

ALINE PACOBAHYBA DE OLIVEIRA

**ÍNDICE “S” E SUAS RELAÇÕES COM CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE
SOLOS E COM A PRODUTIVIDADE DE EUCALIPTO**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS - BRASIL
2010

ALINE PACOBAHYBA DE OLIVEIRA

ÍNDICE “S” E SUAS RELAÇÕES COM CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DE SOLOS E COM A PRODUTIVIDADE DE EUCALIPTO

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

APROVADA: 22 de dezembro de 2010.

Prof. Nairam Félix de Barros
(Coorientador)

Prof. Genelício Crusoé Rocha

Dr. Fernando Palha Leite

Prof. Oldair Vinhas Costa

Prof. João Carlos Ker
(Presidente da Banca)

*A Alessandra, minha querida irmã,
Dedico.*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por tudo.

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Solos, pela oportunidade de realização do curso.

Ao CNPq e a CAPES pela concessão da bolsa de estudos.

A Celulose Nipo Brasileira – CENIBRA S.A., pelo apoio e fornecimento dos dados para realização deste trabalho.

Ao Professor Júlio César Lima Neves pela orientação, pela amizade e por todo ensinamento.

Ao Professor João Carlos Ker pela dedicação ao trabalho, pelo incentivo, ensinamentos e pela amizade.

Ao Professor Nairam Félix de Barros pela importante participação no trabalho, pela amizade e ensinamentos.

Ao Professor Genelício Crusoé Rocha pela grande colaboração e contribuição com o trabalho.

Ao Professor Hugo Alberto Ruiz pela amizade, apoio e valiosas contribuições para o trabalho.

Ao Professor Oldair Vinhas Costa pela contribuição com o trabalho.

Ao Dr. Fernando Palha Leite pelas informações concedidas e pela colaboração com o trabalho.

A Luciana, pela amizade, carinho e pela dedicação.

Aos professores e funcionários do Departamento de Solos pela amizade.

À minha irmã Alessandra e ao meu namorado Alan pelo carinho, por tanto me ajudarem na realização deste trabalho, pelo amor, pela paciência, companheirismo e por estarem sempre ao meu lado tanto nas alegrias quanto nos momentos difíceis.

Ao meu pai, pelas preces, companheirismo e por poder contar com ele.

A minha Tia Maria, minha segunda mãe, pelo carinho e pela força nos momentos difíceis.

A D. Maria Stella e Andréa pela amizade, pelos momentos de descontração e por sempre me apoiarem.

As minhas amigas Nilva, D. Oradia e D. Paulina pelas preces, pelo carinho e amizade e pelas conversas amigas e divertidas.

A Ecila pela contribuição com o trabalho, por estar sempre pronta a ajudar e pela amizade.

A minha amiga Rúbia, pelo carinho e pela grande amizade mesmo estando distante.

Aos amigos e colegas do Departamento de Solos da UFV.

Aos que não cito aqui, mas, que de alguma forma contribuíram para meu trabalho e aprendizado.

BIOGRAFIA

ALINE PACOBAHYBA DE OLIVEIRA, filha de Afonso Treves de Oliveira e Leila Pacobahyba de Oliveira, nasceu em 15 de agosto de 1977, na cidade de Santos Dumont, Minas Gerais.

Em 1999 iniciou o Curso de Agronomia na Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais. Em março de 2001 iniciou, como estagiária, suas atividades em pesquisa no Departamento de Solos da UFV, onde posteriormente, foi bolsista de iniciação científica até a conclusão do curso de graduação que se deu em dezembro de 2003.

Em março de 2004 iniciou o Curso de Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa finalizando-o com a defesa de dissertação em fevereiro de 2007.

Em março de 2007 iniciou o Curso de Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas da Universidade Federal de Viçosa, concluindo-o com a defesa da presente tese em dezembro de 2010.

