, Priscila, Tacísio, Tamara, Rodrigo, Wanderson, pelos momentos em que fomos estudiosos e brincalhões;

A todos os colegas e professores do Programa de PG em Produção Vegetal da UENF, pelo convívio e aprendizado.

## SUMÁRIO

|                                                                                     |      |
|-------------------------------------------------------------------------------------|------|
| AGRADECIMENTOS .....                                                                | II   |
| SUMÁRIO .....                                                                       | IV   |
| RESUMO .....                                                                        | VI   |
| ABSTRACT .....                                                                      | VIII |
| 1. INTRODUÇÃO.....                                                                  | 1    |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA.....                                                       | 3    |
| 2.1 INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO .....                                          | 3    |
| 2.2 QUALIDADE FÍSICA DO SOLO .....                                                  | 4    |
| 2.2.1 <i>Densidade do solo</i> .....                                                | 5    |
| 2.2.2 <i>Porosidade do solo</i> .....                                               | 7    |
| 2.2.3 <i>Distribuição de poros por tamanho</i> .....                                | 8    |
| 2.3 QUALIDADE QUÍMICA DO SOLO .....                                                 | 11   |
| 2.3.1 <i>Matéria orgânica</i> .....                                                 | 11   |
| 2.3.2 <i>Capacidade de troca de cátions (CTC)</i> .....                             | 13   |
| 2.3.3 <i>Reação do solo (pH)</i> .....                                              | 14   |
| 2.3.4 <i>Disponibilidade de nutrientes e elementos tóxicos</i> .....                | 15   |
| 2.4 RELAÇÃO ENTRE COBERTURA VEGETAL E ATRIBUTOS FÍSICOS E QUÍMICOS<br>DO SOLO ..... | 16   |
| 3. MATERIAL E MÉTODOS .....                                                         | 19   |
| 3.1 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL DE ESTUDO.....                                          | 19   |
| 3.2 DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL.....                                             | 19   |

|                                          |    |
|------------------------------------------|----|
| 3.3. AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO SOLO..... | 20 |
| 3.3.1 <i>Atributos físicos</i> .....     | 21 |
| 3.3.2 <i>Atributos químicos</i> .....    | 24 |
| 3.4 ANÁLISE ESTATÍSTICA .....            | 24 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....           | 26 |
| 4.1 QUALIDADE FÍSICA DO SOLO .....       | 26 |
| 4.2 QUALIDADE QUÍMICA DO SOLO .....      | 35 |
| 5. RESUMO E CONCLUSÕES .....             | 47 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....         | 50 |



## RESUMO

GOMES, David Silva; Eng. Agrônomo; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; Fevereiro de 2016. Qualidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob sistemas florestais e pastagem, em Conceição de Macabú-RJ. Orientador: Cláudio Roberto Marciano.

A qualidade do solo está diretamente relacionada com sua capacidade funcional de sustentar a atividade biológica, manter a qualidade ambiental e proporcionar o crescimento e a saúde de plantas e animais. Os dois principais mecanismos de degradação do solo são a compactação e a degradação da matéria orgânica. A implantação de sistemas florestais com leguminosas é uma das estratégias mais utilizadas para a recuperação de áreas degradadas, pois melhora a fertilidade (fixação biológica de N<sub>2</sub> e ciclagem de nutrientes), aumenta o teor de matéria orgânica, incrementa a atividade biológica e melhora os atributos físicos do solo. O objetivo do trabalho foi avaliar a qualidade química e física de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico sob capoeira, pastagem e leguminosas arbóreas, em uma encosta, no Município de Conceição de Macabú, RJ. A área experimental constitui-se de coberturas vegetais lateralmente adjacentes: *Acacia auriculiformis* (acácia); *Mimosa caesalpinifolia* (sabiá); *Ingá spp.* (ingá); pastagem degradada (pasto); e mata secundária (capoeira). A capoeira não sofria manejo

há mais de 50 anos, a presença da pastagem remonta a década de 1930, e as três leguminosas arbóreas foram implantadas em 1998, em talhões de 1500 m<sup>2</sup> (75 m x 20 m). Em julho/2015 foram coletadas amostras nas camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade, com estrutura deformada e indeformada, em seis pontos em cada área. O teor de C no solo variou entre 13,1 e 18,8 mg kg<sup>-1</sup> na camada 0-0,10 m (maior valor na capoeira e menor no pasto), e entre 10,8 e 12,2 mg kg<sup>-1</sup> na camada 0,10-0,20 m (sem diferença entre as coberturas). Exceção ao pasto, a camada 0-0,10 m foi superior à 0,10-0,20 m quanto à capacidade de troca de cátions (efetiva e a pH = 7,0) e ao teor dos nutrientes N, P, Ca, Mg e K. Quanto às coberturas vegetais, essas variáveis químicas tiveram, de modo geral, os menores valores no pasto, os maiores na acácia ou na capoeira, e os intermediários no ingá e sabiá. Em relação aos atributos físicos do solo, para as duas camadas avaliadas, a menor média geral de densidade (1,104 Mg m<sup>-3</sup>) e a maior de porosidade total (0,583 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) ocorreram sob capoeira, enquanto as maiores médias gerais de densidade (1,430 e 1,316 Mg m<sup>-3</sup>) e menores de porosidade total (0,460 e 0,503 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) ocorreram, respectivamente, sob acácia e pasto. Nas áreas revegetadas, enquanto na camada 0,10-0,20 m a compactação do solo permaneceu severa, tão ou mais que na pastagem, na 0-0,10 m as coberturas ingá e sabiá promoveram alguma recuperação da estrutura do solo, com valores intermediários de densidade e porosidade total. Quanto à distribuição de poros por tamanho, no geral as maiores proporções de macroporos e mesoporos estiveram associadas às menores densidades (na capoeira) e as menores proporções de microporos às maiores densidades (no pasto e na acácia). Destaque-se, porém, que a maior proporção de mesoporos ocorreu no pasto, podendo-se supor que o sistema radicular fasciculado das gramíneas tenha atuado para preservar ou reconstruir tais poros, mesmo frente ao processo de compactação. Pôde-se concluir que a revegetação com leguminosas arbóreas leva a modificações na camada mais superficial do solo que tornam seus atributos próximos aos da capoeira e mais afastados dos da pastagem, indicando aumento de sua qualidade para dar suporte ao funcionamento de um ecossistema florestal, a despeito da piora de alguns indicadores da qualidade agrônômica, como a diminuição do pH, o aumento do Al e a redução da proporção de microporos (que armazenam água).

## ABSTRACT

GOMES, David Silva; Agronomy Engineer; M.Sc.; Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro; February, 2016. Quality of an Kandiuult soil under forest and pasture systems in Conceição de Macabú-RJ. Advisor: Cláudio Roberto Marciano.

Soil quality is directly related to their functional capacity to sustain the biological activity, maintain environmental quality and provide the growth and health of plants and animals. The two main mechanisms of soil degradation are the compaction and the organic matter degradation. The implantation of forestry systems with leguminous plants is one of the most used strategies for the recovery of degraded areas, because it improves soil fertility (N<sub>2</sub> fixation and nutrient cycling), increases the amount of organic matter, increases biological activity and improves the physical properties. The objective of this work was to evaluate chemical and physical quality of a Kandiuult soil under secondary forest, pasture and leguminous trees, on a hillside, in the municipality of Conceição de Macabú, RJ. The experimental area consisted of laterally adjacent plots with the following vegetal covers: *Acacia auriculiformis* (acacia); *Mimosa caesalpinifolia* (“sabiá”); *Inga spp.* (“ingá”); degraded pasture (grass); and secondary forest (woodland). The woodland suffered no management by over 50 years, the pasture has been

growing up since early 1930 decade, and the three areas with leguminous trees were deployed in 1998, in plots of 1,500 m<sup>2</sup> (75 m x 20 m). In July 2015 were collected soil samples in the 0-0.10 and 0.10-0.20 m depth, with deformed and undeformed structure, in six points in each area. The C content in soil ranged from 13.1 and 18.8 mg kg<sup>-1</sup> on layer 0-0.10 m (highest value in woodland and lower on pasture), and between 10.8 and 12.2 mg kg<sup>-1</sup> on the 0.10-0.20 m (no difference between the vegetal covers). Exception to the pasture, the layer 0-0.10 m was higher than the 0.10-0.20 m regarding the cations exchange capacity (effective, and at pH = 7.0) and also the content of nutrients N, P, Ca, Mg and K. About the vegetal covers, in general, these chemical variables had the lowest values in the pasture, the biggest in the acacia or in the woodland, and the middlemen in the *ingá* and *sabiá*. In relation to the soil physical attributes, to the two evaluated layers, the lowest density (average of 1.104 Mg m<sup>-3</sup>) and the largest total porosity (average of 0.583 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) occurred lowest under woodland, while the largest densities (average of 1.430 and 1.316 Mg m<sup>-3</sup>) and lowest total porosities (average of 0.460 and 0.503 m<sup>3</sup> m<sup>-3</sup>) occurred, respectively, under Acacia and grass. In revegetated areas, while in 0.10-0.20 m layer the soil compaction remained severe as much or more than under grazing, on 0-0.10 m layer two vegetal covers (*ingá* and *sabiá*) promoted soil structure recovery, with intermediate values of density and total porosity. In respect to the distribution of pores by size, overall the highest proportions of macropores and mesopores were associated with smaller densities (in the woodland) and the lowest proportions of micropores related to the higher densities (in the pasture and acacia). Highlight, however, that the highest proportion of mesopores occurred in the pasture and can be assumed that the fasciculate root system of grasses acted to preserve or reconstruct such pores, even against the compression process. It might be concluded that the revegetation of land with tree legumes leads to modifications in the most superficial layer of the soil, which make its attributes closest to those of woodland and more away from the pasture, indicating increased its capacity to support the operation of a forest ecosystem, despite the worsening of some indicators of agronomic quality, as the decrease in pH, the rise of the Al and the reduction of the proportion of micropores (that store water).

## 1. INTRODUÇÃO

O termo qualidade do solo está diretamente relacionado com a sua funcionalidade em ecossistemas manejados ou naturais, com a capacidade em sustentar a atividade biológica, manter a qualidade ambiental e proporcionar o crescimento e a saúde das plantas e animais (Doran e Parkin, 1994).

Os solos do Brasil são, em sua maioria, altamente intemperizados, com mineralogia caulínica ou oxídica, apresentando pouca reserva de nutrientes e baixa capacidade de troca de cátions, o que evidencia baixa qualidade química (Barbosa, 2012). Tais aspectos dão à matéria orgânica um papel central para a determinação da qualidade desses solos, principalmente sob o aspecto químico, pois, além de controlar a disponibilidade de nutrientes usualmente aniônicos (N, P e S, para ficar restrito aos macronutrientes), a matéria orgânica passa a ser responsável também pela maior parte da capacidade de troca de cátions do solo (Raij, 1969; Vezzani et al., 2008), da qual depende diretamente a disponibilidade dos demais macronutrientes (Ca, Mg e K).

De forma geral, a exploração agrícola provoca degradação do solo, principalmente em países tropicais (Mielniczuk, 2008). No Norte Fluminense, a degradação do solo foi consequência de um longo período de monocultivo do café e da cana-de-açúcar, da mecanização intensiva, da utilização de fogo em pastagens, e do corte e queima das florestas (Gama-Rodrigues et al., 2008).

Os dois principais mecanismos de degradação do solo são a compactação e a perda de matéria orgânica. Enquanto a compactação tem efeitos principalmente sobre os aspectos físicos (disponibilidade de água e aeração do solo, resistência à penetração de raízes, entre outros), a degradação da matéria orgânica tem efeito sobre aspectos químicos e também físicos, pois a matéria orgânica é a principal responsável pela estrutura da camada superficial do solo. Assim, a redução do teor de matéria orgânica traz consequências negativas tanto para os cultivos (aspectos químicos e físicos do solo já mencionados) quanto para a conservação ambiental, pois leva ao aumento do escoamento superficial, ao deslizamento de terras, à formação de voçorocas e ao assoreamento de corpos d'água (Barbosa, 2012).

Para solos em áreas agrícolas e silvícolas a principal fonte de compactação é o tráfego de máquinas, enquanto na pecuária a degradação ocorre pela compactação decorrente da pressão do casco dos animais, que compromete a qualidade física na camada superficial, devido ao aumento da densidade e à redução da porosidade (Twerdoff et al., 1999; Imhoff et al., 2000; Giarola et al., 2007). De fato esses dois atributos físicos são os mais utilizados para quantificar a qualidade física do solo sob pastejo (Greenwood e MC Kenzie, 2001; Lanzasova et al., 2007).

A implantação de sistemas florestais com leguminosas é uma estratégia para a recuperação de solos de áreas degradadas, pois melhora a fertilidade (fixação biológica do N atmosférico e reciclagem de nutrientes), aumenta o teor de matéria orgânica, otimiza a atividade biológica e melhora as propriedades físicas (Young, 1989; Franco e Faria, 1997; Gama-Rodrigues et al., 1999; Gama-Rodrigues et al., 2008; Macedo et al., 2008; Houghton, 1994). As espécies florestais são capazes também de controlar a erosão hídrica devido à redução do impacto da chuva sobre o solo, aumentar a infiltração de água, efeito de agregação das partículas do solo e manutenção do teor de matéria orgânica (Houghton, 1994).

O objetivo do trabalho foi de avaliar a qualidade química e física de um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico sob capoeira, leguminosas arbóreas e pastagem na Região Norte Fluminense, no Município de Conceição de Macabú.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1 Indicadores da qualidade do solo

Qualidade do solo é um termo que está diretamente relacionado com sua função dentro dos ecossistemas manejados ou naturais, sustentando a atividade biológica, mantendo a qualidade ambiental e proporcionando o crescimento e a saúde de plantas e animais (Doran e Parkin, 1994). A compreensão de que o conceito de qualidade do solo relaciona-se à ocorrência de condições ótimas para que este funcione adequadamente é de extrema importância no que se refere à necessidade de adotar estratégias de manejo sustentável do solo nos diferentes sistemas de produção (Sans, 2000; Tótola e Chaer, 2002).

Segundo Tótola e Chaer (2002), o solo é um ambiente complexo onde interagem inúmeros processos químicos, físicos e biológicos, os quais estão em constante fluxo e são de natureza heterogênea e, frequentemente, de difícil medição. Decorre, portanto, o entendimento de que a avaliação da qualidade deve ser feita dentro dos limites naturais de cada solo e ambiente, sendo inadequada (ou, ao menos, devendo ficar para segundo plano) qualquer tentativa de que tal apreciação de qualidade tenha caráter universal.

Os atributos do solo a partir dos quais se pode fazer inferências sobre sua qualidade são chamados de indicadores de qualidade do solo. Tais atributos podem ser de diversas naturezas (biológica, mineralógica, dentre outras), mas a

seguir serão tratados de indicadores de qualidade de natureza química e física, alvos do presente estudo.

## **2.2 Qualidade física do solo**

Alguns fatores físicos considerados ideais para descrever a qualidade do solo são citados por Ingaramo (2003): porosidade, densidade, condutividade hidráulica, distribuição dos poros por tamanho, distribuição e tamanho de partículas e profundidade em que as raízes crescem. Já Reichert et al. (2003) citam também a retenção e disponibilidade da água às plantas (e também aos corpos hídricos) e as trocas de gases e calor entre a atmosfera e as raízes. Outros autores (Salton e Mielniczuk, 1995; Castro Filho et al., 1998, Vasconcelos et al., 2010) buscam avaliar a qualidade física do solo a partir dos resultados da distribuição de agregados por tamanho, obtidos por agitação, em água ou a seco, de amostras de agregados em um conjunto de peneiras com malha decrescente, sendo então calculadas variáveis indicadoras de sua estabilidade frente ao processo empregado.

A serapilheira depositada pelas plantas sobre o solo, além de reduzir o valor e a amplitude de variação da temperatura de suas camadas superficiais, influencia a estrutura do solo, promovendo, em conjunto com a forma de manejo adotada, aumento da porosidade e da estabilidade dos agregados (Albuquerque et al., 2001; Salton e Mielniczuk, 1995). Considerada como um dos melhores indicadores da qualidade do solo, a matéria orgânica se relaciona com diversos atributos do solo (Reichert et al., 2003), exercendo influência diretamente na agregação e demais atributos físicos (Bayer e Mielniczuk, 2008).

A estrutura do solo diz respeito ao posicionamento das partículas primárias que compõem a matriz do solo (arranjo espacial, proximidade). Para Campos et al. (1995), é um dos indicadores mais importantes para o crescimento das plantas, pois relaciona-se com as condições de adensamento e/ou compactação, infiltração de água, encrostamento superficial pelo impacto de gotas e susceptibilidade do solo à erosão. Segundo esses autores, através desses atributos pode-se fazer uma avaliação da estrutura do solo, pois são de fácil mensuração e indicam o efeito do manejo, além de ter respostas rápidas e de razoável precisão.



Nunes (2003), trabalhando na região da Zona da Mata Mineira em um monocultivo de café, identificou que a estabilidade de agregados, a macroporosidade, a densidade do solo e a argila dispersa em água foram sensíveis na avaliação das mudanças na qualidade do solo, sendo priorizadas como indicadores de qualidade física do solo. A curva de retenção de água no solo também é um indicador que pode ser usado na avaliação da qualidade do solo, pois está relacionada com as funções de retenção e transporte de água que o solo apresenta (Doran e Parkin, 1994).

A seguir serão elencados os atributos físicos utilizados para a avaliação da qualidade do solo de interesse mais específico para o presente trabalho.

### 2.2.1 Densidade do solo

A densidade relaciona-se com a estrutura do solo, uma vez que é função do arranjo e orientação das partículas do solo, assim como a quantidade e geometria dos espaços porosos (Aguilar, 2008), de forma que ações sobre o arranjo das partículas refletirão nos valores de densidade - ou seja, a densidade depende da estrutura. Para um solo específico, variações na densidade são, por um lado, reflexos de seu uso e manejo (Ferreira, 2010), e, por outro, permitem que este atributo seja utilizado como indicador indireto da qualidade do solo, dada sua correlação com os quatro fatores físicos que Letey (1985) considera afetar diretamente o crescimento de plantas (a disponibilidade de água, ar e calor e a resistência mecânica ao crescimento radicular).

Os principais processos que contribuem para as alterações na densidade são de natureza físico-mecânica ou de natureza biológica. Para os processos físico-mecânicos, ressalta-se que as forças podem ter origem externa, decorrentes da incidência de cargas, ou interna, decorrentes da expansão e contração do volume do solo por umedecimento e secagem (Reichert et al., 2003). Entre os processos biológicos, incluem-se a deposição de serapilheira, a decomposição e humificação da matéria orgânica, e a ação de raízes e organismos deslocando, reorganizando e estabilizando espacialmente as partículas do solo (Braidá et al., 2011).

Por apresentar pouca ou nenhuma dependência de fatores como a umidade, a densidade é o mais seguro atributo para avaliar a compactação do solo. O intervalo hídrico ótimo é determinado pelos limites críticos dos atributos físicos do solo que afetam diretamente o crescimento de plantas e estes estão estreitamente relacionados à densidade (Reichert et al., 2007).