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	vii
LISTA DE QUADROS.....	ix
RESUMO	xi
ABSTRACT	xiii
1. INTRODUÇÃO	1
2. MATERIAL E MÉTODOS	9
2.1. Obtenção das curvas de retenção de água no solo.....	11
2.2. Determinação da macroporosidade e da microporosidade.....	11
2.3. Determinação do Índice “S”.....	12
2.4. Índice “S” e características físicas do solo	12
2.5. Índice “S” para um maior número de perfis de solo sob eucalipto na região do Vale do Rio Doce, MG.....	13
2.6. Obtenção dos valores de produtividade atual (IMA7), produtividade potencial (IMAp) e das razões de produtividades (IMA7/IMAp).....	13
2.7. Relação do Índice “S” com a produtividade do eucalipto e Proposição de faixas de valores de “S” associadas à qualidade física de solos para essa cultura.....	14
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	16
3.1. Índice “S” e suas relações com características físicas e com matéria orgânica de amostras de solos da região do Vale do Rio Doce – MG.....	16
3.2. Índice “S” e produtividade de eucalipto, na região do Vale do Rio Doce – MG.....	27
4. CONCLUSÕES	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

LISTA DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Tipos de funções de pontuação padronizada: (a) “mais é melhor”, (b) “menos é melhor” e (c) “ótimo”.....	5
Figura 2. Distribuição de frequência dos valores de Índice “S” estimado a partir da curva de retenção de água (CRA) com umidade em kg kg^{-1} (“Sg”) (a) e estimado a partir da curva de retenção de água (CRA) com umidade em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ (“Sv”) (b), de 48 amostras de solos cultivados com eucalipto no Vale do Rio Doce – MG.....	20
Figura 3. Relação entre o Índice “S” obtido a partir do ajuste da CRA com umidade em kg kg^{-1} (“Sg”) em função do Índice “S” obtido a partir do ajuste da CRA com umidade em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ (“Sv”), para solos sob plantios de eucalipto, na região do Vale do Rio Doce – MG.....	21
Figura 4. Relação do índice “S”, calculado a partir da curva de retenção de água (CRA) com umidade em $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ (“Sv”), com a densidade do solo (a), a porosidade total (b), o volume de macroporos (c), a relação macroporos/microporos (d), o teor de argila (e) e o teor de matéria orgânica (f), em solos do Vale do Rio Doce – MG. Exceto para argila (^{ns}), todas as demais equações são significativas a 0,1 % de probabilidade.....	23
Figura 5. Relação do índice “S”, calculado a partir da curva de retenção de água (CRA) com umidade em kg kg^{-1} (“Sg”), com a densidade do solo (a), a porosidade total (b), o volume de macroporos (c), a relação macroporos/microporos (d), o teor de argila (e) e o teor de matéria orgânica (f), em solos do Vale do Rio Doce – MG. Todas as equações são significativas a 0,1 % de probabilidade, exceto para argila, que é significativa a 1 % de probabilidade.....	24
Figura 6. Equação para o Índice “S” derivado da CRA ajustada conforme o modelo de van Genuchten, utilizando-se a água retida, em base volumétrica, às tensões de 10, 30, 100, 300 e 1500 kPa, além da umidade de saturação (θ_s) (Índice “S”ajustado), em função do Índice “S” derivado de CRA ajustada apenas com θ_s , e a água retida a 10 e 1500 kPa (Índice “S” calculado), para 48 amostras de solos da região do Vale do Rio Doce – MG.....	27

- Figura 7. Distribuição de frequência dos valores de Índice “S”, estimado a partir da curva de retenção de água (CRA) com umidade em $m^3 m^{-3}$ (“Sv”), de 142 perfis de solos (média dos horizontes A e B ou C) cultivados com eucalipto no Vale do Rio Doce – MG..... 33
- Figura 8. Gráfico de dispersão da produtividade atual (IMA7, a) e de razão de produtividades (IMA7/IMAp, b) em resposta aos valores estimados de Índice “S” derivado de curvas de retenção de água em base volumétrica, “Sv”. A curva contínua representa a linha de fronteira superior do relacionamento..... 35
- Figura 9. Produtividade (IMA7) (a) e Razão de produtividades (IMA7/IMAp) (b) de plantios de eucalipto em 142 perfis de solos, na região do Vale do Rio Doce – MG. As equações correspondem à linha de fronteira do relacionamento..... 37
- Figura 10. Representação gráfica das faixas de Índice “S” associadas à classes de qualidade física de solos, com base no crescimento relativo (IMA7 relativo) da cultura do eucalipto, pelo método da linha de fronteira (vermelho: muito pobre, laranja: pobre, amarelo: regular, verde: boa, azul: boa, tendendo a regular, cinza claro: regular, tendendo a pobre, cinza escuro: pobre, tendendo a muito pobre). No gráfico, a porção menos espessa da curva indica extrapolação do modelo ajustado..... 38
- Figura 11. Representação gráfica das faixas de Índice “S” associadas à classes de qualidade física de solos, com base na razão de produtividades (IMA7/IMAp relativo) da cultura do eucalipto, pelo método da linha de fronteira (vermelho: muito pobre, laranja: pobre, amarelo: regular, verde: boa, azul: boa, tendendo a regular, cinza claro: regular, tendendo a pobre, cinza escuro: pobre, tendendo a muito pobre). No gráfico, a porção menos espessa da curva indica extrapolação do modelo ajustado..... 39