Os solos com diferentes naturezas mineralógicas e granulométricas apresentam também grande variação nos valores de densidade do solo, de modo que este atributo não se presta como indicador universal de compactação, e, conseqüentemente, da qualidade física do solo (Barbosa, 2012).

Como o solo é formado por diferentes estruturas morfológicas, é possível encontrar diferentes valores de densidade quando se compara diferentes solos ou camadas de solo. Segundo Ferreira (2010), no Brasil, no horizonte diagnóstico subsuperficial Bw (da classe dos Latossolos) os valores de densidade variam de 0,90 a 1,55  $\text{Mg m}^{-3}$ , associando-se à estrutura granular (de mineralogia geralmente oxídica) aos valores inferiores, e à estrutura em blocos ou similar (de mineralogia geralmente caulinitica) aos valores superiores. Quanto à relação entre densidade do solo e granulometria, Reinert et al. (2006) apresentam uma tabela em que valores críticos de densidade (acima dos quais o crescimento vegetal é prejudicado) variam entre 1,2 e 1,5  $\text{Mg m}^{-3}$  para solos de textura muito argilosa, entre 1,4 e 1,7  $\text{Mg m}^{-3}$  para solos de textura média e argilosa, e entre 1,7 e 1,8  $\text{Mg m}^{-3}$  para solos de textura arenosa.

A grande amplitude de variação da densidade do solo com a mineralogia, a textura e o teor de matéria orgânica dificulta seu uso para quantificar o grau de compactação do solo, sendo a utilização da densidade relativa uma forma de contornar esse problema (Silva et al., 2010). Estes autores definem densidade relativa como a relação entre a densidade do solo na condição de interesse e sua densidade máxima obtida em um ensaio de compactação, usualmente o ensaio de Proctor. Essa variável, sendo escalonada entre um valor mínimo acima de zero e um valor máximo de um, pode, então, ser empregada para comparar diferentes solos quanto ao grau de compactação e, de forma mais ampla, quanto à sua qualidade.

### 2.2.2 Porosidade do solo

Similarmente à densidade, a porosidade do solo é função do arranjo e orientação das partículas e, portanto, relaciona-se também com a estrutura do solo (Aguiar, 2008). A porosidade representa a fração do solo não ocupada por sólidos, correspondendo ao quociente entre o volume de poros e o volume total (Ferreira, 2010). Como é frequente a determinação de frações da porosidade delimitadas em termos de diâmetro de poros (macroporosidade; microporosidade; etc.) ou funcionalidade (porosidade de aeração; porosidade de retenção de água; etc.), esta é usualmente também referida como porosidade total do solo (Ferreira, 2010), já que corresponde à soma das frações.

Como a porosidade tem estreita relação com a densidade, esta também apresenta grande variação de valores em solos com diferentes mineralogias, granulometrias e teores de matéria orgânica (Ferreira, 2010; Barbosa, 2012). Apesar disso, diferente do que ocorre com a densidade, não é comum que se questione o emprego da porosidade como indicador direto da qualidade física do solo, possivelmente devido aos aspectos funcionais a ela associados (aeração, retenção de água).

Em solos arenosos, como possuem partículas maiores, o espaço poroso é constituído predominantemente por poros de maior diâmetro, os macroporos. Em contrapartida, o volume total de poros é menor nestes solos, comparando-os aos de textura argilosa, em que os microagregados formados pelas partículas de argila abrigam microporos em seu interior, aumentando assim a microporosidade (Klein, 2005).

O estudo da porosidade total pode evidenciar efeitos de ações de manejo sobre o solo (Reichert et al., 2007), pois sofre reflexo direto de qualquer rearranjo espacial das partículas, principalmente aqueles decorrentes da realização de atividades mecanizadas (preparo, semeadura, cultura) e aplicação de cargas externas (máquinas, implementos e animais), mas também os devidos à expansão e contração por umedecimento e secagem e à atividade biológica (macrofauna, mesofauna e raízes das plantas).

A porosidade total merece especial atenção, visto que nesses espaços se processam os principais fenômenos que regulam o desenvolvimento e a

produção vegetal (Grohman, 1972). Segundo Carvalho et al. (1999), o cultivo intensivo e a frequente exposição do solo à ação direta das gotas de chuva promovem rápida degeneração das propriedades físicas da camada superficial, com a diminuição do espaço poroso que traz reflexos ao desenvolvimento das culturas.

### 2.2.3 Distribuição de poros por tamanho

Os poros do solo são o espaço onde acontecem os processos dinâmicos do ar e da solução do solo, sendo representados por cavidades de diferentes tamanhos e formas (Hillel, 1972). Para ser ideal do ponto de vista edáfico, um solo deve apresentar volume e dimensão dos poros suficientes para a entrada, movimento e retenção de água e ar para atender às exigências de cada cultura (Hillel, 1980).

Para Tognon (1991), como a porosidade do solo interfere na aeração, na resistência à penetração e ramificação das raízes no solo, na condução e retenção de água, conseqüentemente interfere no aproveitamento pelas plantas da água e nutrientes disponíveis. Assim, a fertilidade do solo é influenciada pela presença de poros ideais, pois como esses influenciam na drenagem, aeração, penetração de raízes, absorção de nutrientes e temperatura, interferem no desenvolvimento e produtividade das culturas (Letey, 1985).

A classificação dos poros comumente é feita de acordo com o diâmetro, separando-os em duas classes: microporos e macroporos. Os microporos, chamados também de poros capilares, são responsáveis pela retenção da água, enquanto os macroporos representam os poros responsáveis pela drenagem e aeração do solo (Brady e Weil, 2013; Aguiar, 2008).

Kiehl (1979) classifica macroporos e microporos como tendo diâmetro maior e menor que 0,06 mm (60  $\mu$ m), respectivamente, enquanto a maior parte dos autores (Richards, 1965; Libardi, 1995; Klein e Libardi, 2002) usa o diâmetro de 0,05 mm (50  $\mu$ m) como limite de separação. Alguns autores, como Luxmoore (1981) e Libardi (1995), incluem a classe intermediária mesoporos, o primeiro adotando como limites os diâmetro de 0,01 e 0,10 mm (10 e 100  $\mu$ m, respectivamente), e o segundo 0,03 e 0,10 mm (respectivamente 30 e 100  $\mu$ m),

ambos os autores destacando a funcionalidade dessa classe referem-se à redistribuição de água no solo. Outros autores (Klein e Libardi, 2002; Ribeiro et al., 2007) incluem ainda os criptoporos, separando dos microporos aqueles com diâmetro menor que 0,2  $\mu\text{m}$ , que retêm água não disponível às plantas, em tensões maiores que 1500 kPa, limite este geralmente assumido como ponto de murcha permanente.

A distribuição dos poros por tamanho é tradicionalmente obtida a partir da curva de retenção de água no solo. Para sua confecção, usualmente amostras de solo previamente saturadas são colocadas sobre a placa porosa de funis de Haines e de câmaras de pressão de Richards. Com a aplicação de sucção sob a placa dos funis, e de pressão sobre a placa das câmaras, estipula-se o limite de tamanho dos poros que, após o equilíbrio, permanecerão com água ou terão sido drenados. Tal relação é estabelecida pela equação de Kelvin:

$$h = \frac{2\sigma \cos\alpha}{\rho_a g \left(\frac{d}{2}\right)} \quad (1)$$

onde  $h$  é a sucção (ou pressão) aplicada à placa (correspondente ao potencial mátrico da água),  $d$  é o diâmetro do maior poro que permanecerá com água,  $\sigma$  é a tensão superficial da água,  $\alpha$  é o ângulo de contato entre a água e o solo,  $\rho_a$  é a densidade da água e  $g$  é a aceleração da gravidade (Libardi, 1995). Enquanto o quantitativo de poros menores que o referido diâmetro é correspondente à umidade volumétrica da amostra, o de poros maiores será obtido pela diferença entre a porosidade total e a umidade obtida. Da mesma forma, o quantitativo de poros entre dois diâmetros quaisquer corresponderá à diferença de umidade volumétrica nas tensões correspondentes.

A forma que os poros do solo se distribuem em sua matriz desempenha um papel importante nas relações entre as fases sólida, líquida e gasosa, o que vai determinar a evolução espacial e temporal em relação aos processos que envolvem o movimento da água no solo. Desta maneira a distribuição dos poros por seus tamanhos influencia o comportamento físico-hídrico do solo (Ribeiro et al., 2007).

Ribeiro et al. (2007), avaliando a influência da distribuição de poros sobre as propriedades físicas de seis classes de solos sob vegetação natural, verificaram que o maior valor de condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_o$ ) foi em um Latossolo Vermelho Distrófico, devido a este apresentar um menor valor de densidade e maior valor de porosidade total e macroporosidade. Neste mesmo trabalho os autores concluíram que a microporosidade, isoladamente, não é adequada para explicar o comportamento hidráulico dos solos, uma vez que não se correlacionou com a condutividade hidráulica do solo saturado ( $K_o$ ). Cabe lembrar que  $K_o$  é uma das avaliações mais importantes dos estudos relacionados ao movimento de água no solo (Jong van Lier e Libardi, 1997), tendo grande importância em estudos envolvendo a infiltração da água no solo (Swartzendruber, 1987; Wolfe et al., 1988).

Assim como ocorre para a densidade e porosidade total do solo, o estudo da distribuição de poros por tamanho tem sido realizado para evidenciar o efeito do uso e manejo sobre condição física do solo, geralmente ocorrendo redução dos poros de maior diâmetro quanto maior a intensidade de uso e maiores as cargas externas aplicadas ao solo (Klein e Libardi, 2002; Aguiar, 2008).

Em solos de drenagem livre, a água eventualmente presente em macroporos não permanece por muito tempo (Libardi, 1995). No entanto, o atendimento da demanda hídrica das plantas não depende exclusivamente dos microporos, mas também dos macroporos, pois estes influenciam no crescimento das raízes e, portanto, na absorção de água e nutrientes. Beutler e Centurion (2003) argumentam que em solos excessivamente porosos pode ocorrer menor desenvolvimento das raízes, devido a um menor contato destas com o solo, reduzindo a absorção de água e nutrientes pelas plantas. Com a compactação e consequente redução da macroporosidade do solo, o crescimento de raízes principais (mais grossas) pode diminuir e o de raízes laterais aumentar, já que estas apresentam menor diâmetro, capazes de penetrar nos poros menores. Se a compactação for ainda mais pronunciada, mesmo o crescimento das raízes laterais mais finas pode ser afetado, causando prejuízos ao desenvolvimento das plantas.

## 2.3 Qualidade química do solo

Fatores de natureza química podem influenciar o crescimento de plantas de forma positiva ou negativa, sendo difícil classificá-los ou separá-los por estarem intimamente relacionados e interagirem entre si (Meurer, 2007). Apesar disso, o referido autor destaca aqueles relacionados com: (a) a composição mineralógica do solo; (b) a disponibilidade de nutrientes; (c) a presença de elementos tóxicos; (d) a presença de metais pesados; (e) o teor de matéria orgânica; (f) as reações de sorção, precipitação, redução e oxidação; (g) a salinidade.

O estudo da composição química do solo é importante para verificar a disponibilidade de nutrientes, a presença de elementos tóxicos, determinar o potencial osmótico ao longo do ciclo de uma cultura (Silva et al., 2000).

Para um crescimento ideal as raízes das plantas requerem um adequado suprimento de nutrientes, um pH favorável, baixa salinidade e ausência de concentração excessiva de elementos tóxicos (Bell, 1998). O pH do solo influencia, de modo significativo, a disponibilidade de nutrientes, as propriedades físicas, a microfauna e microflora (Vieira et al., 1988).

Alguns fatores mencionados podem não ser relevantes quando o que se pretende é avaliar a qualidade química de um solo específico, pois podem não apresentar variações relevantes. Entre estes se enquadram a mineralogia e, frequentemente (para solos que não recebem adição diferenciada de adubos e/ou condicionadores), a presença de sais solúveis, elementos tóxicos e metais pesados e, mesmo, a disponibilidade da maioria dos nutrientes. A seguir serão elencados atributos químicos utilizados para a avaliação da qualidade do solo de maior interesse para o presente trabalho.

### 2.3.1 Matéria orgânica

Entre as causas da degradação química do solo, que resulta na queda de sua fertilidade, Bonini et al. (2015) destacam a redução dos teores e da qualidade da matéria orgânica. Assim, a determinação da quantidade de carbono orgânico é

importante, pois a falta da matéria orgânica caracteriza um solo degradado (Dias, 1998).

A degradação da matéria orgânica é um dos principais mecanismos de degradação do solo e tem efeito tanto sobre aspectos químicos quanto físicos, pois a matéria orgânica é a principal responsável pela estrutura da camada superficial do solo, de modo que a redução de seu teor traz consequências negativas para os cultivos e para o ambiente, como o aumento do escoamento superficial, o deslizamento de terras, a formação de voçorocas, o assoreamento de corpos d'água, dentre outras (Barbosa, 2012).

Para áreas degradadas, a adição de material orgânico no processo de recuperação do solo pode promover uma melhoria na sua estrutura, alterando favoravelmente a proporção de agregados estáveis em água (Campos et al., 2011). No entanto, tal estratégia nem sempre é viável, principalmente do ponto de vista econômico, sendo recomendada, para estes casos, a recuperação natural do solo a partir da revegetação. Sistemas florestais aumentam o teor de matéria orgânica e a reciclagem de nutrientes (Young, 1989; Franco e Faria, 1997; Gama-Rodrigues et al., 1999; Gama-Rodrigues et al., 2008; Macedo et al., 2008).

Meurer (2007) ressalta que a matéria orgânica tem acentuado efeito sobre a fertilidade do solo. De forma direta, sua mineralização pelos microrganismos disponibiliza para as plantas principalmente os macronutrientes N, P e S. Indiretamente, a desprotonação de sua superfície em função do pH gera cargas negativas que permitem a adsorção dos macronutrientes catiônicos (Ca, Mg e K) e sua posterior disponibilização na solução do solo.

Estudo clássico de Rajj (1969) revelou que, em solos tropicais (Latosolos e Argissolo), a maior parte das cargas advém da matéria orgânica, responsável por 60 a 90% da capacidade de troca de cátions (CTC). Meurer (2007) ressalta ainda que a alta reatividade da matéria orgânica faz com que ela seja reguladora da disponibilidade de vários micronutrientes, da atividade de metais pesados e elementos fitotóxicos e dos processos (mobilidade, volatilização, biodegradação) envolvendo moléculas orgânicas e inorgânicas adicionadas ao solo.



### 2.3.2 Capacidade de troca de cátions (CTC)

A capacidade de troca de cátions (CTC) indica a quantidade de íons positivos que um solo é capaz de reter, em determinadas condições, e permutar por quantidades estequiometricamente equivalentes de outros íons do mesmo sinal (Raij, 1969). A referida troca se dá entre os cátions retidos e os presentes na solução do solo.

As cargas negativas determinantes da CTC podem ter origem no interior da estrutura dos minerais - por substituição isomórfica, significativa em solos menos intemperizados, de clima temperado - ou na superfície das partículas minerais e orgânicas - que tem amplo predomínio em solos mais intemperizados, de clima tropical (Novais e Mello, 1997).

Quanto às cargas de superfície, seu quantitativo é estreitamente relacionado ao pH do solo, sendo então chamadas de cargas variáveis ou cargas dependentes do pH. Sua origem são as hidroxilas (OH) presentes nas arestas das argilas silicatadas e em grupamentos carboxílicos e fenólicos da matéria orgânica do solo (Novais e Mello, 1997). Enquanto em pH baixo a maior parte dessas terminações OH permanece inalterada e não gera cargas, o aumento do pH promove sua desprotonação (Canellas et al., 2008), sendo o H<sup>+</sup> deslocado para a solução (e neutralizado por íons OH<sup>-</sup>, formando H<sub>2</sub>O) e a carga negativa gerada na superfície equilibrada por um cátion trocável proveniente da solução do solo.

A quantificação das cargas negativas no complexo de troca, feita a partir da soma dos cátions trocáveis presentes do solo ao pH natural, resulta na CTC efetiva ( $CTC_{\text{efet}} = Al^{3+} + Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^{+} + Na^{+}$ ). Por outro lado, a  $CTC_{\text{pH}=7}$  resulta da soma das cargas negativas ocupadas por cátions trocáveis e aquelas geradas a partir da desprotonação das partículas em equilíbrio com uma solução tamponada a um pH específico (geralmente igual a 7).

A  $CTC_{\text{pH}=7}$  depende basicamente da quantidade e da natureza das partículas coloidais geradoras de carga (argila e matéria orgânica), sendo seu valor relativamente estável e prestando-se como um indicador da qualidade química do solo de amplo espectro. A  $CTC_{\text{efet}}$ , além de depender da quantidade e natureza dos coloides do solo, depende majoritariamente do pH, sendo seu valor mais volátil e servindo como indicador mais momentâneo da qualidade química do

solo. Para uma área específica, sem variações expressivas de solo e em que a mineralogia não justifica grandes diferenças no quantitativo de cargas negativas, estas provavelmente estarão associadas à evolução da matéria orgânica do solo, de modo que tanto a  $CTC_{\text{efet}}$  quanto a  $CTC_{\text{pH}=7}$  poderão detectar a melhora da condição química de um solo em processo de recuperação ou submetido a diferentes usos e manejos.

### 2.3.3 Reação do solo (pH)

A reação do solo, geralmente expressa por meio do pH, exerce papel central na qualidade química do solo. Além do já mencionado efeito sobre a capacidade de troca de cátions, Meurer (2007) elenca diversos efeitos do pH sobre o solo relevantes para as plantas: disponibilidade dos elementos essenciais à nutrição da planta, solubilidade de elementos que podem ter efeito tóxico sobre as plantas, atividade de microrganismos, favorecimento ou não de doença nas plantas, habilidade de competição entre diferentes espécies de plantas e condições físicas do solo.

Em relação à disponibilidade de nutrientes, há faixas de valor de pH consideradas adequadas para cada grupo de culturas. Para alfafa, aspargo, piretro, trevo doce e beterraba açucareira, acima de 6,5. Para trevo vermelho, milho, soja, sorgo, trigo, cevada, macieira e pereira, entre 5,5 e 6,5. Para batata, fumo e cerejas, entre 5,0 e 5,5. Para azaleia, hortências, erva-mate e mandioca, menor que 5,0 (Meurer, 2007). Para espécies florestais tais faixas não são imediatamente aplicáveis e precisam ser vistas com cautela, uma vez que são frequentes relatos de bom desempenho vegetativo e produtividade mesmo em condições de pH e disponibilidade de nutrientes consideradas restritivas (Rigatto et al., 2005; Gama-Rodrigues et al., 2008), o que deve decorrer da elevada capacidade de exploração do solo pelo sistema radicular dessas plantas.

#### 2.3.4 Disponibilidade de nutrientes e elementos tóxicos

Para o bom desenvolvimento a planta necessita de luz, água, temperatura adequada e de elementos minerais. O solo tem a responsabilidade de armazenar e fornecer água e elementos minerais essenciais para as plantas.

Os solos agrícolas brasileiros são ácidos e de baixa fertilidade e necessitam ser manejados de forma correta em relação à sua fertilidade. Os elementos essenciais ao crescimento das plantas são dezessete: C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, B, Cl, Cu, Fe, Mn, Zn, Mo e Ni (Meurer, 2007). Esses nutrientes são absorvidos em quantidades específicas necessárias ao desenvolvimento da planta, sendo a quantidade o critério que define como macronutrientes e micronutrientes (Gianello e Giasson, 2004).

Os principais fatores que afetam a disponibilidade dos nutrientes no solo são o pH e o teor de matéria orgânica. Os macronutrientes demonstram maior disponibilidade para as plantas em pH na faixa de 6-6,5. Nos solos brasileiros o P é elemento que mais limita o crescimento das plantas, sendo muito pouco disponível em condições de acidez, na qual os óxidos, presentes em elevados teores, têm sua superfície positivamente carregada, atraindo ânions e formando com estes uma “esfera-interna”, o que diminui sensivelmente a disponibilidade de P para as plantas. Para os micronutrientes, por outro lado, exceção feita ao Mo, estes se tornam mais disponíveis em condições de pH mais ácido (Meurer, 2007).

Os elementos que prejudicam o crescimento das plantas são considerados elementos tóxicos, valendo lembrar que alguns nutrientes em teores excessivos nos solos podem se tornar tóxicos às plantas. Em solos ácidos o Al é o principal elemento fitotóxico e o grau de tolerância varia de acordo com a espécie, podendo ser expresso em termos absolutos (concentração no solo) ou relativos (proporção percentual de ocupação das cargas efetivas do complexo de troca - ou valor m). O Al prejudica o sistema radicular pela alteração na morfologia e no crescimento das raízes, deixando-as mais grossas e reduz as raízes secundárias (Meurer, 2007).

## 2.4 Relação entre cobertura vegetal e atributos físicos e químicos do solo

A exploração agrícola no mundo provoca rápida degradação do solo, principalmente nos países tropicais em desenvolvimento (Mielniczuk, 2008). No Estado do Rio de Janeiro, informações relativamente recentes dão conta de que a cobertura média é de 18,6% da mata original (SOS Mata Atlântica/INPE, 2014). Para a Região Norte Fluminense, Gama-Rodrigues et al. (2008) mencionam que a cobertura atual de Mata Atlântica é inferior a 5 % da mata original, ressaltando que nessa região a degradação do solo foi consequência de um longo período de atividades agropecuárias, especialmente com monocultivo de cana-de-açúcar e café, com mecanização intensiva e uso regular do fogo, culminando, atualmente, no uso da terra com pastagens degradadas, o que desperta preocupação com a qualidade do solo e a sustentabilidade da exploração agrícola.

A utilização de sistemas florestais melhora a fertilidade do solo, pois promove a reciclagem de nutrientes de camadas profundas, aumenta o teor de matéria orgânica e otimiza a atividade biológica, além de aumentar o estoque de carbono (Young, 1989; Franco e Faria, 1997; Gama-Rodrigues et al., 1999; Gama-Rodrigues et al. 2008; Macedo et al., 2008). Como muitos pesquisadores consideram a matéria orgânica o principal agente de estabilização dos agregados do solo (Tisdall e Oades, 1982; Castro Filho et al., 1998; Gang et al., 1998; Llanillo et al., 2006; Salton et al., 2008), a revegetação favorece também a melhoria da qualidade física do solo. Os resíduos vegetais depositados no solo e o consequente incremento no teor de matéria orgânica influenciam de forma positiva a qualidade física do solo, fazendo com que, além da redução da erosão, o sistema radicular cresça em condições ótimas (Souza e Resende, 2003).

Como a matéria orgânica favorece a formação de agregados, aumentando a porosidade total e, conseqüentemente, a condição hídrica do solo, várias ações de manejo visam a elevação e a manutenção de seu teor no solo. Os restos culturais e cobertura morta são eficazes no aumento da capacidade produtiva dos solos e da produção de material orgânico, diminuindo o efeito da compactação e dos que causam erosão no solo (Castro Filho et al., 1998). Milne e Haynes (2004) e Vasconcelos et al. (2010), em seus trabalhos, detectaram influência positiva da serapilheira sobre os agregados estáveis do solo, e

certificaram o benefício da camada morta e da matéria orgânica para a estrutura do solo. Por outro lado, o uso e manejo (milho, cana-de-açúcar e pastagem) levaram à degradação dos atributos físicos do solo comparando-se ao mesmo sob floresta (Centurion et al., 2000). Em mata nativa os solos geralmente apresentam características físicas desejáveis (Andreola et al., 2000).

No trabalho de Araújo et al. (2007) sobre a relação entre a qualidade e os atributos físicos, químicos e biológicos do solo, foi constatada relação estreita e inversa entre a qualidade do solo e a intensidade de uso a que as áreas foram submetidas, sendo que nas áreas manejadas (pastagem natural, pastagem cultivada, cultivo convencional com culturas anuais e florestamento de pinus) a qualidade foi menor do que na cobertura vegetal de Cerrado.

Araujo et al. (2004), comparando atributos físicos de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado com culturas anuais e sob mata nativa, observaram que o solo cultivado apresentou valores maiores de densidade,  $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ , e menores de porosidade total,  $0,30 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ , e de macroporosidade,  $0,04 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Observaram ainda que sob cultivo a curva de retenção de água foi afetada pela densidade, com a ocorrência de porosidade de aeração e resistência à penetração restritivas ao crescimento radicular mesmo na faixa de água disponível, enquanto sob mata nativa o intervalo hídrico ótimo foi mais amplo, se manteve igual à água disponível.

As diversas espécies de leguminosas exercem importante papel na cobertura do solo, na incorporação de material vegetal e no suprimento de nitrogênio nos ecossistemas a partir da fixação biológica em interação com microorganismos, fazendo com que sejam eficientes na recuperação de áreas degradadas (Franco et al., 2003).

Carvalho et al. (2000), trabalhando com a introdução de leguminosas arbóreas em pastagens, verificaram que depois de quatro anos a forrageira se apresentou mais verde, comprovando que além de aumentar o teor de proteína da forrageira as áreas sob a copa das leguminosas também mantiveram a qualidade do material na seca.

A área investigada no presente trabalho, revegetada em dezembro de 1998 com eucalipto e leguminosas arbóreas e tendo como referências uma mata secundária e uma pastagem degradada, foi estudada por diversos autores, em

particular quanto à deposição de serapilheira e aos atributos químicos e biológicos do solo. Gama-Rodrigues et al. (2008), avaliando amostras de solo coletadas em agosto de 2001 (menos de três anos após a revegetação) sob as leguminosas acácia e sabiá, eucalipto, pasto e capoeira, encontraram baixa fertilidade da camada 0-0,10 m de profundidade em todas as áreas, mas observaram que a acácia possibilitou rápida cobertura e conseqüentemente proteção ao solo e propiciou, juntamente com o sabiá, os maiores valores de pH e soma de bases e os menores teores de carbono orgânico.

Ainda na mesma área do presente trabalho, Zaia et al. (2008) e Costa et al. (2014), avaliando resultados de análise de solo coletado em 2003, cerca de cinco anos após a revegetação, nas áreas sob as leguminosas acácia e sabiá, pasto e capoeira, encontraram teores de carbono orgânico equivalentes entre as quatro áreas. Diferentemente, Ndaw (2007), em amostras de setembro de 2005, e Nunes et al. (2016), em amostras de julho de 2007, obtiveram teores de carbono orgânico ainda superiores na capoeira e equivalentes entre o pasto e as duas leguminosas. Em amostras coletadas em dezembro de 2010, doze anos após a revegetação, Rita et al. (2013) verificaram teores de carbono orgânico equivalentes entre as leguminosas e a capoeira, e inferiores no pasto. A partir das amostras coletadas naquela mesma ocasião e com o objetivo de calcular os estoques de C e N, Gomes (2014) obteve densidade do solo até 1 m de profundidade menor na capoeira que nas demais coberturas, sendo os valores médios na capoeira de 1,17 e 1,14 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente para as camadas 0-0,10 e 0,10-0,20 m, e nas demais coberturas de 1,38 e 1,47 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente para as referidas camadas. Em todos os trabalhos citados, uma baixa fertilidade do solo foi observada em todas as áreas, porém com superioridade das leguminosas e inferioridade da capoeira quanto aos valores de pH e teores de nutrientes. Em uma mais abrangente análise da qualidade do solo da área em questão, as diferenças acima relatadas podem ser relacionadas a alterações na respiração e biomassa microbiana e na biomassa e diversidade da fauna do solo, já tratadas por outros autores (Gama-Rodrigues et al., 2008; Manhães et al., 2013; Ribeiro et al., 2014), assim como podem ser associadas a aspectos físicos do solo, alguns alvos do presente estudo, que podem ser ora causa, ora efeito, das alterações químicas e/ou biológicas detectadas.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Caracterização do local de estudo

A área de estudo localiza-se no Município de Conceição de Macabú, Norte Fluminense, na Fazenda Carrapeta (21°37' S e 42°05' W). Pela classificação de Köppen, o clima da região é do tipo Am, quente e úmido, com temperatura média de 26 °C e precipitação média anual de 1400 mm, concentrada entre outubro e março, com período seco entre junho e setembro (Gama-Rodrigues et al., 2008). O relevo é forte ondulado, com declividade em torno de 0,35 m m<sup>-1</sup>. O solo é um Argissolo Vermelho-Amarelo Distrófico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Embrapa, 2013), ou um *Typic Kandiodult*, pela classificação americana (Soil Survey Staff, 2014).

#### 3.2 Descrição da área experimental

A área experimental constitui-se de cinco talhões com coberturas vegetais distintas, adjacentes umas às outras, na mesma cota de altitude. Três desses talhões são constituídos de plantios puros de espécies de leguminosas arbóreas, sendo: talhão 1 - *Acacia auriculiformis* (Acácia); talhão 2 - *Mimosa caesalpinifolia* (Sabiá); e talhão 3 - *Inga* spp. (Ingá). Estes talhões têm área aproximada de 1500 m<sup>2</sup> (75 x 20 m), sendo as espécies implantadas em 1998, todas inoculadas com

estirpes selecionadas de bactérias fixadoras de N<sub>2</sub> atmosférico e fungos micorrízicos (um combinado de *Gigaspora margarita* e *Glomus clarum*), conforme Gama-Rodrigues et al. (2008).

As outras duas coberturas vegetais estudadas foram um remanescente de Mata Atlântica (talhão 4) e um pasto (talhão 5). O remanescente de Mata Atlântica, ou capoeira, encontra-se em estágio secundário de sucessão, estando há cerca de 50 anos sem remoção de árvores. A capoeira foi escolhida como referência de área não degradada e, possivelmente, de maior qualidade do solo, pois ela é um dos ecossistemas que é utilizado para avaliar as alterações do solo de acordo com a forma de uso e de técnicas de manejo comparando os solos manejados e os não manejados (Barros e Comerford, 2002).

O pasto é típico da região, não manejado tecnicamente, com baixa capacidade de suporte animal, sendo observados sinais de ocorrência de fogo e de erosão laminar, com falhas na cobertura vegetal do solo, com predomínio de capim-gordura (*Melinis minutiflora*), grama-pernambuco (*Paspalum maritimum*) e sapê (*Imperata rasilensis*), além de plantas invasoras como assa-peixe (*Vernonia polysphaera*). Pelas características descritas, o pasto foi considerado como referência de área degradada e, possivelmente, de baixa qualidade do solo, sendo esta a vegetação que ocupava os talhões 1, 2 e 3 anteriormente ao plantio das espécies arbóreas.

### **3.3. Avaliação da qualidade do solo**

Em julho de 2015 foram coletadas, em cada talhão, amostras de solo das camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade, com estrutura deformada e indeformada, em seis pontos (repetições) afastados 5 m entre si, no sentido da maior declividade. As amostras deformadas foram secas ao ar e passadas em peneira de malha com abertura de 2 mm, obtendo-se a “terra fina seca ao ar” (TFSA), que foi acondicionada em sacos plásticos e levada ao Laboratório de Solos da UENF/CCTA, para a caracterização química e análise granulométrica. As amostras indeformadas foram coletadas em anéis volumétricos metálicos de 100 mL (com cerca de 50 mm de altura e de diâmetro), tendo sido utilizadas para a determinação da densidade, porosidade e curva de retenção de água no solo.



### 3.3.1 Atributos físicos

#### *3.3.1.1 Composição granulométrica do solo, teor de argila dispersa em água e grau de flocculação da argila*

As análises granulométrica e de argila dispersa em água foram feitas a partir das amostras indeformadas, com base em Embrapa (1997), com modificações. No primeiro caso, fez-se a dispersão de 20 g de solo (TFSA) em 200 mL de água + 20 mL de NaOH ( $1 \text{ mol L}^{-1}$ ), com agitação por 16 horas a 120 ciclos por minuto em agitador horizontal, sendo a fração areia retida em peneira de malha  $53 \mu\text{m}$ , a fração argila obtida pelo método da pipeta (durante a sedimentação da suspensão diluída com água para 1 L, em proveta), e a fração silte obtida por diferença. O teor de argila dispersa em água foi obtido em procedimento semelhante ao acima descrito, porém fazendo-se a agitação de dispersão sem adicionar NaOH (somente em água) e sem a separação da areia antes da suspensão ser submetida ao processo de sedimentação. O grau de flocculação foi obtido também conforme Embrapa (1997).

#### *3.3.1.2 Densidade do solo*

Conforme Embrapa (1997), as amostras indeformadas foram secas em estufa a  $105^\circ\text{C}$ , por um período de 48 h, sendo a densidade do solo calculada por:

$$\rho = m_s / V \quad (2)$$

onde  $\rho$  = densidade do solo ( $\text{Mg m}^{-3}$ ),  $m_s$  = massa do solo seco em estufa (Mg) e  $V$  = volume do anel ( $\text{m}^3$ ).

### 3.3.1.3 Porosidade total do solo

A porosidade total (PT, em  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ) foi calculada a partir da densidade do solo ( $\rho$ ) e da densidade das partículas (DP, assumida como  $2,65 \text{ Mg m}^{-3}$ , valor padrão), conforme Embrapa (1997), por meio da equação:

$$PT = 1 - \rho / DP \quad (3)$$

### 3.3.1.4 Curva de retenção de água no solo e distribuição de poros por tamanho

A curva de retenção de água foi obtida a partir das amostras coletadas em anéis volumétricos, antes da secagem para a obtenção da densidade, conforme descrito a seguir e tendo por base Libardi (1995). As amostras foram saturadas durante 24h e levadas aos funis de placa porosa e às câmaras de pressão de Richards, permanecendo até entrarem em equilíbrio (até que cessasse a drenagem de água). Foram utilizadas as tensões 1, 3, 6 e 10 kPa, nos funis, e 33, 100, 500 e 1500 kPa, nas câmaras, usualmente empregadas no Laboratório de Solos da UENF/CCTA e normalmente suficientes para a obtenção de um ajuste dos dados ao modelo matemático abaixo mencionado.

Atingido o equilíbrio, as amostras foram pesadas, levadas à estufa por 48 h e novamente pesadas para a determinação da umidade volumétrica ( $\theta$ ,  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ), obtida pela equação:

$$\theta = \frac{Va}{V} = \frac{ma/p_a}{V} \quad (4)$$

onde Va é o volume de água na amostra em equilíbrio no funil ou na câmara de pressão; V é o volume do anel;  $p_a$  é a densidade da água; e ma é a massa de água na amostra, obtida pela diferença entre as pesagens no momento do equilíbrio e após a secagem em estufa.

Os resultados foram ajustados à equação de Van Genuchten (1980):

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |\alpha \cdot \phi_m|^n\right)^m} \quad (5)$$

onde  $\theta_s$  é a umidade na saturação ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\theta_r$  é a umidade residual ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );  $\phi_m$  é o potencial mátrico (kPa);  $\alpha$  ( $\text{kPa}^{-1}$ ) e  $m$  e  $n$  (adimensionais) são parâmetros empíricos do modelo. Para obtenção das equações,  $\theta_s$  foi assumida como correspondente à porosidade total,  $n$  foi considerado dependente de  $m$  ( $m = 1 - 1/n$ ), e  $\theta_r$ ,  $\alpha$  e  $m$  foram estimados com o auxílio do suplemento 'solver' do programa Microsoft Office Excel 2010, pelo método dos mínimos quadrados.

A curva de retenção foi utilizada para a avaliação da distribuição de poros por tamanho, tendo sido consideradas, conforme tratado no tópico 2.2.3, uma escala mais usual ou tradicional, com as classes macroporos e microporos sendo delimitadas pelo diâmetro de 50  $\mu\text{m}$  (correspondentes à tensão de 6 kPa), e uma escala mais detalhada, com as classes macroporos, mesoporos, microporos e criptoporos sendo delimitadas pelos valores de diâmetro 100, 30 e 0,2  $\mu\text{m}$ , respectivamente (correspondentes às tensões 3, 10 e 1500 kPa). O quantitativo de poros em cada uma das classes de tamanho acima citadas foi determinado a partir da diferença entre as umidades nas tensões que as delimitam, obtidas a partir da equação ajustada para a curva de retenção.

Cabe ressaltar que para os macroporos, em ambas as escalas, o limite superior de umidade é o de saturação (correspondente à tensão 0 kPa e assumida como equivalente à porosidade total), enquanto para os microporos, na escala mais usual, e para os criptoporos, na escala mais detalhada, o limite inferior de umidade é o solo absolutamente seco (ou umidade zero, situação na qual a equação de Van Genuchten (1980) sequer é válida, mas que corresponderia a uma tensão da água infinita). Ressalte-se ainda que atributos hídricos geralmente provenientes da curva de retenção encontram correspondência na escala mais detalhada de distribuição de poros por tamanho acima mencionada. Assim, o que usualmente se chama de água disponível (AD) corresponde aos microporos, sendo os valores de umidade em seus limites superior e inferior equivalentes, respectivamente, à capacidade de campo ( $\theta_{cc}$ ) e ao ponto de murcha permanente ( $\theta_{PMP}$ ). Além disso, a soma de macroporos e mesoporos corresponde à porosidade de aeração (ou livre de água) quando o

solo se encontra na capacidade de campo, enquanto os criptoporos respondem pela retenção de água na faixa não disponível às plantas, em tensões superiores a 1500 kPa (sendo equivalentes numericamente a  $\theta_{PMP}$ ).

### 3.3.2 Atributos químicos

O carbono orgânico foi determinado com dicromato de potássio por colorimetria, pelo método descrito por Anderson e Ingram (1993). Outros atributos químicos foram determinados segundo as marchas analíticas apresentadas em Embrapa (1997), brevemente descritos a seguir: nitrogênio total, determinado pelo método Kjeldahl por câmara de difusão; pH em água, determinado por potenciometria em solução solo-água, proporção 1:2,5; fósforo disponível, extraído com solução Mehlich-1 e determinado por espectrofotometria de absorção atômica; alumínio trocável, extraído com solução de KCl 1 mol L<sup>-1</sup>, na proporção solo-solução de 1:10, e determinado por titulação com NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup>, com azul de bromotimol como indicador; H + Al, extraído com solução de acetato de cálcio 0,5 mol L<sup>-1</sup> tamponada a pH = 7,0, e determinado por titulação com NaOH 0,025 mol L<sup>-1</sup>, usando-se fenolftaleína como indicador; cálcio e magnésio trocáveis, extraídos com solução KCl 1 mol L<sup>-1</sup> e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; e potássio e sódio trocáveis, extraídos pelo extrator de Mehlich-1 e determinados por fotometria de chama.