LISTA DE QUADROS

	Página
Quadro 1. Características físicas e teores de matéria orgânica de solos sob plantios de eucalipto no Vale do Rio Doce – MG.....	10
Quadro 2. Retenção de umidade em diferentes tensões, parâmetros do modelo de van Genuchten, textura, macroporosidade, microporosidade e Índices “S” calculados a partir da CRA com umidade em kg kg^{-1} (“Sg”) e com umidade em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (“Sv”) de solos sob plantios de eucalipto, na região do Vale do Rio Doce – MG.....	17
Quadro 3. Coeficientes de correlação linear simples entre o Índice “S”, calculado a partir da curva de retenção de água (CRA) com umidade em kg kg^{-1} (“Sg”) e em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (“Sv”) e características físicas de solos do Vale do Rio Doce – MG.....	22
Quadro 4. Valores de Índice “S” de perfis de solos (horizontes A, B ou C), no Vale do Rio Doce – MG e de produtividades atuais (IMA7), potenciais (IMAp) e razão de produtividades (IMA7/IMAp) de plantios de eucalipto neles cultivados.....	28
Quadro 5. Valores médios de Índice “S” de perfis de diferentes classes de solos (horizontes A, B ou C), e de produtividades atuais (IMA7), potenciais (IMAp) e razão de produtividades (IMA7/IMAp) de plantios de eucalipto neles cultivados, no Vale do Rio Doce – MG.....	32
Quadro 6. Classes de qualidade física de solos e respectivos valores de Índice “S” derivado de CRA com umidade em base volumétrica “Sv”, com base no crescimento relativo (IMA7 relativo) da cultura do eucalipto, conforme o método da Linha de Fronteira.....	38
Quadro 7. Classes de qualidade física de solos e respectivos valores de Índice “S” derivado de CRA com umidade em base volumétrica “Sv”, com base na razão de produtividades (IMA7/IMAp relativo) da cultura do eucalipto, conforme o método da Linha de Fronteira.....	39

- Quadro 8. Frequência absoluta (n) e relativa (n, %) em classes de qualidade física de solos, em termos do horizonte A, B (ou C) ou da média destes, com base nos valores de Índice “S” associados à produtividade atual (IMA7) de plantios de eucalipto, na região do Vale do Rio Doce – MG..... 40
- Quadro 9. Frequência absoluta (n) e relativa (n, %) em classes de qualidade física de solos, em termos do horizonte A, B (ou C) ou da média destes, com base nos valores de Índice “S” associados à razão de produtividades (IMA7/IMAp) de plantios de eucalipto, na região do Vale do Rio Doce – MG..... 40

RESUMO

OLIVEIRA, Aline Pacobahyba de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, dezembro de 2010. **Índice “S” e suas relações com características de solos e com a produtividade de eucalipto.** Orientador: Júlio César Lima Neves. Coorientadores: João Carlos Ker e Nairam Félix de Barros.

A grande importância econômica, social e ambiental da cultura do eucalipto tem levado à utilização de modelos de crescimento com base processual, com destaque para o 3-PG, para a determinação da capacidade produtiva do sítio florestal. Esse modelo, contudo, necessita ser dotado de resolução em nível de solo de modo que possa se constituir em ferramenta efetiva para o manejo florestal. Para isso, acredita-se que o desenvolvimento de um modulador pedológico capaz de refletir os fluxos de ar, água e nutrientes, e sua utilização nesse modelo seja estratégia adequada. Nesse contexto, para avaliar a qualidade física do solo, foi proposto o Índice “S”, caracterizado pela inclinação da curva de retenção de água do solo no seu ponto de inflexão, que necessita ser avaliado para solos cultivados com eucalipto. O objetivo deste trabalho foi determinar o Índice “S”, avaliar sua relação com características físicas de solos e com a produtividade de eucalipto, visando sua utilização para representar a qualidade física em modulador pedológico a ser utilizado no 3-PG. Para tanto, foram obtidas as curvas de retenção de água conforme o modelo de van Genuchten em amostras de Latossolos (LA, LVA e LV), Cambissolos Háplicos (CX) e Neossolos Flúvicos (RY) da região do Vale do Rio Doce – MG, o Índice “S” foi determinado e correlacionado com a densidade do solo, a porosidade total, a macroporosidade, a microporosidade, a relação macroporosidade/microporosidade, e com os teores de argila, de silte mais argila e de matéria orgânica. O relacionamento do Índice “S” com a produtividade de eucalipto (incremento médio anual, IMA7) e com a razão de produtividades (IMA7/IMAp, sendo IMAp a produtividade potencial, estimada pelo 3-PG, foi feito pelo método da Linha de Fronteira. O Índice “S” relacionou-se com características físicas que refletem o sistema poroso do solo e com o teor de matéria orgânica, mostrando-se capaz de representar a

qualidade física de solos cultivados com eucalipto e, assim, útil para integrar modulador pedológico a ser usado em modelos de crescimento com base processual, como o 3-PG. Foram obtidas faixas de valores de “S” associadas a classes descritivas da qualidade física do solo para o eucalipto. Em torno de 80 % dos solos cultivados com eucalipto na região do Vale do Rio Doce – MG apresentam boa qualidade física.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Aline Pacobahyba de, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, December 2010. **The “S” Index and its relationship with soil characteristics and eucalyptus productivity.** Adviser: Júlio César Lima Neves. Co-advisers: João Carlos Ker and Nairam Félix de Barros.

The great economic, social and environmental importance of eucalyptus has led to the use of process-based growth models, especially the 3-PG model, to determine the productive capacity of the forest site. This model, however, needs to be provided with resolution at the soil level so that it may be an effective tool for forest management. For this, it is believed that the development of a pedological modulator capable of reflecting flows of air, water and nutrients, and their use in this model is an appropriate strategy. Thus, to evaluate the physical quality of soil an “S” index has been proposed, characterized by the slope of the soil water retention curve at its point of inflection, which requires evaluation in the soils cultivated with eucalyptus. The objective of this study was to determine the “S” index to assess its relationship with physical characteristics of the soil and eucalyptus productivity, for their use to represent physical quality in the pedological modulator to be used in the 3-PG model. For this purpose, the water retention curves were obtained in accordance with the van Genuchten model in Oxisols, Inceptisols and Fluvents samples from the Vale do Rio Doce, MG, Brazil; the "S" index was determined and correlated with bulk density, total porosity, macroporosity, microporosity, the macroporosity/microporosity ratio, and levels of clay, silt plus clay and organic matter. The relationship of the "S" index with eucalyptus productivity (mean annual increment, MAI7) and the ratio of yields (MAI7/MAIp, where MAIp is the potential yield, estimated by 3-PG model), was made by the Boundary Line method. The "S" index was related to the soil physical characteristics that reflect the porous system and the organic matter content, being able to represent the physical quality of soils cultivated with eucalyptus and thus useful for integrating a

pedological modulator to be used in process-based growth models, such as the 3-PG model. Ranges of "S" values associated with soil physical quality class for eucalyptus are proposed. Approximately 80% of the soils cultivated with eucalyptus in the Vale do Rio Doce - MG present good physical quality.

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, as florestas plantadas ocupam mais de 271 milhões de hectares, o que equivale a 6,9 % da área florestada no mundo. O Brasil apresentou, até 2005, área equivalente a quase 5,4 milhões de hectares de florestas com espécies de *Eucalyptus* e *Pinus* (FAO, 2006), com tendências de aumento, situando-se entre os dez primeiros países do mundo no que diz respeito a florestas plantadas. Deste total, o Estado de Minas Gerais participa com a maior contribuição em área plantada, totalizando 1.600.000 ha.