Além do pH e teores de C e demais elementos acima mencionados, foram também calculados, a partir das equações descritas em Embrapa (1997), os valores de capacidade de troca de cátions efetiva e pH = 7,0 (CTC<sub>efet</sub> e CTC<sub>pH=7,0</sub>, respectivamente), a soma de bases (SB = Ca + Mg + K + Na), a saturação por bases (valor V, relação percentual entre a SB e a CTC<sub>pH=7,0</sub>) e a saturação por alumínio (valor m, relação percentual entre o Al e a CTC<sub>efet</sub>).

### 3.4 Análise estatística

De forma semelhante a outros trabalhos realizados na presente área de estudo (Gama-Rodrigues et al., 2008; Zaia et al., 2008; Costa et al., 2014), e a

despeito de não serem atendidos como rigor os preceitos básicos da estatística experimental (casualização, repetição e controle local), a análise estatística foi feita admitindo-se um delineamento inteiramente casualizado. A ausência desses preceitos foi relevada a partir da fixação dos pontos de coleta em uma mesma cota de altitude e com base na uniformidade pedológica entre os talhões, constatada tanto pelos aspectos morfológicos do perfil (*in situ*) quanto pela composição granulométrica (análise laboratorial) dos horizontes do solo. Foram considerados, ainda, os tratamentos em um esquema de parcelas subdivididas, com as coberturas nas parcelas e as duas camadas da amostragem nas subparcelas, e os seis pontos de coleta como repetições. A análise de variância foi feita com o programa "Assistat", sendo a comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Qualidade física do solo

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados da análise granulométrica do solo, assim como o teor de argila dispersa em água e o grau de flocculação da argila. Não houve diferença entre as coberturas vegetais para as frações granulométricas areia e argila, revelando uniformidade do solo entre os talhões, o que dá suporte à admissão do delineamento inteiramente casualizado para a realização da análise de variância. Para a fração silte, os baixos teores obtidos são condizentes com os usualmente observados em solos tropicais altamente intemperizados (Ferreira, 2010) e, embora significativa, a máxima diferença observada entre as coberturas ( $104,3 - 83,0 = 21,3 \text{ g kg}^{-1}$ , ou 2,13%) é inexpressiva para impor diferenças no comportamento químico ou físico do solo.

Mesmo sendo as camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m parte do horizonte superficial do solo (ou horizonte A), estas apresentaram diferenças entre si quanto aos teores de areia e argila (Tabela 1). Tal fato é condizente com a morfologia observada nos perfis, pois, enquanto na primeira camada aparecem os atributos típicos de horizonte "A", na 0,10-0,20 m já aparecem alguns atributos típicos do horizonte B subsequente, podendo, esta camada transicional, ser identificada como sub-horizonte "AB". O aumento de argila em profundidade é uma ocorrência típica da classe Argissolo, em que o máximo valor de argila ocorre no horizonte subsuperficial B textural, que não foi coletado e examinado no presente trabalho.

Tabela 1: Composição granulométrica do solo (teores de areia, silte e argila), teor de argila dispersa em água (Arg. Disp.) e grau de floculação da argila (Grau Floc.) sob as coberturas vegetais e nas camadas de solo estudadas

| Cobertura Vegetal                   | Areia                             | Silte         | Argila        | Arg. Disp.    | Grau Floc.    |
|-------------------------------------|-----------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|                                     | ----- (g kg <sup>-1</sup> ) ----- |               |               |               | (%)           |
| <b>Camada 0-0,10 m</b>              |                                   |               |               |               |               |
| Capoeira                            | 640,0                             | 85,5          | 274,5         | 235,17        | 22,33         |
| Acácia                              | 627,1                             | 70,1          | 302,8         | 233,15        | 14,46         |
| Ingá                                | 610,8                             | 93,1          | 296,1         | 231,84        | 21,76         |
| Sabiá                               | 603,8                             | 96,8          | 299,4         | 219,23        | 18,97         |
| Pasto                               | 637,6                             | 90,7          | 271,7         | 243,51        | 18,30         |
| <b>Média</b>                        | <b>623,8A</b>                     | <b>87,2B</b>  | <b>288,9B</b> | <b>232,6B</b> | <b>19,17A</b> |
| <b>Camada 0,10-0,20 m</b>           |                                   |               |               |               |               |
| Capoeira                            | 598,5                             | 93,8          | 307,6         | 324,22        | 17,80         |
| Acácia                              | 510,0                             | 96,0          | 394,1         | 256,26        | 16,82         |
| Ingá                                | 535,7                             | 108,4         | 356,0         | 295,54        | 17,36         |
| Sabiá                               | 515,4                             | 111,7         | 372,9         | 294,93        | 17,21         |
| Pasto                               | 533,3                             | 110,2         | 356,5         | 308,48        | 17,11         |
| <b>Média</b>                        | <b>538,6B</b>                     | <b>104,0A</b> | <b>357,4A</b> | <b>295,9A</b> | <b>17,26A</b> |
| <b>Média das camadas (0-0,20 m)</b> |                                   |               |               |               |               |
| Capoeira                            | 619,2a                            | 89,7ab        | 291,1a        | 279,7a        | 20,07a        |
| Acácia                              | 568,5a                            | 83,0b         | 348,4a        | 244,7a        | 15,64b        |
| Ingá                                | 573,2a                            | 100,7ab       | 326,0a        | 263,7a        | 19,56ab       |
| Sabiá                               | 559,6a                            | 104,3a        | 336,1a        | 257,1a        | 18,09ab       |
| Pasto                               | 585,4a                            | 100,5ab       | 314,1a        | 276,0a        | 17,71ab       |
| <b>Média</b>                        | <b>581,2</b>                      | <b>95,6</b>   | <b>323,2</b>  | <b>264,2</b>  | <b>18,21</b>  |
| <b>CV (%)<sup>(**)</sup></b>        | 8,61                              | 17,90         | 13,07         | 14,70         | 18,45         |

Obs.: Para cada coluna (ou seja, para cada atributo do solo), médias seguidas de mesma letra maiúscula (que comparam camadas) ou de mesma letra minúscula (que comparam coberturas vegetais) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O resultado da análise de variância e teste de médias para a argila dispersa em água foi idêntico ao da argila total, sendo os teores maiores na camada 0,10-0,20 m que na 0-0,10 m, e não havendo diferença entre as coberturas vegetais (Tabela 1). Segundo Nunes (2003), a argila dispersa em água é um sensível indicador de qualidade do solo, de modo que o referido resultado indica que, no que se refere à estabilidade dos “flocos” que compõem os agregados (Brady e Weil, 2010), haveria equivalência de qualidade do solo entre os talhões.

O grau de floculação da argila, por outro lado, não diferiu entre as camadas, mas diferiu entre as coberturas vegetais (isso, a despeito da argila e da argila dispersa em água não diferirem entre talhões). A maior média foi verificada na capoeira (20,07%) e a menor na acácia (15,64%), ficando as demais coberturas em posição intermediária (Tabela 1). A superioridade da capoeira pode ser reflexo de maior teor de carbono no solo ou de presença de matéria orgânica mais eficaz em promover a agregação das partículas. Ressalta-se, no entanto, que as diferenças foram sutis, da ordem de 5%. Valores nessa faixa (entre 15 e 20%) podem ser considerados baixos, estando muito distantes dos observados em solos fortemente microestruturados, como no horizonte B de Latossolos oxidicos, em que a argila dispersa em água se aproxima de zero e o grau de floculação de 100% (Alleoni e Camargo, 1994). No presente caso, em todos os talhões e nas duas camadas de solo estudadas, os valores de grau de floculação ficaram, inclusive, abaixo dos usualmente obtidos para a classe Argissolo (Portugal et al., 2010; Santos et al., 2010; Cunha et al., 2011), estando mais próximos do que se verifica para Planossolos ou outros solos com elevado teor de sódio (Corrêa et al., 2003; Silva Neto et al., 2015). Condições de baixa floculação, tendo a água como agente de transporte, são pré-requisitos para que a argila do horizonte superficial sofra os processos pedogenéticos tanto de elutriação (erosão seletiva) quanto de lessivagem (translocação para o horizonte subsuperficial), levando ao aumento do teor de argila em profundidade, ao entupimento de poros e ao adensamento do horizonte B textural do solo (Corrêa et al., 2003; Cunha et al., 2011; Kämpf e Curi, 2012). Além disso, o elevado teor de argila dispersa e o baixo grau de floculação indicam também baixa estabilidade estrutural nas camadas superficiais, o que torna o solo mais susceptível ao processo de compactação pelo manejo.

Na Tabela 2 estão apresentados os resultados de densidade, porosidade total e distribuição de poros por tamanho. Em relação à densidade do solo, os valores são próximos e ligeiramente inferiores aos verificados por Gomes (2014) para a mesma área. A capoeira diferenciou-se dos demais talhões, apresentando as menores médias tanto na camada 0-0,10 m quanto na 0,10-0,20 m (1,114 e 1,093 Mg m<sup>-3</sup>, respectivamente). Em relação às demais coberturas, as maiores médias ocorreram na acácia, sendo 1,386 Mg m<sup>-3</sup> na camada 0-0,10 m, sem se



diferenciar do pasto, e  $1,474 \text{ Mg m}^{-3}$  na 0,10-0,20 m, superando todas as coberturas vegetais, inclusive o pasto. Na camada 0-0,10 m as médias do sabiá e ingá foram intermediárias entre a capoeira e o pasto, enquanto na 0,10-0,20 m o sabiá foi superior ao ingá, mas este não diferiu do pasto. Na comparação entre as camadas, para a capoeira estas não diferiram entre si, mas verificou-se que nas três coberturas florestais plantadas (acácia, ingá e sabiá) os valores de densidade do solo da 0-0,10 m foram menores do que os da 0,10-0,20 m, enquanto no pasto ocorreu o inverso (maior na 0,10-0,20 m do que na 0-0,10 m).

Tabela 2: Densidade (Ds), porosidade total (PT) e distribuição de poros por tamanho<sup>(\*)</sup> de um Argissolo Vermelho-Amarelo sob diferentes coberturas vegetais, nas camadas de profundidade 0-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0-0,20 m (média), em Conceição de Macabu, RJ

| Cobertura Vegetal                   | Ds<br>( $\text{Mg m}^{-3}$ ) | PT           | ----- (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> ) ----- |              |              |              |              |              |
|-------------------------------------|------------------------------|--------------|-----------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|                                     |                              |              | macro1*                                       | micro1*      | macro2*      | meso         | micro2*      | cripto       |
| <b>Camada 0-0,10 m</b>              |                              |              |                                               |              |              |              |              |              |
| Capoeira                            | 1,114cA                      | 0,580aA      | 0,398aA                                       | 0,181eB      | 0,357aA      | 0,058bB      | 0,024dB      | 0,140dB      |
| Acácia                              | 1,386aB                      | 0,477cA      | 0,249dA                                       | 0,228cB      | 0,221dA      | 0,044dB      | 0,061bB      | 0,150bcB     |
| Ingá                                | 1,215bB                      | 0,542bA      | 0,321bA                                       | 0,221dB      | 0,286bA      | 0,054bcB     | 0,058bB      | 0,144cdB     |
| Sabiá                               | 1,255bB                      | 0,527bA      | 0,294cA                                       | 0,233bB      | 0,261cA      | 0,050cdB     | 0,046cB      | 0,170aB      |
| Pasto                               | 1,361aA                      | 0,486cB      | 0,223dB                                       | 0,263aA      | 0,177eB      | 0,073aA      | 0,081aA      | 0,156bA      |
| <b>Média</b>                        | <b>1,266</b>                 | <b>0,522</b> | <b>0,297</b>                                  | <b>0,225</b> | <b>0,260</b> | <b>0,056</b> | <b>0,054</b> | <b>0,152</b> |
| <b>Camada 0,10-0,20 m</b>           |                              |              |                                               |              |              |              |              |              |
| Capoeira                            | 1,093dA                      | 0,587aA      | 0,355aB                                       | 0,233eA      | 0,301aB      | 0,080aA      | 0,049cA      | 0,158dA      |
| Acácia                              | 1,474aA                      | 0,444dB      | 0,175cB                                       | 0,268cA      | 0,145dB      | 0,049cA      | 0,080aA      | 0,170cA      |
| Ingá                                | 1,283cA                      | 0,516bB      | 0,241bB                                       | 0,275bA      | 0,197cB      | 0,068bA      | 0,069bA      | 0,182bA      |
| Sabiá                               | 1,370bA                      | 0,483cB      | 0,193cB                                       | 0,290aA      | 0,146dB      | 0,072bA      | 0,070bA      | 0,194aA      |
| Pasto                               | 1,271cB                      | 0,520bA      | 0,265bA                                       | 0,255dB      | 0,220bA      | 0,070bA      | 0,070bB      | 0,160dA      |
| <b>Média</b>                        | <b>1,298</b>                 | <b>0,510</b> | <b>0,246</b>                                  | <b>0,264</b> | <b>0,202</b> | <b>0,068</b> | <b>0,068</b> | <b>0,173</b> |
| <b>Média das camadas (0-0,20 m)</b> |                              |              |                                               |              |              |              |              |              |
| Capoeira                            | 1,104                        | 0,583        | 0,377                                         | 0,207        | 0,329        | 0,069        | 0,037        | 0,149        |
| Acácia                              | 1,430                        | 0,460        | 0,212                                         | 0,248        | 0,183        | 0,046        | 0,071        | 0,160        |
| Ingá                                | 1,249                        | 0,529        | 0,281                                         | 0,248        | 0,242        | 0,061        | 0,063        | 0,163        |
| Sabiá                               | 1,312                        | 0,505        | 0,243                                         | 0,262        | 0,204        | 0,061        | 0,058        | 0,182        |
| Pasto                               | 1,316                        | 0,503        | 0,244                                         | 0,259        | 0,199        | 0,071        | 0,076        | 0,158        |
| <b>Média</b>                        | <b>1,282</b>                 | <b>0,516</b> | <b>0,271</b>                                  | <b>0,245</b> | <b>0,231</b> | <b>0,062</b> | <b>0,061</b> | <b>0,162</b> |
| <b>CV (%)<sup>(**)</sup></b>        | <b>3,85</b>                  | <b>3,61</b>  | <b>6,93</b>                                   | <b>0,63</b>  | <b>6,84</b>  | <b>7,61</b>  | <b>7,46</b>  | <b>3,85</b>  |

(\*) distribuição na escala usual: macroporos (macro1: diâmetro  $\geq 50 \mu\text{m}$ ) e microporos (micro1: diâmetro  $\leq 50 \mu\text{m}$ ); distribuição na escala detalhada: macroporos (macro2: diâmetro  $\geq 100 \mu\text{m}$ ), mesoporos (meso:  $100 \mu\text{m} \geq$  diâmetro  $\geq 30 \mu\text{m}$ ), microporos (micro2:  $30 \mu\text{m} \geq$  diâmetro  $\geq 0,2 \mu\text{m}$ ) e criptoporos (cripto: diâmetro  $\leq 0,2 \mu\text{m}$ ); (\*\*) CV - coeficiente de variação, em %.

Obs.: Para cada coluna (ou seja, para cada atributo do solo), médias seguidas de mesma letra maiúscula (que comparam as camadas) ou de mesma letra minúscula (que comparam as coberturas) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Para a porosidade total (Tabela 2), o comportamento foi o inverso do verificado para a densidade, com os maiores valores ocorrendo na capoeira e os menores na acácia, sendo na camada 0-0,10 m sem se diferenciar do pasto e na 0,10-0,20 m de forma isolada. Em posição intermediária, na camada 0-0,10 m, ficaram as coberturas ingá e sabiá (iguais entre si e diferenciando-se das demais), enquanto na 0,10-0,20 m, ficaram sabiá, ingá e pasto (o sabiá superior ao ingá, que não diferiu do pasto). Comparando-se as camadas, para a capoeira não houve diferença, mas para o pasto a porosidade foi maior na 0,10-0,20 m do que na 0-0,10 m (maior compactação na superfície), enquanto nas três coberturas plantadas (acácia, ingá e sabiá) foi menor na 0,10-0,20 m do que na 0-0,10 m (menor compactação na superfície).

O comportamento descrito para a densidade e porosidade demonstra que: (i) a preservação da vegetação original (e a ausência de manejo agrícola) permitiu que o solo da capoeira mantivesse sua boa estrutura original, em ambas as camadas; (ii) a remoção da vegetação nativa e preparo do solo (ambos com operações mecanizadas) e subsequente utilização com pastagem levaram à compactação de ambas as camadas estudadas, de forma mais pronunciada na 0-0,10 m, possivelmente em decorrência do pisoteio de animais e do impacto direto da chuva na superfície do solo, em que ocorrem, no presente caso, falhas na cobertura vegetal; e (iii) a revegetação das áreas sob pastagem permitiu que a camada superficial 0-0,10 m apresentasse melhora de estrutura em relação à 0,10-0,20 m, possivelmente como consequência da presença de serapilheira e decorrente aumento da atividade biológica e do teor de matéria orgânica do solo.

Santos et al. (2010), avaliando um Argissolo Amarelo sob pastagem e sob floresta nativa secundária, também encontraram valores maiores de densidade e menores de porosidade total na camada 0-0,10 m da área sob pastagem. Na comparação entre camadas, no solo sob mata também encontraram adensamento na camada mais profunda 0,20-0,30 m, enquanto no solo sob pastagem a maior compactação ocorreu na camada superficial 0-0,10 m, fato que os autores atribuíram ao pisoteio animal. Guareschi et al. (2014), em área de Cambissolo Háplico no Sul Fluminense, constataram que, comparativamente à pastagem, florestas secundárias apresentaram maior deposição de resíduos vegetais em superfície, e, quando em estágio de regeneração intermediário (25

anos) ou avançado (60 anos), favoreceram a ocorrência de valores menores de densidade e maiores de porosidade total do solo.

Quanto aos macroporos (Tabela 2), seja admitindo-os como de diâmetro  $\geq 50 \mu\text{m}$  (macro1 - escala usual) ou diâmetro  $\geq 100 \mu\text{m}$  (macro2 - escala detalhada), para as quatro coberturas arbóreas estudadas (capoeira, acácia, ingá e sabiá) foram observadas médias maiores na camada superficial 0-0,10 m que na 0,10-0,20 m. Este fato pode também decorrer da presença de serapilheira em superfície, que, como comprovam outros estudos realizados nessa mesma área, leva ao aumento da atividade biológica (Manhães et al., 2009) e do teor de matéria orgânica do solo (Rita et al., 2013), os quais, em conjunto, favorecem a formação de agregados e a ocorrência de poros de maior diâmetro (tanto entre os agregados neoformados quanto bioporos). Para o pasto os valores de macroporos foram maiores na camada 0,10-0,20 m do que na 0-0,10 m, revelando que a já mencionada compactação da camada superficial (pelo pisoteio de animais, impacto da chuva, etc.) se dá pela redução do volume dos poros de maior diâmetro, enquanto em subsuperfície o sistema radicular das gramíneas permite a formação/manutenção dos macroporos no solo. A macroporosidade apresentou correlação altamente negativa com a densidade ( $R = -0,940$  e  $R = -0,898$ , respectivamente para as escalas usual e detalhada) e altamente positiva com a porosidade total ( $R = 0,940$  e  $R = 0,898$ , também respectivamente para as citadas escalas). Diversos estudos trazem resultados similares, mostrando que a macroporosidade do solo é maior em áreas conservadas (sob floresta) que sob pastagem degradada (Melloni et al., 2008; Calgaro et al., 2015) ou sob manejo agrícola intensivo, seja com culturas anuais (Klein e Libardi, 2002; Araujo et al., 2004; Argenton et al., 2005), seja com culturas perenes (Nunes et al., 2010; Guimarães et al., 2014).