Além da geração de riquezas, as florestas plantadas diminuem a exploração de florestas naturais e contribuem para a redução do aumento do efeito estufa, uma vez que os ecossistemas florestais têm importante participação na captura e armazenamento de CO₂ constituindo um dos principais estoques de carbono dentre os ecossistemas terrestres. Segundo Kimmins (2004), dos 1146 bilhões de toneladas de carbono estocados nas florestas, 37 % correspondem às de baixa latitude (tropicais e subtropicais), 14 % às de média latitude e 49 % às de altas latitudes, distribuídos, principalmente no solo.

As excelentes condições edafoclimáticas para a silvicultura, conferem ao Brasil grandes vantagens comparativas para a atividade florestal. Esses fatores, aliados ao desenvolvimento tecnológico para o plantio de florestas, com destaque para o manejo silvicultura, transformam as vantagens naturais em competitividade real, permitindo ao Brasil, por exemplo, ter o menor custo mundial de produção de celulose a partir de plantios florestais.

No Brasil, para estimar a capacidade produtiva do sítio florestal, têm sido utilizados modelos de crescimento com base processual, principalmente o 3-PG (Physiological Principles in Predicting Growth, Landsberg & Waring, 1997). Com base em dados de clima e de material genético, e de algumas informações sobre o solo, o modelo permite que se façam inferências a respeito do crescimento, da produtividade e da sustentabilidade de povoamentos florestais equiâneos e homogêneos. O 3-PG, também vem sendo utilizado por algumas empresas no sentido de auxiliar o manejo florestal, carecendo, contudo, de maior e melhor resolução em nível de solo para que possa ser utilizado como efetiva ferramenta visando subsidiar o manejo florestal.

Uma estratégia para conferir essa resolução ao 3-PG é a obtenção de um modulador pedológico que reflita os fluxos de ar, água e nutrientes e sua utilização no referido modelo. Tal modulador, preferencialmente, deve ser constituído por indicadores disponíveis em levantamentos pedológicos, e que possam refletir a qualidade do solo do ponto de vista físico, químico e biológico.

Dentre as várias definições de qualidade de solo, a Sociedade Americana de Ciência do Solo, define qualidade do solo como "*a capacidade de um tipo específico de solo funcionar, dentro dos limites de ecossistemas naturais ou manejados, para sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água, promovendo a saúde humana e a habitação*" (Doran & Parkin, 1994; Karlen et al., 1997; Singer & Ewing, 2000).

De acordo com Schoenholtz et al. (2000) há um íntimo relacionamento entre a qualidade do solo e sustentabilidade da produção florestal, o que evidencia a associação existente entre qualidade do solo, produtividade e sua manutenção no tempo (Doran & Parkin, 1994). Dessa forma, características que reflitam a dinâmica de água e nutrientes nos solos podem ser usadas em modelos de qualidade do solo (Chaer, 2001) como indicadoras de sustentabilidade florestal, após melhor definidas e calibradas (Menezes, 2005).

Desse modo, tem-se a necessidade de que sejam definidos atributos do solo e do ambiente sensíveis ao manejo que permitam o monitoramento e a interpretação da qualidade do solo subsidiando a orientação na condução e modificação dos sistemas de manejo a fim de evitar, a tempo, sua degradação (Mielniczuk, 1999). É importante,

portanto, que tais atributos sejam de fácil determinação e acesso (Chaer, 2001). Para tanto, características químicas (CTC, V, matéria orgânica, cátions trocáveis/disponíveis, pH), físicas (textura, densidade, água disponível, porosidade) e biológicas (biodiversidade, atividade de enzimas no solo, taxa de mineralização de nitrogênio, carbono e nitrogênio da biomassa e quociente metabólico) do solo tem sido utilizadas como indicadores de sua qualidade (Turco & Blume, 1998; Mielniczuck, 1999; Chaer, 2001; Tótola & Chaer, 2002; Santos, 2004).

De acordo com Poggiani (1998), os indicadores ambientais podem ser avaliados repetidamente ao longo do tempo e podem estar relacionados a aspectos climáticos, edáficos, ecológicos, fenológicos, fisiológicos, etc, que, uma vez registrados e devidamente organizados ao longo do tempo, permitam estabelecer relações claras de causa/efeito entre a produção de fitomassa e os fatores físicos, químicos e bióticos do ambiente. Permitem, ainda, acompanhar as diferentes formas de impacto que as plantações florestais causam sobre o ambiente tomando como referência o ecossistema natural primitivo e, ou pré-existente.