Ainda em relação aos macroporos (Tabela 2), na camada superficial houve diferença entre todas as coberturas vegetais, em ambas as escalas admitidas (macro1 e macro2), na seguinte ordem: capoeira > ingá > sabiá > acácia > pasto (a exceção foi, para macro1, a igualdade entre acácia e pasto). Na camada 0,10-0,20 m, também para ambos (macro1 e macro2), a capoeira continuou com maior valor, superior aos demais, mas o pasto passou ao segundo posto, como possível consequência da atuação do sistema radicular das

gramíneas na estruturação do solo. Não houve alteração na ordenação das outras três coberturas estudadas, mas a discriminação entre as coberturas foi menor, com ingá > sabiá = acácia (ainda, para macro1, o ingá não diferiu do pasto). Calgaro et al. (2015) obtiveram resultados similares aos do presente trabalho, com a macroporosidade do solo sob floresta maior na camada 0-0,10 m que na 0,10-0,20 m, enquanto sob pastagem ocorreu o inverso, fato que atribuíram à compactação da camada superficial pelo pisoteio animal.

Para os valores de microporosidade na escala mais usual (micro1) verificou-se, em ambas as camadas estudadas, que houve diferença entre todas as coberturas vegetais (Tabela 2). Na camada 0-0,10 m o pasto apresentou o maior valor e a capoeira o menor, com as demais coberturas em posição intermediária, verificando-se, então, a seguinte ordem decrescente: pasto > sabiá > acácia > ingá > capoeira. Na camada 0,10-0,20 m foram verificados valores de micro1 decrescentes na seguinte ordem: sabiá > ingá > acácia > pasto > capoeira, com o pasto assumindo um posto próximo ao da capoeira, sendo isto uma possível consequência da atuação do sistema radicular das gramíneas na estruturação do solo, tal como aventado quando da discussão da macroporosidade. Comparando-se as camadas, para as coberturas florestais os menores valores de microporosidade foram observados na superfície, enquanto o pasto não apresentou diferença entre as camadas superficial e mais profunda (Tabela 2). Para essa escala mais usual de tamanho de poros, a microporosidade apresentou correlação positiva com a densidade ( $R = 0,634$ ) e negativa com a porosidade total ( $R = -0,634$ ). Como esse comportamento da microporosidade é inverso ao da macroporosidade, acima descrito, a correlação entre as citadas variáveis (macro1 e micro1) foi também negativa ( $R = -0,860$ ). Tal se justifica pelo fato de, nos solos mais adensados e/ou compactados, haver maior proximidade entre as partículas, com porosidade total consequentemente menor. O adensamento e/ou compactação do solo levam à redução do tamanho dos macroporos (principalmente os que se localizam nas superfícies de contato entre agregados, ou superfícies de fraqueza), convertendo-os em poros de menor diâmetro. Nesses processos, em que as partículas tornam-se mais próximas, o volume de poros grandes eliminados é sempre maior que o de poros pequenos criados, de modo que diferenças estatisticamente significativas entre usos e

manejos são facilmente observadas para a macroporosidade, mas não para a microporosidade (Araujo et al., 2004; Melloni et al., 2008; Nunes et al., 2010; Rocha et al., 2014). Diferenças significativas para ambas as classes de tamanho de poros normalmente se restringem a casos em que os manejos adotados sejam bastante divergentes, com impactos mais severos sobre a compactação (Borges et al., 1999; Klein e Libardi, 2002; Argenton et al., 2005; Guimarães et al., 2014).

Especificamente para a escala detalhada de distribuição de poros por tamanho, a comparação entre as camadas revelou que, no pasto, os quantitativos de mesoporos e de criptoporos não diferiram entre 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de profundidade (Tabela 2), mas para os microporos (micro2) foram maiores na camada superficial (mais compactada) que na subsuperficial (menos compactada), repetindo o já descrito para a densidade do solo e para os microporos na escala mais usual (micro1), com as quais a variável micro2 apresentou boa correlação positiva ( $R = 0,667$  e  $R = 0,840$ , respectivamente). Para as quatro coberturas florestais estudadas, os maiores quantitativos de mesoporos, microporos e criptoporos ocorreram na camada mais profunda (0,10-0,20 m), que, à exceção da capoeira, mostrou maior compactação (ou seja, maior densidade e menor porosidade total). Outros autores (Klein e Libardi, 2002; Silva et al., 2005; Lima et al., 2005) encontraram resultados similares, com aumento do quantitativo de poros em classes de menor diâmetro (microporos, criptoporos) nas camadas mais compactadas (geralmente próximas à superfície, mais afetadas pelo manejo) ou mais adensadas (geralmente correspondendo a horizontes pedogenéticos subsuperficiais coesos e/ou de textura mais fina que acumularam argila iluvial durante sua formação).

Também para a escala detalhada de tamanho de poros, os resultados revelam importantes diferenças edáficas entre as coberturas vegetais estudadas, além daquelas já discutidas para a macroporosidade (macro2). Para ambas as camadas estudadas, as menores médias, tanto de microporos quanto de criptoporos, foram verificadas no solo sob capoeira (Tabela 2), coincidindo com as menores densidades e maiores porosidades totais. Para as demais coberturas, em ambas as camadas, os microporos têm as maiores médias associadas às maiores densidades (pasto e acácia), enquanto os criptoporos mostram diferenças significativas, porém de difícil interpretação. Ressalte-se que, para a

escala detalhada, os microporos são os responsáveis pela retenção de água na faixa disponível às plantas, entre as tensões 10 e 1500 kPa, de modo que a baixa ocorrência desses poros no solo sob capoeira poderia, em uma análise mais apressada, indicar limitações hídricas à vegetação. No entanto, com base em uma abordagem mais focada na função do solo no ecossistema (como recomendam Doran e Parkin, 1994), pode-se inferir que tal fato pode até ser favorável a uma maior disponibilidade de água às plantas, pois a maior macroporosidade das primeiras camadas permitiria maior infiltração e, portanto, maior armazenamento de água em horizontes subsuperficiais, mas ainda ao alcance das raízes.

Ainda para a escala detalhada de tamanho de poros, a comparação entre coberturas vegetais revela, para a camada 0-0,10 m, que a proporção de mesoporos no pasto foi superior à das demais coberturas (Tabela 2). Para estas, não houve diferenças entre capoeira e ingá, entre ingá e sabiá, e entre sabiá e acácia, com o valor médio diminuindo na ordem citada, e tendo ocorrido diferenças entre capoeira e sabiá e entre ingá e acácia. Para os dois talhões com os maiores níveis de compactação da camada superficial do solo (isto é, maiores valores de densidade e menores de porosidade total), enquanto na acácia verificou-se a menor ocorrência de mesoporos, no pasto ocorreu o maior quantitativo de poros nessa faixa de diâmetro. Isso revela que, a despeito do processo de compactação, o sistema radicular das gramíneas atuou permitindo a preservação de mesoporos, os quais, segundo Libardi (1995), são os principais responsáveis pela redistribuição da água no perfil do solo. Para a camada 0,10-0,20 m, também na Tabela 2, a capoeira apresentou os maiores valores de mesoporos e a acácia os menores, enquanto ingá, sabiá e pasto apresentaram valores intermediários, sem diferença entre si. Os mesoporos mostram, de modo geral, baixa correlação com os demais atributos físicos constantes na Tabela 2, sendo as mais expressivas com a densidade e porosidade total ( $R = -0,405$  e  $R = 0,405$ , respectivamente) e com macroporosidade ( $R = 0,345$ ). Apesar disso, a partir da ordenação das médias pelas letras do teste de Tukey, verifica-se certa similaridade de comportamento entre os mesoporos e as classes de menor diâmetro (microporos e criptoporos), pois ambos são produzidos a partir de poros maiores (macroporos) durante o processo de compactação do solo.

## 4.2 Qualidade química do solo

No presente tópico são apresentados e discutidos os resultados da análise química do solo, constando na Tabela 3 os atributos que medem as cargas do complexo de troca ( $CTC_{\text{efet}}$  e  $CTC_{\text{pH}=7}$ ) ou lhe são determinantes (pH e teor de C), assim como os que dizem respeito aos nutrientes estudados mais relacionados à matéria orgânica do solo.

Tabela 3: Atributos químicos do solo sob diferentes coberturas vegetais, nas camadas de profundidade 0-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0-0,20 m (média), em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Conceição de Macabu, RJ: pH, C, N, relação C/N, P, capacidade de troca de cátions efetiva ( $CTC_{\text{efet}}$ ) e a pH=7 ( $CTC_{\text{pH}=7}$ )

| <b>Cobertura Vegetal</b>            | <b>pH (em H<sub>2</sub>O)</b> | <b>P</b>     | <b>C</b>               | <b>N</b>    | <b>C/N</b>   | <b>CTC<sub>efet</sub></b> | <b>CTC<sub>pH=7</sub></b>             |
|-------------------------------------|-------------------------------|--------------|------------------------|-------------|--------------|---------------------------|---------------------------------------|
|                                     |                               | -----        | (mg kg <sup>-1</sup> ) | -----       | -            | -----                     | (cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup> ) |
| <b>Camada 0-0,10 m</b>              |                               |              |                        |             |              |                           |                                       |
| Capoeira                            | 4,22                          | 0,12         | 18,8aA                 | 1,56aA      | 12,0         | 1,9                       | 8,6abA                                |
| Acácia                              | 4,48                          | 0,17         | 14,6bA                 | 1,37abA     | 10,7         | 2,5                       | 8,9aA                                 |
| Ingá                                | 4,22                          | 0,15         | 13,9bA                 | 1,07bcA     | 13,7         | 1,9                       | 7,5bcA                                |
| Sabiá                               | 4,26                          | 0,18         | 16,0abA                | 1,36abA     | 11,9         | 2,2                       | 8,8aA                                 |
| Pasto                               | 4,26                          | 0,22         | 13,1bA                 | 0,93cA      | 14,9         | 1,3                       | 6,8cA                                 |
| <b>Média</b>                        | <b>4,29A</b>                  | <b>0,17A</b> | <b>15,3</b>            | <b>1,26</b> | <b>12,6A</b> | <b>2,0A</b>               | <b>8,1</b>                            |
| <b>Camada 0,10-0,20 m</b>           |                               |              |                        |             |              |                           |                                       |
| Capoeira                            | 4,12                          | 0,08         | 12,2aB                 | 1,10aB      | 11,1         | 1,4                       | 7,8aB                                 |
| Acácia                              | 4,34                          | 0,11         | 11,1aB                 | 1,00aB      | 11,3         | 1,7                       | 7,4aB                                 |
| Ingá                                | 4,28                          | 0,08         | 10,8aB                 | 1,01aA      | 11,3         | 1,5                       | 7,0aA                                 |
| Sabiá                               | 4,22                          | 0,10         | 11,9aB                 | 1,00aB      | 12,9         | 1,7                       | 7,1aB                                 |
| Pasto                               | 4,18                          | 0,04         | 11,3aA                 | 0,86aA      | 13,0         | 1,1                       | 7,2aA                                 |
| <b>Média</b>                        | <b>4,22B</b>                  | <b>0,08B</b> | <b>11,4</b>            | <b>0,99</b> | <b>11,9A</b> | <b>1,5B</b>               | <b>7,3</b>                            |
| <b>Média das camadas (0-0,20 m)</b> |                               |              |                        |             |              |                           |                                       |
| Capoeira                            | 4,17b                         | 0,10a        | 15,5                   | 1,33        | 11,5a        | 1,7a                      | 8,2                                   |
| Acácia                              | 4,41a                         | 0,14a        | 12,8                   | 1,18        | 11,0a        | 2,1a                      | 8,2                                   |
| Ingá                                | 4,25ab                        | 0,11a        | 12,4                   | 1,04        | 12,5a        | 1,7a                      | 7,2                                   |
| Sabiá                               | 4,24ab                        | 0,14a        | 14,0                   | 1,18        | 12,4a        | 2,0a                      | 8,0                                   |
| Pasto                               | 4,22ab                        | 0,13a        | 12,2                   | 0,90        | 14,0a        | 1,2b                      | 7,0                                   |
| <b>Média</b>                        | <b>4,26</b>                   | <b>0,12</b>  | <b>13,4</b>            | <b>1,13</b> | <b>12,3</b>  | <b>1,7</b>                | <b>7,7</b>                            |
| <b>CV (%)</b>                       | 4,27                          | 88,25        | 15,21                  | 20,75       | 24,73        | 22,04                     | 10,57                                 |

Obs.: Médias seguidas de mesma letra maiúscula (que comparam as camadas) ou de mesma letra minúscula (que comparam as coberturas) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O teor de carbono (C) no solo variou entre 13,1 e 18,8 g kg<sup>-1</sup>, na camada 0-0,10 m, e entre 10,8 e 12,2 g kg<sup>-1</sup>, na camada 0,10-0,20 m. Enquanto para a camada 0,10-0,20 m os teores de C não diferiram entre as coberturas, para a 0-0,10 m o maior valor ocorreu na capoeira, não diferindo estatisticamente da área sob sabiá, mas sendo superior às áreas sob acácia, ingá e pasto (as quais não diferiram entre si e nem da área sob sabiá). Houve superioridade da camada 0-0,10 m em relação à 0,10-0,20 m para todas as coberturas vegetais, exceto para o pasto. O teor de C no solo é consequência direta da vegetação, sendo que sua acumulação no pasto geralmente decorre da elevada densidade e boa distribuição do sistema radicular fasciculado das gramíneas nas primeiras camadas do solo, conforme salienta Orgill et al. (2015). Esse fato, associado à praticamente ausente deposição de material vegetal na superfície do solo nessa cobertura, justifica a igualdade verificada quanto aos teores de C nas duas camadas estudadas. Para a capoeira e demais coberturas arbóreas, a matéria orgânica do solo advém principalmente da serapilheira depositada na superfície do solo (Mafra et al., 2008), o que leva à diferenciação do teor de C entre as camadas. Conceição et al. (2005), avaliando áreas com sucessão de culturas anuais sob diferentes sistemas de manejo do solo, verificaram que a camada 0-0,05 m foi mais sensível que a 0-0,20 m para identificar incremento no estoque de C, devido à deposição superficial dos resíduos e maior concentração das raízes nessa camada. Para reflorestamento com *Pinus taeda* com a idade de 15 anos, no Paraná, o acúmulo anual de serapilheira variou de 6,8 a 8,5 Mg ha<sup>-1</sup> de massa seca (Wisniewski e Reissmann, 1996). Já em florestas subtropicais com araucária a contribuição variou de 5,9 Mg ha<sup>-1</sup> (Fernandes e Backes, 1998) a 7,7 Mg ha<sup>-1</sup> de matéria seca ao ano (Figueiredo Filho et al., 2003). Na Região Sul do Brasil, o acúmulo de resíduos orgânicos observado na superfície do solo em florestas de pinus é maior em relação às florestas nativas, devido à dificuldade de decomposição da fitomassa (Trevisan et al., 1987).

Araújo et al. (2007), estudando um Latossolo Vermelho-Amarelo sob cinco diferentes usos, verificaram diferenças no teor de matéria orgânica apenas para a camada superficial 0-0,05 m, como o menor valor no cultivo convencional com culturas anuais (31,7 g kg<sup>-1</sup>), o valor intermediário no florestamento de pínus



(38,5 g kg<sup>-1</sup>) e os maiores valores na vegetação de Cerrado, pastagem natural e pastagem cultivada (45,2, 48,8 e 47,3 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente).

Balbinot (2009), estudando o estoque de carbono de um Cambissolo Háplico, até 1 m de profundidade, sob encosta de Mata Atlântica no Litoral do Paraná, em diversos estágios sucessionais (ou cronosequência, sendo: P - pastagem em uso; H - floresta em estágio herbáceo-arbustivo de regeneração; A - floresta em estágio inicial arbóreo de regeneração; M - floresta em estágio médio; e F - floresta em estágio avançado), constatou que sob os estágios H e A ocorreram os maiores estoques (11,85 e 11,37 kg m<sup>-2</sup>, respectivamente), superando o estoque do solo sob pastagem (9,85 kg m<sup>-2</sup>) e também os estoques dos solos sob floresta em estágios sucessionais mais avançados (10,07 kg m<sup>-2</sup>, para o estágio M, e 10,20 kg m<sup>-2</sup>, para o estágio F).

Na mesma área investigada no presente trabalho, os atributos químicos do solo vêm sendo acompanhados por diversos autores. Quanto ao teor de carbono na camada 0-0,10 m, em amostras de solo coletadas cerca de cinco anos após a revegetação, não foram identificadas diferenças entre as áreas preservadas sob capoeira e pasto e as revegetadas sob as leguminosas acácia e sabiá (Zaia et al., 2008; Costa et al., 2014). Em amostras de setembro de 2005 (Ndaw, 2007) e de julho de 2007 (Nunes et al., 2016), os teores de carbono foram superiores na capoeira e equivalentes entre o pasto e as duas leguminosas. Já em amostras coletadas em dezembro de 2010, doze anos após a revegetação, Rita et al. (2013) verificaram teores de carbono orgânico equivalentes entre as leguminosas e a capoeira, e inferiores no pasto. Considerando-se os resultados citados e também os do presente trabalho, pode-se constatar a superioridade da capoeira em relação ao pasto e a presença das leguminosas em uma posição intermediária, com estas (destacadamente a sabiá) progressivamente afastando-se do pasto e aproximando-se da capoeira.

Tal como ocorreu para o C, enquanto na camada 0,10-0,20 m o teor de nitrogênio (N) não diferiu entre as coberturas vegetais estudadas, na camada 0-0,10 m tais diferenças foram verificadas. Nessa camada superficial o maior teor de N ocorreu na capoeira, que não diferiu estatisticamente da acácia e do sabiá, enquanto o menor teor ocorreu no pasto, que não diferiu do ingá (e as três coberturas florestais plantadas não diferiram entre si). Macedo et al. (2008),

avaliando o potencial de leguminosas arbóreas pioneiras fixadoras de nitrogênio (sete espécies em consórcio, implantadas em 1991 com espaçamento entre plantas de 2 m x 2 m) para recuperar 1 ha de uma área severamente degradada no litoral do Sul Fluminense, obtiveram resultados ainda mais expressivos, verificando que, após 13 anos da revegetação, os teores de C (até 0,20 m de profundidade) e N (até 0,30 m de profundidade) foram estatisticamente iguais aos de uma floresta nativa preservada (Mata Atlântica) e superiores aos da área remanescente não recuperada (desde então sob vegetação espontânea de gramínea *Panicum maximum*).