Doran & Parkin (1994) apontam que alguns critérios necessários aos indicadores de qualidade do solo devem representar processos do ecossistema bem como relacionar-se aqueles orientados por modelagem; integrar propriedades físicas, químicas e biológicas do solo aos processos; ser acessível aos usuários e aplicáveis as condições de campo; ser sensível a variações no manejo e no clima; quando possível, compor bases de dados existentes relacionadas a solos; ser de caráter holístico e não reducionista. Turco & Blume (1998) ressaltam também que os indicadores devem fornecer respostas rápidas e exatas às alterações do ecossistema e refletir sua funcionalidade.

Já para Stenberg (1999), além de integrar propriedades e processos físicos, químicos e biológicos os indicadores devem representar propriedades ou funções do solo de mensuração mais difícil, sendo necessária a utilização conjunta de vários indicadores para obter boas interpretações; apresentar relevância ecológica, mas entendendo a variação natural dos indicadores; ser sensível a variações em longo prazo, no que diz respeito ao manejo e ao clima, porém resistentes às flutuações em curto prazo por mudanças nas condições atmosféricas ou nas fases de crescimento e desenvolvimento das culturas.

Entretanto, conciliar vários critérios em um único indicador não é simples. Isso explica a utilização de vários indicadores, com sensibilidades e características preditivas diferenciadas que reflitam os processos que ocorrem nos ecossistemas (Menezes, 2005). Portanto, para a avaliação da qualidade do solo devem-se identificar critérios e métodos apropriados com relação às múltiplas funções do solo (Karlen et al., 1997) e suas variações espaciais e temporais.

Nesse sentido Karlen & Stott (1994) apontam algumas funções do solo importantes ao se avaliar os efeitos dos diferentes tipos de sistema de manejo na sua qualidade: favorecer a entrada de água; favorecer o transporte e a absorção de água; resistir à degradação e; dar suporte ao crescimento de plantas.

Burger & Kelting (1998) acrescentam outras funções do solo baseadas em florestas plantadas como promover o crescimento de raízes; receber, reter e suprir água; reter, suprir e ciclar nutrientes; promover trocas gasosas e; promover a atividade biológica, sendo cada uma delas estimada com base em indicadores.

Várias aproximações têm sido feitas para se desenvolver um índice de qualidade do solo (Pierce & Larson, 1993; Smith et al., 1993; Doran & Parkin, 1994; Karlen & Stott, 1994). Contudo, não houve ainda consenso em relação ao conceito de qualidade do solo (Araújo, 2008). Para alguns autores (Doran & Parking, 1994; Sojka & Upchurch, 1999), pode não ser possível atingir esse consenso, em função de uma série de fatores.

A aproximação para o índice de qualidade do solo proposta por Karlen & Stott (1994) é flexível e de fácil utilização, possibilitando sua aplicação em diferentes regiões, sistemas de cultivo e objetivos de avaliação. Trata-se de um modelo aditivo onde se aplica pesos às principais funções do solo, as quais são integradas conforme a seguinte equação:

$$SQI = q_{we}(wt) + q_{wt}(wt) + q_{rd}(wt) + q_{spg}(wt)$$

em que (q_{we}) é a habilidade do solo de permitir a entrada de água, (q_{wt}) de transportar e absorver água, (q_{rd}) de resistir à degradação e (q_{spg}) de sustentar o crescimento de plantas, sendo wt o peso correspondente a cada função do solo. Os pesos numéricos são definidos de acordo com a importância de cada atributo sob uma condição específica de uso com vistas a atender aos requisitos para manutenção da

qualidade do solo. A soma dos pesos de todas as funções deve ser, no máximo, 1. Esse seria o valor do SQI para um solo ideal em relação ao objetivo considerado. Na medida em que o solo apresenta limitações e perde qualidade, o valor se aproxima de zero.