Também de forma semelhante ao C, a comparação das camadas revelou que houve superioridade do teor de N da camada 0-0,10 m em relação à 0,10-0,20 m para a capoeira, a acácia e o sabiá, mas não para o ingá e o pasto. Esta predominância de maiores teores de N na camada superficial está relacionada aos maiores teores de carbono orgânico, decorrentes da deposição da serapilheira na superfície desta camada, podendo-se verificar, para o conjunto de dados das duas camadas (n = 60), boa correlação entre as variáveis C e N (R = 0,741), conforme também observado por Macedo et al. (2008). O teor de N do solo depende, além do teor de matéria orgânica, do tipo (qualidade) de substrato orgânico depositado pela vegetação, destacando-se principalmente o fato dessa realizar ou não a fixação biológica de N. Leguminosas florestais que fixam N, quando plantadas, geralmente aumentam, na fase de estabilização do estande, os teores de material orgânico e de N no solo (Binkley e Giardina, 1997).

As diferenças relatadas quanto aos teores de C e N no solo não levaram à ocorrência de diferenças significativas na relação C/N entre as coberturas e camadas estudadas. Os valores mínimo e máximo (ambos na primeira camada) foram, respectivamente, 10,7, na acácia, a 14,9, no pasto, considerados baixos. Para o pasto de gramínea (planta C4), o baixo valor verificado para essa variável (apenas ligeiramente superior às demais coberturas) possivelmente revela influência de matéria orgânica depositada pela vegetação nativa anteriormente à implantação do pasto, ou mesmo depositada por plantas invasoras da pastagem, que são predominantemente de ciclo C3. Oelbermann et al. (2006), utilizando a técnica da abundância natural de isótopos de C ( $\delta^{13}\text{C} = ^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ), identificaram que a matéria orgânica do solo em área de monocultivo de milho era proveniente de

uma mistura de plantas de ciclo C3 e C4, sendo a das plantas C3 herança da vegetação de floresta que anteriormente ocupava a área.

Tal como ocorreu no presente trabalho, Macedo et al. (2008) não observaram diferenças entre as coberturas quanto à relação C/N. Já Santos (2007), estudando solos de encosta no Litoral do Paraná, até 1 m de profundidade, originalmente sob Mata Atlântica e ora sob diversas tipologias vegetais em cronosequência de regeneração, obteve valores de relação C/N maiores na floresta inicial herbácea-arbustiva (estádio H - 13,15%), intermediários nos demais estágios de floresta avaliados (inicial arbóreo, ou A - 10,90%; médio, ou M - 11,99%; e avançado, ou F - 11,70%) e menores sob pasto (P - 10,46%). Quando se considera que o substrato orgânico proveniente de gramíneas (plantas C4) geralmente apresenta relação C/N maior que o de plantas herbáceas (C3), possivelmente incluindo espécies fixadoras de N atmosférico, o resultado de Santos (2007) é uma aparente contradição, mas deve ser visto com cautela pelo fato dos valores estarem em uma faixa de variação bastante estreita, muito similar à obtida no presente trabalho.

O teor de fósforo (P) não diferiu entre as coberturas vegetais, mas apresentou média maior na camada superficial 0-0,10 m do que na 0,10-0,20 m. O teor de fósforo relaciona-se diretamente ao teor de matéria orgânica, sendo, portanto, maior na superfície. Sarmiento et al. (2008) também verificaram teores de P e de matéria orgânica superiores na camada superficial, comparativamente à camada mais profunda. Embora tenham ocorrido diferenças no teor de matéria orgânica entre as coberturas vegetais, estas não foram suficientes para promover diferenças significativas para a variável fósforo, que, além disso, teve elevado coeficiente de variação (88%). Apesar desses resultados, estudos realizados por Zaia et al. (2008) e por Rita et al. (2013) na mesma área desse estudo mostram diferenças importantes quanto à natureza e disponibilidade das formas de P presentes. Em relação ao P orgânico (Po), em ambos os trabalhos os autores verificaram que a proporção das formas lábeis em relação ao Po total foi maior no solo da capoeira (16,9% e 8,1%, respectivamente para os citados trabalhos) e menor no solo da acácia (8,4% e 2,1%, também respectivamente para os citados trabalhos). Enquanto Zaia et al. (2008) apontam como possibilidade uma maior recalcitrância dos compostos presentes no substrato da

acácia, Rita et al. (2013) cogitam, além disso, que diferenças na distribuição de agregados por tamanho entre as coberturas vegetais podem levar à maior proteção física dos compostos, quando estes passam a estar oclusos em agregados de menor tamanho.

Para o pH, a média observada para a camada 0-0,10 m foi superior à da 0,10-0,20 m. Quanto às coberturas, o menor valor médio para as duas camadas foi observado na capoeira e o maior na acácia, que diferiram entre si. As coberturas ingá, sabiá e pasto foram iguais entre si e também não diferiram nem da capoeira e nem da acácia. Apesar das diferenças mencionadas, a variação do pH foi pequena e os valores muito baixos (4,2 a 4,5), permitindo classificar o solo sob todas as coberturas como de reação extremamente ácida (Meurer, 2007). Analisando o conjunto de trabalhos desenvolvidos na presente área de estudo, fica evidenciada, tanto para o pasto quanto para as áreas revegetadas em 1998 com leguminosas arbóreas, uma redução progressiva no valor do pH do solo, que nos primeiros anos oscilava em torno de 5,0 (Gama-Rodrigues et al., 2008; Zaia et al., 2008), passando mais adiante à faixa de 4,5-5,0 (Rita et al., 2013; Nunes et al., 2016) e agora aproximando-se do valor observado para a capoeira, que desde o início, para todos os trabalhos citados, mostrou-se sempre inferior a 4,5.

Para a  $CTC_{\text{efet}}$  ocorreram diferenças tanto entre as camadas estudadas, sendo a média na 0-0,10 m maior que na 0,10-0,20 m, quanto entre as coberturas vegetais, sendo que o pasto se diferenciou das demais, apresentando a menor média. No geral os valores de  $CTC_{\text{efet}}$  foram muito baixos, com médias variando entre 1,1 e 2,5  $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ , o que se justifica, em um primeiro momento, pelo fato da fração argila desses solos tropicais ter mineralogia caulínica, usualmente presença de sesquióxidos de Fe e Al, ambos tipicamente de baixa densidade de cargas negativas na superfície do complexo de troca (Raij, 1969). Um segundo aspecto a considerar é que, diante da baixa disponibilidade de cargas provenientes da fração mineral, a matéria orgânica assume papel preponderante para o total de cargas do solo (Vezzani et al., 2008), mas, no presente caso, sua presença não é tão expressiva, estando os teores de C entre 10 e 20  $\text{g kg}^{-1}$ . Finalmente, como mais relevante justificativa para os baixos valores de  $CTC_{\text{efet}}$  encontrados, está o fato de que a ionização das cargas negativas advindas das argilas e principalmente da matéria orgânica é altamente dependente da elevação

do pH (Rodella, 1996; Helling et al., 1964), que, no presente caso, é muito baixo (inferior a 4,5), já se aproximando do chamado ponto de carga zero (ou PCZ).

Diante do mencionado no parágrafo anterior, seria esperado que a  $CTC_{\text{efet}}$  apresentasse grande dependência em relação às variações de carbono e principalmente de pH do solo, mas os coeficientes de correlação obtidos foram apenas regular com o C ( $R = 0,616$ ) e fraco com o pH ( $R = 0,301$ ). Tal fato deve-se às estreitas faixas de variação verificadas para ambas as variáveis, em especial para o pH. Apesar disso, a partir de uma análise de regressão linear múltipla, foi possível obter um modelo que relaciona a  $CTC_{\text{efet}}$  aos valores de pH e teor de C ( $CTC_{\text{efet}} = -4,4 + 1,084 \text{ pH} + 0,113 \text{ C}$ ), em que os coeficientes de ajuste, o teste F ( $F = 27,8$ ) e o coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,494$ ) foram altamente significativos ( $p < 0,01$ ), sendo este modelo, evidentemente, válido apenas para o local e condições para as quais foi obtido. Nascimento et al. (2014), trabalhando com lodo de esgoto, constataram que a adição de  $50 \text{ t ha}^{-1}$  de lodo calcado em um Cambissolo Háplico aumentou a  $CTC_{\text{efet}}$ , e relacionaram esse resultado principalmente ao aumento do pH.

Para a  $CTC_{\text{pH}=7}$ , diferentemente da  $CTC_{\text{efet}}$ , houve interação entre os fatores cobertura vegetal e profundidade do solo. Enquanto para a camada 0,10-0,20 m não houve diferença entre as coberturas, para a camada 0-0,10 m os maiores valores de  $CTC_{\text{pH}=7}$  foram na acácia, sabiá e capoeira, nesta ordem, e o menor no pasto (no ingá o valor foi intermediário, não diferindo estatisticamente nem do pasto, nem da capoeira). Em relação às camadas, para as coberturas acácia, sabiá e capoeira houve superioridade dos valores de  $CTC_{\text{pH}=7}$  da 0-0,10 m em relação aos da 0,10-0,20 m. Para as coberturas ingá e pasto as camadas não diferiram entre si, tendo ambas também apresentado os menores teores de C. As diferenças de  $CTC_{\text{pH}=7}$  citadas (ou sua ausência) associam-se às variações no teor de C no solo, uma vez que a matéria orgânica não só promove o aumento da  $CTC_{\text{pH}=7}$  (Bayer e Mielniczuk, 2008), mas é responsável pela maior parte das cargas negativas geradas em solos tropicais (Raij, 1969; Vezzani et al., 2008). Assim, no presente caso, foi possível obter um bom coeficiente de correlação entre as referidas variáveis ( $R = 0,703$ ), o qual poderia ter sido melhor se a faixa de variação de teor de C fosse mais ampla. Araújo et al. (2007), no mesmo estudo citado anteriormente, verificaram que o comportamento da  $CTC_{\text{pH}=7}$  foi similar ao

da matéria orgânica, com valores na camada superficial (0-0,05 m) do solo sob vegetação de Cerrado equivalentes ao solo sob pastagem natural e superiores ao solo sob pastagem cultivada, florestamento de pinus e cultivo convencional.

Adicionalmente aos resultados de análise química que constam na Tabela 3, anteriormente discutidos, na Tabela 4 são apresentados os atributos químicos do solo relacionados à ocupação do complexo de troca pelos principais cátions trocáveis, tanto “básicos” (Ca, Mg, K e Na) como fonte da acidez (Al), em termos absolutos (quantidade) e proporcionais (valor V e valor m), a partir dos quais se estima a  $CTC_{\text{efet}}$ , e também o teor de H + Al, chamado de acidez potencial e cuja somatória com os cátions básicos fornece uma estimativa da  $CTC_{\text{pH}=7}$ .

Tabela 4: Atributos químicos do solo sob diferentes coberturas vegetais, nas camadas de profundidade 0-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0-0,20 m (média), em um Argissolo Vermelho-Amarelo, em Conceição de Macabu, RJ: Al, H + Al, Ca, Mg, K, Na, soma de bases (SB), saturação por bases (valor V) e saturação por Al (valor m)

| Cobertura Vegetal                   | Al                                            | H + Al      | Ca          | Mg          | K             | Na            | SB             | V           | m           |
|-------------------------------------|-----------------------------------------------|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|----------------|-------------|-------------|
|                                     | -----( $\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$ )----- |             |             |             |               |               | -----(% )----- |             |             |
| <b>Camada 0-0,10 m</b>              |                                               |             |             |             |               |               |                |             |             |
| Capoeira                            | 1,13aA                                        | 7,82aA      | 0,39bcA     | 0,38abA     | 0,010         | 0,007         | 0,79bcA        | 9,0bcA      | 58,8abB     |
| Acácia                              | 0,37bA                                        | 6,77bA      | 1,60aA      | 0,52aA      | 0,017         | 0,007         | 2,14aA         | 23,5aA      | 17,1cB      |
| Ingá                                | 0,98aA                                        | 6,55bA      | 0,49bcA     | 0,40abA     | 0,009         | 0,006         | 0,90bcA        | 12,2bA      | 52,2bB      |
| Sabiá                               | 1,17aA                                        | 7,77aA      | 0,67bA      | 0,36bA      | 0,015         | 0,004         | 1,05bA         | 11,9bA      | 52,2bB      |
| Pasto                               | 0,85aA                                        | 6,40bA      | 0,24cA      | 0,15cA      | 0,008         | 0,006         | 0,41cA         | 5,9cA       | 68,0aB      |
| <b>Média</b>                        | <b>0,90</b>                                   | <b>7,06</b> | <b>0,68</b> | <b>0,36</b> | <b>0,012A</b> | <b>0,006B</b> | <b>1,06</b>    | <b>12,5</b> | <b>49,6</b> |
| <b>Camada 0,10-0,20 m</b>           |                                               |             |             |             |               |               |                |             |             |
| Capoeira                            | 1,12aA                                        | 7,48aA      | 0,12bB      | 0,16abB     | 0,007         | 0,006         | 0,30abB        | 3,8bB       | 78,9aA      |
| Acácia                              | 0,88aA                                        | 6,62aA      | 0,53aB      | 0,25aB      | 0,012         | 0,006         | 0,79aB         | 10,5aB      | 52,5bA      |
| Ingá                                | 1,08aA                                        | 6,57aA      | 0,14abB     | 0,25aB      | 0,007         | 0,006         | 0,40abB        | 5,8abB      | 73,0aA      |
| Sabiá                               | 1,23aA                                        | 6,65aB      | 0,25abB     | 0,19abB     | 0,011         | 0,004         | 0,46abB        | 6,4abB      | 73,1aA      |
| Pasto                               | 0,92aA                                        | 7,07aA      | 0,11bA      | 0,04bB      | 0,004         | 0,005         | 0,16bA         | 2,2bB       | 85,5aA      |
| <b>Média</b>                        | <b>1,05</b>                                   | <b>6,88</b> | <b>0,23</b> | <b>0,18</b> | <b>0,008B</b> | <b>0,005B</b> | <b>0,42</b>    | <b>5,8</b>  | <b>72,6</b> |
| <b>Média das camadas (0-0,20 m)</b> |                                               |             |             |             |               |               |                |             |             |
| Capoeira                            | 1,13                                          | 7,65        | 0,26        | 0,27        | 0,008bc       | 0,006a        | 0,54           | 6,4         | 68,9        |
| Acácia                              | 0,63                                          | 6,69        | 1,06        | 0,38        | 0,015a        | 0,006a        | 1,47           | 17,0        | 34,8        |
| Ingá                                | 1,03                                          | 6,56        | 0,32        | 0,32        | 0,008bc       | 0,006a        | 0,65           | 9,0         | 62,6        |
| Sabiá                               | 1,20                                          | 7,21        | 0,46        | 0,27        | 0,013ab       | 0,004b        | 0,75           | 9,2         | 62,7        |
| Pasto                               | 0,88                                          | 6,73        | 0,17        | 0,10        | 0,006c        | 0,006ab       | 0,28           | 4,1         | 76,7        |
| <b>Média</b>                        | <b>0,97</b>                                   | <b>6,97</b> | <b>0,45</b> | <b>0,27</b> | <b>0,010</b>  | <b>0,006</b>  | <b>0,74</b>    | <b>9,1</b>  | <b>61,1</b> |
| <b>CV (%)</b>                       | 29,34                                         | 9,05        | 63,99       | 43,14       | 44,33         | 25,93         | 51,42          | 40,70       | 19,57       |

Obs.: Médias seguidas de mesma letra maiúscula (que comparam as camadas) ou de mesma letra minúscula (que comparam as coberturas) não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Quanto aos teores de Al (Tabela 4), não houve diferença estatística entre as camadas para nenhuma das coberturas vegetais estudadas. Na camada 0,10-0,20 m não houve diferença estatística entre as coberturas vegetais, mas na camada mais superficial (0-0,10 m) a acácia se diferenciou de todas as demais coberturas, com o menor valor, inferioridade esta registrada por diversos autores que desenvolveram trabalhos nesta mesma área de estudo (Gama-Rodrigues et al., 2008; Zaia et al., 2008; Rita et al., 2013; Nunes et al., 2016). Tal fato se justifica pelo maior valor de pH encontrado nesta área, o que leva a uma menor solubilidade dos compostos de Al e, portanto, à sua menor presença na solução do solo e no complexo de troca. Vezzani et al. (2001), avaliando um Argissolo Vermelho-Amarelo sob plantios puros e consorciado de *Eucalyptus saligna* e *Acacia mearnsii*, com 45 meses de idade, no Estado do Rio Grande do Sul, também verificaram que a *A. mearnsii* apresentou valor de Al trocável menor e de pH maior que as outras duas coberturas. Enquanto naquele caso os autores encontraram subsídios para considerar que o efeito complexante da matéria orgânica com o alumínio teria sido mais preponderante para o resultado do que o maior pH do solo sob acácia, no presente caso tal consideração não se sustenta, pois o teor de Al não se correlacionou significativamente com o teor de C ( $R = 0,140$ ; não significativo), mas mostrou correlação negativa moderada com o pH ( $R = -0,620$ ;  $p < 0,05\%$ ), mesmo o pH tendo uma estreita faixa de variação.

Quando o Al trocável foi avaliado em termos relativos, verificou-se que, nas duas camadas estudadas, inclusive na 0,10-0,20 m, a área da acácia diferiu das demais coberturas vegetais, apresentando a menor média de saturação por Al, ou valor m (Tabela 4). Comparando-se as camadas, para todas as coberturas vegetais estudadas o valor m foi maior na 0,10-0,20 m que na 0-0,10 m, o que ocorreu a despeito dos teores de Al não diferirem entre as camadas. Enquanto o teor diz respeito à “quantidade” de Al, o valor m expressa “intensidade” (Meurer, 2007), uma vez que m representa a proporção da  $CTC_{\text{efet}}$  ocupada pelo ion Al. Essa relação matematicamente inversa entre m e  $CTC_{\text{efet}}$  faz com que os valores de saturação por alumínio correlacionem-se negativamente com os valores de  $CTC_{\text{efet}}$ , no presente caso com  $R = 0,699$  ( $p < 0,05\%$ ).

Quanto ao  $H + Al$ , similarmente ao Al, não houve diferença entre as coberturas para a camada 0,10-0,20 m. Para a camada 0-0,10 m os maiores

valores foram encontrados na capoeira e no sabiá e os menores no pasto, no ingá e na acácia (Tabela 4). Na comparação entre as camadas houve diferença significativa apenas para a cobertura sabiá, com maior valor na 0-0,10 m, enquanto houve igualdade entre as camadas para as demais coberturas. Para um dado solo, sendo a ionização das cargas negativas na superfície dos coloides altamente dependente do pH (Rodella, 1996; Helling et al., 1964), o quantitativo de cargas do complexo de troca ocupadas por H + Al e que pode ser liberado com a elevação do pH a 7,0 é maior quanto menor o pH original, o qual, no presente caso, é muito baixo (inferior a 4,5) e pouco variável entre as coberturas vegetais. Assim, quanto à ionização de cargas negativas, o principal fator de diferenciação entre as coberturas vegetais não o pH original do solo, mas são as variações do teor de carbono orgânico, conforme evidenciado quando discutido a  $CTC_{pH=7,0}$ .