Após identificar as funções principais, é necessário normalizar os valores em uma escala única, também entre 0 e 1. O mecanismo utilizado é uma função para padronização de pontuações, desenvolvida para sistemas de aproximação em engenharia por Wymore (1993). O modelo utiliza curvas de pontuações normalizadas, o qual permite a obtenção de valores padronizados entre 0 e 1:

$$PP = 1/(1 + ((B-L)/(x-L))^{2S(B+x-2L)})$$

em que PP é a pontuação padronizada; B é o valor na linha base da propriedade do solo, com pontuação equivalente a 0,5; L é o limite inferior da propriedade do solo; S a inclinação da tangente da curva na linha base e x o valor da propriedade do solo medida. O valor de S é dado pela seguinte expressão:

$$S = (\log(1/PP) - 1) / (\log(B-L/x-L) \cdot 2(B+x-2L))$$

Os resultados das equações podem fornecer três tipos de funções de pontuação padronizadas (Figura 1), as quais são usadas para avaliar a qualidade do solo: (a) “mais é melhor”, (b) “menos é melhor” e (c) “ótimo”.

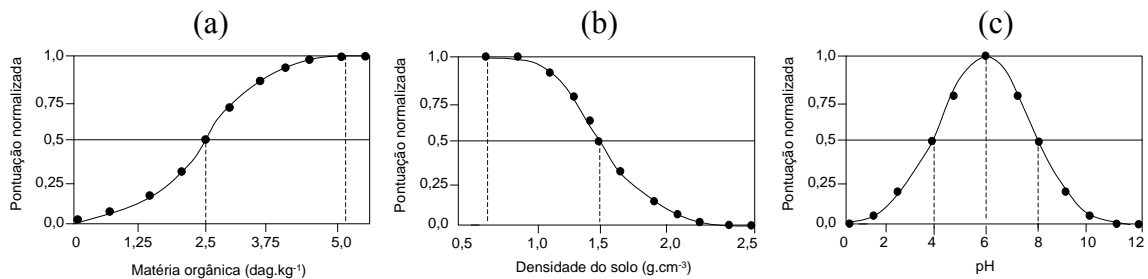


Figura 1. Tipos de funções de pontuação padronizada: (a) “mais é melhor”, (b) “menos é melhor” e (c) “ótimo”. Fonte: Menezes (2005).

A forma das curvas é determinada pelos valores críticos, ou seja, os valores da linha base e os valores limites. A fonte desses valores, portanto, deve ser baseada em informações de pesquisadores renomados no assunto, bancos de dados de experimentações e valores observados para condições ideais e semelhantes de solo e

cultivo (Karlen & Stott, 1994; Burger & Kelting, 1999; Glover et al., 2000). Nesse contexto, podem também ser utilizados métodos de análise numérica como o da linha de fronteira (Webb, 1972; Walworth et al. 1986; Mediavilla & Escudero, 2003; Fernandes, 2010) e o da Chance Matemática Relativa (Fernandes, 2010)

No Brasil, a aplicação do método proposto por Karlen & Stott (1994) foi utilizada por Chaer (2001), Souza et al. (2003), Santos (2004) e Menezes (2005), dentre outros. No trabalho de Chaer (2001), realizado no Estado de São Paulo, o modelo foi modificado para avaliar o efeito de diferentes métodos de preparo do solo, adotado em uma área de reforma de um povoamento de eucalipto, utilizando indicadores físicos, químicos e microbiológicos. O autor verificou que o modelo permitiu quantificar mudanças na qualidade do solo resultantes do manejo. Souza et al. (2003), ao aplicarem o modelo em um estudo de caso com citros em solos coesos dos Tabuleiros Costeiros, concluíram que o método é prático e adequado para estimar os indicadores de qualidade do solo, pois permite identificar as principais funções e os indicadores limitantes, possibilitando orientar as intervenções no sistema a fim de melhorá-lo. Santos (2004) utilizou indicadores químicos e bioquímicos associados à microbiota para avaliar o efeito da adição de efluentes de fábrica de celulose sobre a qualidade do solo para o eucalipto. Menezes (2005), utilizando apenas indicadores de natureza química e algo da física, comumente encontrados nos relatórios de levantamentos de solo, verificou a existência de correlação positiva e estatisticamente significativa entre o IQS e a produtividade de plantios de eucalipto em áreas da CENIBRA S.A., na Zona Metalúrgica de Minas Gerais.