Em relação aos cátions básicos do complexo de troca (Ca, Mg, K e Na), verifica-se baixos teores para todos eles e ainda para a soma de bases, ou SB (Tabela 4). Comparando-se as camadas, os teores de Mg, K e Na foram sempre maiores na 0-0,10 m que na 0,10-0,20 m, seja quando avaliou-se cada cobertura individualmente (caso do Mg), seja quando comparou-se na média de todas as coberturas (caso do K e Na). Para o Ca, os valores foram maiores na camada 0-0,10 m que na 0,10-0,20 m para todas as coberturas vegetais, exceto para o pasto, o que também ocorreu para a soma de bases, da qual o Ca é o principal componente, respondendo por cerca de 60% do total. Este comportamento dos teores de cátions trocáveis e da soma de bases está intimamente associado à matéria orgânica do solo, o que fica evidenciado pelo fato de que para os teores de C também houve superioridade da camada 0-0,10 m em relação à 0,10-0,20 m para todas as coberturas vegetais, exceto para o pasto. Em solos tropicais, a matéria orgânica, sendo a principal fonte das cargas negativas do solo (Raij, 1969; Vezzani et al., 2008), passa ser também importante reservatório desses nutrientes retidos no complexo de troca. Assim, enquanto no solo sob coberturas arbóreas a superioridade da camada 0-0,10 m sobre a 0,10-0,20 m decorre da deposição de serapilheira em superfície, sob pasto a distribuição do sistema radicular fasciculado das gramíneas de forma homogênea até certa profundidade (Orgill et al., 2015) leva à equivalência entre as camadas do solo estudadas não só para SB, mas também para outros atributos químicos (C, N,  $CTC_{pH=7,0}$ ).



Ainda quanto à ocupação do complexo de troca do solo, comparando-se as coberturas vegetais, a acácia apresentou os maiores valores para a soma de bases e para todos os cátions avaliados, enquanto os menores valores ocorreram no pasto (exceto para o Na, cujo menor valor ocorreu no sabiá). Na camada 0-0,10 m, para o Ca e a SB a superioridade da acácia ocorreu de forma exclusiva e para o Mg de forma compartilhada (pois não diferiu da capoeira e do ingá). Na camada 0,10-0,20 m a superioridade da acácia sempre foi compartilhada com outras coberturas, não diferindo do ingá e sabiá quanto ao Ca e do ingá, sabiá e capoeira quanto ao Mg e a SB. Em outros trabalhos desenvolvidos na presente área foi registrada a superioridade das leguminosas (acácia e/ou sabiá) em relação à pastagem e/ou à capoeira (Gama-Rodrigues et al., 2008; Zaia et al., 2008; Rita et al., 2013; Nunes et al., 2016). O maior valor de soma de bases encontrado na acácia está relacionado ao maior valor de pH em ambas as camadas do solo, o qual é determinante para que apresente maior quantidade de cargas negativas em que são retidas as bases trocáveis (fato evidenciado quando discutida a  $CTC_{\text{efet}}$ ). Vezzani et al. (2001), em um Argissolo Vermelho-Amarelo do Rio Grande do Sul, avaliando revegetação com acácia (*Acacia mearnsii*), também verificaram sua superioridade em relação às áreas sob plantio puro de *Eucalyptus saligna* e sob consórcio eucalipto + acácia, não só quanto aos teores de cátions trocáveis mas também quanto a diversos outros atributos químicos do solo.

Verifica-se, em todos os talhões estudados, baixíssimos valores de saturação por bases (valor V) do solo (Tabela 4), resultado dos também baixos valores de pH, cuja consequência é que as cargas que compõem a  $CTC_{\text{pH}=7,0}$  são pouco ocupadas por cátions básicos e predominantemente neutralizadas por H + Al. A saturação por bases foi maior na camada superficial 0-0,10 m que na mais profunda 0,10-0,20 m para todas as coberturas vegetais estudadas. Em ambas as camadas o valor V foi maior na cobertura da acácia, de forma isolada na 0-0,10 m e de forma compartilhada na 0,10-0,20 m (não diferiu do ingá e do sabiá). A superioridade tanto da camada superficial sobre a subsuperficial quanto da acácia sobre as demais coberturas relaciona-se aos maiores valores de pH que nelas ocorrem, fato registrado também em outros trabalhos desenvolvidos na presente área de estudo (Gama-Rodrigues et al., 2008; Zaia et al., 2008; Rita et al., 2013; Nunes et al., 2016).

Em relação aos atributos químicos do solo, o presente trabalho permitiu confirmar as tendências indicadas em estudos anteriores realizados na mesma área (Gama-Rodrigues et al., 2008; Zaia et al., 2008; Rita et al., 2013, Manhães et al., 2013; Costa et al., 2014; Nunes et al., 2016). Tais alterações ocorreram no sentido de levar o solo das áreas revegetadas a uma maior aproximação do solo sob capoeira e maior afastamento do solo sob pastagem, tanto em aspectos tidos como negativos, como a diminuição do pH do solo, quanto reconhecidamente positivos, como a elevação dos teores de C e N e da  $CTC_{pH=7,0}$ . Outra relevante modificação, cuja face negativa ou positiva é certamente circunstancial, diz respeito à maior estratificação entre as camadas superficial e subsuperficial para diversos atributos químicos avaliados, como o teor de C, o quantitativo de cargas no complexo de troca ao pH natural ( $CTC_{efet}$ ) ou tamponado ( $CTC_{pH=7,0}$ ), os teores dos macronutrientes estudados (N, P, Ca, Mg e K), e o valor da soma de bases. Cabe ainda ressaltar que é possível (e talvez provável) que tais modificações estejam ainda em curso, podendo-se, em eventuais avaliações posteriores, ser confirmada de forma mais consistente. Em áreas moderadamente degradadas, benefícios edáficos da revegetação podem não aparecer em curto prazo (poucos anos), como observado por Oliveira et al. (2008), mas costumam ser observados em médio e longo prazos (poucas ou algumas décadas), conforme verificaram Santos (2007) e Balbinot (2009).

## 5. RESUMO E CONCLUSÕES

A qualidade do solo está diretamente relacionada com sua funcionalidade dentro dos ecossistemas manejados ou naturais, com a capacidade em sustentar a atividade biológica, manter a qualidade ambiental e proporcionar o crescimento e a saúde de plantas e animais. Os dois principais mecanismos que desencadeiam a degradação do solo são a compactação e a degradação da matéria orgânica. A implantação de sistemas florestais com leguminosas é uma das estratégias para a recuperação de áreas degradadas, pois essas plantas melhoram a fertilidade do solo (fixação biológica do N atmosférico e reciclagem de nutrientes), aumentam o teor de matéria orgânica, otimizam a atividade biológica, aumentam o estoque de carbono no solo e melhoram as propriedades físicas. O objetivo do trabalho foi avaliar a qualidade química e física do solo sob capoeira, leguminosas arbóreas e pastagem. O trabalho foi conduzido na Fazenda Carrapeta, no Município de Conceição de Macabú - RJ. A área experimental constitui-se de cinco coberturas vegetais lateralmente adjacentes na mesma encosta: *Acacia auriculiformis* (acácia); *Mimosa caesalpinifolia* (sabiá); Ingá spp (ingá); pastagem degradada (pasto); e mata secundária (capoeira). Enquanto a capoeira não sofre manejo há mais de 50 anos e a implantação (ou surgimento) da pastagem remonta a década de 1930, as três primeiras (leguminosas arbóreas) foram implantadas em 1998, em talhões de 1500 m<sup>2</sup> (75 m x 20 m). Em julho de 2015 foram coletadas amostras nas camadas 0-0,10 m e 0,10-0,20 m de

profundidade, com estrutura deformada e indeformada, em seis pontos em cada área, determinados os atributos químicos (pH, CTC efetiva, CTC a pH = 7,0, teor de nutrientes, entre outros) e físicos do solo (granulometria, densidade, porosidade total, distribuição de poros por tamanho, entre outros). Com base na interpretação desses resultados pode-se concluir que:

- O solo da área de estudo, sob as cinco coberturas vegetais e nas duas camadas avaliadas, apresentou baixa qualidade química do ponto de vista agrônomo, com baixos valores de pH, CTC efetiva, teor de nutrientes e saturação por bases;
- No solo sob capoeira, a qualidade química da camada 0-0,10 m foi superior à da 0,10-0,20 m, sendo o maior teor de C, maior quantidade de cargas no complexo de troca, maior teor de nutrientes e maior soma de bases na camada superficial consequência da deposição de serapilheira sobre o solo;
- No solo sob pasto, a qualidade química da camada 0-0,10 m foi equivalente à da 0,10-0,20 m, com os valores dos atributos estudados iguais entre as camadas, consequência da deposição desprezível de material orgânico em superfície e da uniformidade de distribuição do sistema radicular fasciculado das gramíneas nessas camadas;
- O solo sob capoeira pode ser considerado de boa qualidade física, pois apresentou, em ambas as camadas, baixa densidade e elevada porosidade total;
- O solo sob capoeira apresentou, em ambas as camadas, pequena proporção de poros que retêm água na faixa disponível às plantas (microporos), o que seria, *a priori*, indicativo de baixa qualidade física, mas que pode ser favorável do ponto de vista ambiental para ecossistemas arbóreos, pois a grande presença de poros maiores nessas camadas superficiais permite maior infiltração e, portanto, maior armazenamento de água em horizontes subsuperficiais ao alcance das raízes;
- O solo sob pasto pode ser considerado de baixa qualidade física nas duas camadas estudadas, mas principalmente na superficial, pois apesar da distribuição de poros por tamanho ser tida como adequada, apresenta elevada densidade e baixa porosidade total;

- O solo sob pasto apresentou maior proporção de mesoporos, nas duas camadas estudadas, possivelmente em decorrência do sistema radicular fasciculado das gramíneas ter atuado na preservação e/ou reconstrução de tais poros, mesmo frente ao processo de compactação;
- Nos talhões revegetados, os solos tiveram seus atributos químicos da camada superficial modificados pela atuação das leguminosas arbóreas, tornando-se mais assemelhados ao da capoeira e mais diferenciados do da pastagem, principalmente quanto ao teor de carbono;
- O solo das áreas revegetadas com ingá e sabiá, anteriormente sob pastagem, apresentou recuperação da qualidade física de sua camada superficial, de 0-0,10 m, com densidade e porosidade total com valores intermediários entre os da capoeira e os do pasto;
- No talhão revegetado com acácia, o solo apresentou qualidade física inferior e qualidade química ligeiramente superior ao das demais coberturas, podendo tal fato ser parcialmente de origem pedogenética.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, M.I. (2008) Qualidade física do solo em sistemas agroflorestais. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Viçosa - MG, Universidade Federal de Viçosa - UFV, 89p.
- Albuquerque, J.A.; Sangoi, L.; Ender, M. (2001). Efeitos da integração lavoura-pecuária nas propriedades físicas do solo e características da cultura do milho. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.25, p.717-723.
- Alleoni, L.R.F.; Camargo, O.A. (1994) Atributos físicos de Latossolos Ácricos do Norte Paulista. *Scientia Agrícola*, v.51, p.321-326.
- Anderson, J.D.; Ingram, J.S.I (1993) *Tropical soil biology and fertility: A handbook of methods*. 2.ed. Wallingford, CAB International,. 221p.
- Andreola, F.; Costa, L.M.; Olszewski, N. (2000) Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma terra roxa estruturada. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.24, p.857-865.
- Araujo, M.A.; Tormena, C.A.; Silva, A.P. (2004) Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho Distrófico cultivado e sob mata nativa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.28, p.337-345.

- Araújo, R.; Goedert, W.J.; Lacerda M.P.C. (2007) Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.1099-1108.
- Argenton, J.; Albuquerque, J.A.; Bayer, C.; Wildner, L.P. (2005) Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p. 425-435.
- Balbinot, R. (2009). Carbono, nitrogênio e razões isotópicas  $\delta^{13}\text{C}$  E  $\delta^{15}\text{N}$  no solo e vegetação de estágios sucessionais de floresta ombrófila densa submontana. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Curitiba - PR, Universidade Federal do Paraná - UFPR, 103p.
- Barbosa, T.R.L. (2012) Atributos físicos do solo sob espécies florestais da Mata Atlântica na Região Serrana Fluminense. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 81p.
- Barros, N.F.; Comerford, N.B. (2002) Sustentabilidade da produção de florestas plantadas na região tropical. In: Alvarez, V.H.; Schaefer, C.E.G.R.; Barros, N.F.; Mello, J.W.V.; Costa, L.M. (eds.) *Tópicos em Ciência do Solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.2. p.487-592.
- Bayer, C.; Mielniczuk, J. (2008) Dinâmica e função da matéria orgânica. In: Santos, G.A.; Silva, L.S; Canellas, L.P.; Camargo, F.A.O. (eds.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Metrópole, p. 7-18.
- Bell, C.L. (1998) Management of soils and overburden for plant growth medium reconstruction after mining. (Ed.) *Recuperação de Áreas Degradadas*. Viçosa UFV/Depto. de Solos, Sociedade Brasileira de Recuperação de Áreas Degradadas. p. 117-129.

- Beutler, A.N.; Centurion, J.F. (2003) Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.38, p.849-856.
- Binkley, D.; Giardina, C. (1997) Nitrogen fixation in tropical forest plantations. In: Nambiar, E.K.S.; Brown, A.G. (eds.) *Management of soil, nutrients and water in tropical plantation forests*. Canberra, ACIAR. p.297- 337.
- Bonini, C.S.B.; Alves, M.C.; Montanari, R. (2015) Lodo de esgoto e adubação mineral na recuperação de atributos químicos de solo degradado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.19, p.388-393.
- Borges, A.L.; Kiehl, J.C.; Souza, L.S. (1999) Alteração de propriedades físicas e atividade microbiana de um Latossolo Amarelo Álico após o cultivo com fruteiras perenes e mandioca. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, p.1019-1025.
- Brady, N.C., WEIL, R.R. (2013) *Elementos da natureza e propriedades dos solos*. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 704p.
- Braida, J.A.; Bayer, C.; Albuquerque, J.A.; Reichert, J.M. (2011) Matéria orgânica e seu efeito na física do solo. In: Klauberg Filho, O.; Mafra, A.L.; Gatiboni, L.C. (eds.) *Tópicos em ciência do solo*. v.7. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.222-227.
- Calgaro, H.F.; Cambuim, J.; Silva, A.M.; Alves, M.C.; Buzetti, S.; Moraes, M.A.; Carvalho, S.L.; Miranda, L.P.M.; Moraes, M.L.T. (2015) Distribuição natural de espécies arbóreas em áreas com diferentes níveis de antropização: atributos físicos do solo. *Cultura Agronômica*, v.24, p.327-344.
- Campos, B.C.; Reinert, D.J.; Nicolodi, R.; Ruedell, J.; Petreire, C. (1995) Estabilidade estrutural de um Latossolo Vermelho-Escuro distrófico após sete anos de rotação de culturas e sistemas de manejo de solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.19, p.121-126,



- Campos, F.S.; Alves, M.C.; Souza, Z.M.; Pereira, G.T. (2011) Atributos físico-hídricos de um Latossolo após a aplicação de lodo de esgoto em área degradada do Cerrado. *Ciência Rural*, v.41, p.796-803.
- Canellas, L.P., Teixeira Júnior, L.R.L., Dobbss, L.B., Silva, C.A., Medici, L.O., Zandonadi, D.B., Façanha, A.R. (2008) Humic acids crossinteractions with root and organic acids. *Annals of Applied Biology*, v.153, p.157-166.
- Carvalho, E.J.M.; Figueiredo, M.S.; Costa, L.M. (1999) Comportamento físico hídrico de um Podzólico Vermelho-Amarelo Câmbico fase terraço sob diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.34, p.257-265.
- Carvalho, M.M.; Xavier, D.F.; Alvim, M.J. (2000) Uso de leguminosas arbóreas na recuperação e sustentabilidade de pastagens cultivadas. In: *Simpósio Internacional sobre Sistemas Agroflorestais Pecuários na América do Sul*. 18-20 de setembro de 2000.
- Castro Filho, C.; Muzilli, O.; Podanoschi, A.L. (1998) 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*, v.22, p.527-538.
- Centurion, J.F.; Cardoso J.P.; Natale, W. (2000) Efeito de formas de manejo em algumas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho em diferentes agroecossistemas. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.2, p.254-258.
- Conceição, P.C.; Amado, T.J.C.; Mielniczuk, J.; Spagnollo, E. (2005) Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.29, p.777-788.
- Corrêa, M.M.; Ker, J.C.; Mendonça, E.S.; Ruiz, H.A.; Bastos, R.S. (2003) Atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos da região das Várzeas de Sousa (PB). *Revista Brasileira de Ciência do Solo*. v.27, p.311-324.

- Costa, M.G.; Gama-Rodrigues, A.C.; Zaia, F.C.; Gama-Rodrigues, E.F. (2014) Leguminosas arbóreas para recuperação de áreas degradadas com pastagem em Conceição de Macabu, Rio de Janeiro, Brasil. *Scientia Forestalis*, v.42, p.101-112.
- Cunha, A.M.; Lani, J.L.; Costa, L.M.; Fernandes Filho, E.I.; Amaral, E.F. (2011) Morphological, physical and pedogenetic attributes related to water yield in small watersheds in Guarapari/ES, Brazil. *Revista Ceres*, v.58, p.493-503.
- Dias, L.E. (1998) Caracterização de substratos para fins de recuperação de áreas degradadas. In: Dias, L.E., Mello, J.W.V. *Recuperação de Áreas Degradadas*. Viçosa, UFV/Depto de Solos; Simpósio Brasileiro de Recuperação de Áreas Degradadas.
- Doran, J.W.; Parkin, T.B. (1994) 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, p.3-21. (Special Publication).
- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (1997) - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual e Métodos de análise de solos*. 2.ed. Rio de Janeiro, Embrapa Solos, 212p.
- Embrapa - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2013) - Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 3.ed. Brasília, Embrapa, 353p.
- Fernandes, A.V.; Backes, A. (1998). Produtividade primária em floresta com *Araucaria angustifolia* no Rio Grande do Sul. *Iheringia, Série Botânica*, v.51, p.63-78.
- Ferreira, M.M. (2010) Caracterização física do solo. In: Jong van Lier, Q. (ed.) *Física do solo*. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.1-27.

- Ferreira, R.L.C.; Lira Junior, M.A.; Rocha, M.S.; Santos, M.V.F.; Lira, M.A.; Barreto, L.P. (2007) Deposição e acúmulo de matéria seca e nutrientes em serapilheira em um bosque de sabiá (*Mimosa caesalpinifolia* Benth.). *Revista Árvore*, v.31, p.7-21.
- Figueiredo Filho, A.; Moraes, G.F.; Schaaf, L.B.; Figueiredo, D.J. (2003) Avaliação estacional da deposição de serapilheira em uma floresta ombrófila mista localizada no sul do Estado do Paraná. *Ciência Florestal*, v.13, p.11-18.
- Franco, A.A.; Faria, S.M. (1997) The contribution of N<sub>2</sub>-fixing tree legumes to land reclamation and sustainability in the tropics. *Soil Biology and Biochemistry.*, v.29, p.897-903.
- Franco, A.A.; Resende, A.S.; Campello, E.F.C. (2003) Importância das leguminosas arbóreas na recuperação de áreas degradadas e na sustentabilidade de sistemas agroflorestais. In: *Sistemas Agroflorestais e Desenvolvimento Sustentável*, Mato Grosso do Sul, 24p. (Disponível em: <http://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/896514>. Acesso: fev/2016).
- Gama-Rodrigues, A.C.; Barros, N.F.; Mendonça, E.S. (1999) Alterações edáficas sob plantios puros e misto de espécies florestais nativas do Sudeste da Bahia, Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, p.581-592.
- Gama-Rodrigues, E.F.; Gama-Rodrigues, A.C.; Paulino, G.M.; Franco, A.A. (2008) Atributos Químicos e Microbiológicos de Solos sob Diferentes Coberturas Vegetais no Norte do Estado do Rio de Janeiro. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.1521-1530.
- Gang, L.U.; Sakagami, K.; Tanaka, H.; Hamada, R. (1998) Role of soil organic matter in stabilization of water-stable aggregates in soils under different types of land use. *Soil Sci. Plant Nutr.*, v.44, p.147-155.
- Gianello, C.; Giasson, E. (2004) Fatores que afetam o rendimento das culturas e sistemas de cultivo. In: Bissani, C.A.; Gianello, C.; Tedesco, M.J.; Camargo F.A.O. (eds.) *Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas*. Porto Alegre, UFRGS. p.21-32.

- Giarola, N.F.B.; Tormena, C.A.; Dutra, A.C. (2007) Degradação física de um Latossolo Vermelho utilizado para produção intensiva de forragem. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.863-873.
- Gomes, D.S. (2014) Estoque de carbono e nitrogênio em classes de agregados e em solos sob diferentes sistemas florestais no Norte Fluminense. Monografia (Graduação em Agronomia) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 51p.
- Greenwood, K.L.; Mc Kenzie, B.M. (2001) Grazing effects on soil physical properties and the consequences for pastures: a review. *australian journal of experimental agriculture*, v.41, p.1231-1250.
- Grohman, F. (1972) Porosidade. In: MONIZ, A.C. (ed.) *Elementos de pedologia*. São Paulo, Polígono, p.77- 84.
- Guareschi, R.F.; Pereira, M.G.; Menezes, C.E.G.; Anjos, L.H.C.; Correia, M.E.F. (2014) Atributos químicos e físicos do solo sob pastagem e estádios sucessionais de floresta estacional. *Revista de la Facultad de Agronomía*, v.113, p.47-56.
- Guimarães, G.P.; Mendonça, E.S.; Passos, R.R.; Andrade, F.V. (2014) Soil aggregation and organic carbon of oxisols under coffee in agroforestry systems. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.38, p.278-287.
- Helling, C.S.; Chesters, G.; Corel, R.B. (1964) Contribution of organic matter and clay to soil cation exchange capacity as affected by the pH of the saturating solution. *Proceeding Soil Science Society of American*, Madison, v.28, p.517-520.
- Hillel, D. (1980) *Fundamentals of soil physics*. New York: Academic, 413p.
- Hillel, D. (1972) *Soil and water: physical: principles and processes*. 3.ed. New York: Academic. 288p.

- Houghton, R.A. (1994) As florestas e o ciclo de carbono global: armazenamento e emissões atuais. In: SEMINÁRIO EMISSÃO X SEQÜESTRO DE CO<sub>2</sub>, 1994, Rio de Janeiro. Anais. Rio de Janeiro: Companhia Vale do Rio Doce, p.39-76.
- Imhoff, S.; Silva, A.P.; Tormena, C.A. (2000) Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.35, p.1493-1500.
- Ingaramo, O.E. (2003) Indicadores físicos de la degradación del suelo. Tesis (Doctorado en Edafología) - A Coruña - ESP, Universidade da Coruña, 298p.
- Jong van Lier, Q.; Libardi, P.L. (1997) Extraction of soil water by plants: development and validation of a model. Revista Brasileira de Ciência Solo, v.21, p.535-542.
- Kämpf, N; Curi, N. (2012) Formação e evolução do solo (Pedogênese). In: Ker, J.C.; Curi, N; Schaefer, C.E.G.R.; Vidal-Torrado, P. (eds.) Pedologia: Fundamentos. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.207-302.
- Kiehl, E.J. (1979) Manual de edafologia: relações solo-planta. São Paulo, Ceres. 262p.
- Klein, V.A. (2005) Propriedades do solo e manejo da água em ambientes protegidos com cultivo de morangueiro e figueira. Passo fundo, Ed. UPF, 61p.
- Klein, V.A.; Libardi, P.L. (2002) Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.26, p.857-867.
- Lanzanova, M.E.; Nicoloso, R. da S.; Lovato, T.; Eltz, F.L.F.; Amado, T.J.C.; Reinert, D.J. (2007) Atributos físicos do solo em sistema de integração lavoura-pecuária sob plantio direto. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.31, p.1131-1140.
- Letey, J. (1985) Relationship between soil physical properties and crop productions. Advances in Soil Science, v.1, p.277-294.
- Libardi, P.L. (1995) Dinâmica da água no solo. Piracicaba, O autor, 497p.

- Lima, H.V.; Silva, A.P.; Romero, R.E.; Jacomine, P.K.T. (2005) Comportamento físico de um Argissolo Acinzentado coeso no Estado do Ceará. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 29, p. 33-40.
- Llanillo, R.F.; Richart, A.; Tavares Filho, J.; Guimarães, M.F.; Ferreira, R.R.M. (2006) Evolução de propriedades físicas do solo em função dos sistemas de manejo em culturas anuais. *Semina: Ciências Agrárias, Londrina*, v.2, p.205-220.
- Luxmoore, R.J. (1981) Micro, meso and macroporosity of soil. *Soil Science Society American Journal, Madison*, v.45, p.671-672.
- Macedo, M.O.; Resende, A.S.; Garcia, P.C.; Boddey, R.M.; Jantalia, C.P.; Urquiaga, S.; Campello, E.F.C.; Franco, A.A. (2008) Changes in soil C And N stocks and nutrient dynamics 13 years after recovery of Degraded land using leguminous nitrogen-fixing trees. *Forest Ecology Management*, v.255, p.1516-1524.
- Mafra, A.L.; Guedes, S.F.F.; Filho, O. K.; Santos, J.C.P.; Almeida, J.A.; Dalla Rosa, J. (2008) Carbono orgânico e atributos químicos do solo em áreas florestais. *Revista Árvore, Viçosa*, v.32, p.217- 224.
- Manhães, C.M.C.; Gama-Rodrigues, E.F.; Moço, M.K.S.; Gama-Rodrigues, A.C. (2009) Biomassa de Fauna do Solo e da Serapilheira em Diferentes Coberturas Vegetais no Norte do Estado do Rio de Janeiro, Brasil. *Rev. Bras. de Agroecologia*, v. 4, p.792-795.
- Manhães, C.M.C.; Gama-Rodrigues, E.F.; Moço, M.K.S.; Gama-Rodrigues, A.C. (2013) Meso- and macrofauna in the soil and litter of leguminous trees in a degraded pasture in Brazil. *Agroforestry Systems*, v.87, p.993-1004.
- Melloni, R.; Melloni, E.G.P.; Alvarenga, M.I.N.; Vieira, F.B.M. (2008) Avaliação da qualidade de solos sob diferentes coberturas florestais e de pastagem no Sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.2461-2470.

- Meurer, E.J. (2007) Fatores que influenciam o crescimento e desenvolvimento das plantas. In: Novaes, R.F.; Alvarez, V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B.; Neves, J.C.L. (eds.) Fertilidade do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.375-470.
- Mielniczuk, J. (2008) Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: Santos, G.A.; Silva, L.S; Canellas, L.P.; Camargo, F.A.O. Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole, p.1-6.
- Milne, R.M.; Haynes, R.J. (2004) Comparative effects of annual and permanent dairy pastures on soil physical properties in the Tsitsikamma region of South Africa. *Soil Use Management*, v.20, p.81-88.
- Nascimento, A.L.; Sampaio, R.A.; Junio, G.R.Z.; Fernandes, L.A., S. F.; Cruz; Carneiro, J.P.; Barbosa, C.F.; Lima, N.N. (2014) Atributos químicos do solo adubado com lodo de esgoto estabilizado por diferentes processos e cultivado com girassol. *Biosci. Journal*, Uberlândia, v.30, p.146-153.
- Ndaw, S.M. (2007) Atividade e funcionalidade das comunidades nitrificadoras, desnitrificadoras e fixadoras de nitrogênio em solos sob diferentes coberturas vegetais na Região Norte do Estado do Rio de Janeiro. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Campos dos Goytacazes - RJ, Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF, 134p.
- Novais, R.F.; Mello, J.W.V. (2007) Relação Solo-Planta. In: Novais, R.F.; Alvarez, V.H.; Barros, N.F.; Fontes, R.L.F.; Cantarutti, R.B.; Neves, J.C.L. (eds.) Fertilidade do Solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.133-204,
- Nunes, D.A.D.; Gama-Rodrigues; E.F.; Barreto, P.A.B.; Gama-Rodrigues, A.C.; Monroe, P.H.M. (2016) Carbon and nitrogen mineralization in soil of leguminous trees in a degraded pasture in northern Rio de Janeiro, Brazil. *J. For. Res.*, v.27, p.91-99.

- Nunes, L.A.P.L. (2003) Qualidade de um solo cultivado com café e sob mata secundária no Município de Viçosa-MG. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Viçosa - MG, Universidade Federal de Viçosa - UFV, 102p.
- Nunes, L.A.P.L.; Dias, L.E.; Jucksch, I.; Barros, N.F. (2010). Atributos físicos do solo em área de monocultivo de cafeeiro na zona da mata de Minas Gerais. *Bioscience Journal*, v.26, p.71-78.
- Oelbermann, M.; Voroney, R.P.; Kass, D.C.L.; Schlönvoigt, A.M. (2006) Soil carbon and nitrogen dynamics using stable isotopes in 19- and 10-year old tropical agroforestry systems. *Geoderma*, v.130, p.356-367.
- Oliveira, C.M.; Nappo, M.E.; Passos, R.R.; Mendonça, A.R (2008) Comparação entre atributos físicos e químicos de solo sob floresta e pastagem. *Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal*, v.2, p.1-21.
- Orgill, S.E.; Spoljaric, N.; Kelly, G. (2015) Soil carbon under perennial pastures; benchmarking the influence of pasture age and management. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, v.25, p.1-4 (Soil Change Matters 2014).
- Portugal, A.F.; Juncksh, I.; Schaefer, C.E.R.G.; Neves, J.C.L. (2011) Estabilidade de agregados em argissolo sob diferentes usos, comparado com mata. *Revista Ceres*, v.57, p.545-553.
- Raij, B.V. (1969) A capacidade de troca de cátions das frações orgânica e mineral em solos. *Bragantia*, v.28, p.85-112.
- Reichert, J.M.; Reinert, D.J.; Braidá, J.A. (2003) Qualidade do solo e sustentabilidade de sistemas agrícolas. *Revista Ciência Ambiental*, v.27, p.29-48.
- Reichert, J.M.; Suzuki, L.E.A.S.; Reinert, D.J. (2007) Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: Ceretta, C.A.; Silva, L.S.; Reichert, J.M. (eds.) *Tópicos Ciência do Solo*, v.5. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.49-134.



- Reinert, D.J.; Reichert, J.M.; Veiga, M.V.; Suzuki, L.E.A.S. (2006) Qualidade física dos solos. In: Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água. Palestras. Aracaju, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, CD-ROM.
- Ribeiro, K.D.; Menezes, S.M.; Mesquita, M.G.B.F.; Sampaio, F.M.T.S. (2007) Propriedades físicas do solo, influenciadas pela distribuição de poros, de seis classes de solos da região de Lavras-MG. *Ciência e Agrotecnologia*, v.31, p.1167-1175.
- Ribeiro, L.P.; Gama-Rodrigues, E.F.; Moço, M.K.S.; Gama-Rodrigues, A.C. (2014) Influence of mineral fertilization on edaphic fauna in *Acacia auriculiformis* (A. Cunn) plantations. *R. Bras. Ci. Solo*, v.38, p.39-49.
- Richards, L.A. (1965) Physical conditions of water in soil. In: Black, C.A. (ed.). *Methods of soil analysis*. Madison, American Society for Testing and Materials, p.128-152.
- Rigatto, P.A.; Dedecek, R.A.; Mattos, J.L.M. (2005) Influência dos atributos do solo sobre a produtividade de *Pinus taeda*. *Revista Árvore*, v.29, p.701-709.
- Rita, J.C.O.; Gama-Rodrigues, A.C.; Gama-Rodrigues, E.F.; Zaia, F.C.; Nunes, D.A.D. (2013) Mineralization of organic phosphorus in soil size fractions under different vegetation covers in the north of Rio de Janeiro. *R. Bras. Ci. Solo*, 37:1207-1215.
- Rocha, O.C.; Guerra, A.F.; Ramos, M.L.G.; Oliveira, A.S.; Bartholo, G.F. (2014) Qualidade físico-hídrica de um latossolo sob irrigação e braquiária em lavoura de café no cerrado. *Coffee Science*, v.9, p.516-526.
- Rodella, A.A. (1996) Métodos de avaliação de materiais orgânicos e efeitos de sua incorporação ao solo sobre a mobilização de macronutrientes. Tese (Livre Docência) – Piracicaba - SP, Universidade de São Paulo - USP, 148p.
- Salton, J.C.; Mielniczuk, J. (1995). Relações entre sistemas de preparo, temperatura e umidade de um Podzólico Vermelho-Escuro de Eldorado do Sul - RS. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.19, p.313-319.

- Salton, J.C.; Mielniczuk, J.; Bayer, C.; Boeni, M.; Conceição, P.C.; Fabrício, A.C.; Macedo, M.C.M.; Broch, D.L. (2008) Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. R. Bras. Ci. Solo, v.32, p.11-21.
- Sans, L.M.A. (2000) 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, p.170-213.
- Santos, E. (2007). Carbono, nitrogênio e relação C/N em Gleissolo e Cambissolo sob diferentes tipologias vegetais na área de ocorrência da Floresta Ombrófila Densa, Antonina - PR. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Curitiba - PR, Universidade Federal do Paraná - UFPR, 104p.
- Santos, J.T.; Andrade, A.P.; Silva, I.F.; Silva, D.S.; Santos, E.M.; Silva, A.P.G. (2010) Atributos físicos e químicos do solo de áreas sob pastejo na Micro Região do Brejo Paraibano. Ciência Rural, v.40, p.2486-2492.
- Sarmiento, P.; Rodrigues, L.R.A.; Cruz, M.C.P. (2008). Atributos químicos e físicos de um Argissolo cultivado com *Panicum maximum* Jacq. cv. IPR-86 Milênio, sob lotação rotacionada, e adubado com nitrogênio. Revista Brasileira de Ciência do Solo, (no prelo).
- Silva, A.P.; Tormena, C.A.; Dias Júnior, M.S., Imhoff, S.; Klein, V.A. (2010) Indicadores da qualidade física do solo. In: Jong van Lier, Q. (ed.) Física do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p.241-281.
- Silva, Ê.F.F., Anti, G.R., Carmello, Q.A.C., Duarte, S.N. (2000) Extratores de cápsulas porosas para o monitoramento da condutividade elétrica e do teor de potássio na solução de um solo. Scientia Agricola, v.57, p.785-789.
- Silva Neto, L.F.; Inda, A.V.; Nascimento, P.C.; Giasson, E.; Schmitt, C.; Curi, N. (2015) Characterization and classification of floodplain soils in the Porto Alegre Metropolitan Region, RS, Brazil. Ciência e Agrotecnologia, v.39, p.423-434.

- Silva, M.A.S.; Mafra, A.L.; Albuquerque, J.A.; Bayer, C.; Mielniczuk, J. (2005) Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. *Ciência Rural*, v.35, p. 544-552.
- Soil Survey Staff (2014) *Keys to Soil Taxonomy*. 12.ed. Washington, USDA – United States Department of Agriculture, NRCS -Natural Resources Conservation Service. 360p.
- SOS Mata Atlântica/INPE. (2014). Atlas dos Remanescentes da Mata Atlântica. Período 2012-2013. São Paulo, SOS Mata Atlântica/INPE, 61p.
- Souza, J.L.; Resende, P. (2003) Manual de horticultura orgânica. Viçosa, Aprenda Fácil, 564p.
- Swartzendruber, D. (1987) A quasi-solution of Richards equation for the downward infiltration of water into soil. *Water Resistance*, v.23, p.809-817.
- Tisdall, J.M.; Oades, J.M. (1982) Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science*, v.33, p.141-163.
- Tognon, A.A. (1991) Propriedades físico-hídricas do Latossolo Roxo da região de Guairá-SP sob diferentes sistemas de cultivo. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição Mineral de Plantas) – Piracicaba - SP, Universidade de São Paulo - USP, 85p.
- Tótola, M.R.; Chaer, G.M. (2002) Microrganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: Alvarez V., V.H.; Schaefer, C.E.G.R.; Barros, N.F.; Mello, J.W.V.; Costa, L.M. (eds.) *Tópicos em Ciências do Solo*, v.2. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciências do Solo, p.195-276.
- Trevisan, E. (1987) Morfologia dos horizontes orgânicos acumulados sob povoamento de *Pinus taeda* L., em três sítios distintos. *Revista do Setor de Ciências Agrárias*, v.9, p.59-62.

- Twerdoff, D.A.; Chanasyk, D.S.; Mapfumo, E.; Naeth, M.A.; Baron, V.S. (1999) Impacts of forage grazing and cultivation on near- surface relative compaction. *Canadian Journal of Soil Science*, v.79, p.465- 471.
- Van Genuchten, M.T. (1980) A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, v.44, p.892-898.
- Vasconcelos, R.F.B.; Cantalice, J.R.B.; Oliveira, V.S.; Costa, Y.D.J.; Cavalcante, D.M. (2010) Estabilidade de agregados de um latossolo amarelo distrocoeso de tabuleiro costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.34, p.309-316.
- Vezzani, F.M.; Conceição, P.C.; Mello, N.A.; Dieckow, J. (2008) Matéria orgânica e qualidade do solo. In: Santos, G.A.; Silva, L.S.; Canellas, L.P.; Camargo, F.A. (eds.) *Fundamentos da matéria orgânica do solo: Ecossistemas tropicais e subtropicais*. 2.ed. Porto Alegre, Metrópole. p.483-494.
- Vieira, L.S.; Santos, P.C.T.; Vieira, M.N.F. (1988) *Solos: Propriedades, classificação e manejo*. Brasília, MEC/ABEAS, 154p.
- Wisniewski, C.; Reissmann, C. B. (1996) Deposição de serapilheira e nutrientes em povoamentos de *Pinus taeda* L. na região de Ponta Grossa, PR. *Arquivos de Biologia e Tecnologia*, v.39, p.435-442.
- Wolfe, M.L.; Larson, C.L.; Onstad, C.A. (1988) Hydraulic conductivity and Green-Ampt Infiltration modeling for tilled soils. *Transference America Science Agriculture Engineer*, v.31, p.1135-1140.
- Young, A. (1989) *Agroforestry for soil conservation*. Wallingford, CAB International/ICRAF. 276p.
- Zaia, F.C.; Gama-Rodrigues, A.C.; Gama-Rodrigues, E.F. (2008) Formas de fósforo no solo sob leguminosas florestais, floresta secundária e pastagem no Norte Fluminense. *R. Bras. Ci. Solo*, 32:1191-1197.