Percebe-se assim que os indicadores físicos do solo têm sido menos avaliados comparativamente aos químicos, bioquímicos e microbiológicos, havendo a necessidade de se empreender estudos sistemáticos sobre os indicadores físicos, de modo a que a qualidade física possa ser adequadamente incluída nos modelos de qualidade do solo.

A qualidade física ou estrutural do solo é de fundamental importância na infiltração de água, no escoamento superficial e subsuperficial (lixiviação), na erosão e na drenagem interna do solo (Walker & Reuter, 1996). Esses processos, por sua vez, são fundamentais na regulação do suprimento e armazenamento de recursos água, nutrientes e oxigênio, essenciais ao crescimento e desenvolvimento das plantas e da microbiota do

solo. Assim, a qualidade física do solo pode ser considerada um aspecto central no que se refere ao desenvolvimento de melhores técnicas de manejo e na avaliação da qualidade do solo.

O conceito de um solo fisicamente ideal é complexo e carece de melhor definição quantitativa (Reinert & Reichert, 2006).

O Índice “S” foi proposto por Dexter (2004a, b, c) como indicador da qualidade física e estrutural do solo. Este índice consiste na declividade da curva de retenção de água do solo no seu ponto de inflexão. Seu valor representa a proporção de poros, por tamanho, de maior frequência em uma determinada amostra de solo.

A estrutura do solo é uma das propriedades mais importantes na relação solo-planta e está diretamente ligada à produtividade das culturas. Solos com boa agregação apresentam melhor distribuição de poros no perfil, portanto, melhor distribuição de água, melhor difusão de oxigênio e trocas gasosas com a atmosfera e menor resistência à penetração de raízes no perfil (Kiehl, 1979; Tormena et al. 1998, Pedrotti & Mélo Júnior, 2009).

Desse modo, variações no tipo de manejo e nos sistemas de preparo do solo capazes de alterar atributos do solo, como porosidade, densidade do solo, estrutura e teor de matéria orgânica irão influenciar na distribuição de poros por tamanho, resultando em alterações na qualidade estrutural do solo e, conseqüentemente, nos valores de S. O monitoramento da qualidade física do solo por meio do Índice “S” permitiria uma avaliação dinâmica dessa qualidade, fundamental para a qualidade do solo em sentido amplo.

No Brasil, conforme sugerido por Dexter (2004a, c), o Índice “S” tem sido utilizado na avaliação do grau de degradação de solos em função do tipo de manejo empregado e do teor de matéria orgânica, e tem sido considerado como um bom indicador da qualidade física do solo (Tormena & Silva, 2004; Streck et al., 2008; Andrade & Stone, 2009), além de permitir melhor entendimento de alterações físicas resultantes do manejo do solo (Fidalski & Tormena, 2007; Tormena et al., 2008). O Índice “S” constitui um avanço na quantificação da qualidade estrutural do solo a partir das curvas de retenção de água (Silva et al., 2010).

Além disso, o uso do Índice “S” permite que comparações entre a qualidade física de diferentes tipos de solos, e inclusive, entre solos de regiões temperadas e tropicais. Todavia, faz-se necessário a validação do Índice “S” para diferentes tipos de solos, agroecossistemas e regiões do Brasil.

Este trabalho teve como objetivos:

Avaliar o Índice “S” e seu relacionamento com características físicas de solos sob cultivo de eucalipto na região do Vale do Rio Doce – MG.

Obter faixas de valores de “S” indicativas de classes de qualidade física do solo para a cultura do eucalipto.

Avaliar a qualidade física de solos da região do Vale do Rio Doce – MG, cultivados com eucalipto.

2. MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado com solos da na região do Vale do Rio Doce, Minas Gerais, sob plantios de eucalipto, em áreas da Celulose Nipo Brasileira – CENIBRA S.A., localizadas entre 18° e 20° de latitude sul e 42° e 44° de longitude oeste.

Segundo a classificação climática de Köeppen, a região apresenta os climas Aw, clima tropical, com inverno seco e verão úmido e Cwa, clima de inverno seco e verão chuvoso com temperaturas maiores ou iguais a 22 °C.

A vegetação natural é caracterizada por floresta estacional semidecidual, com espécies arbóreas de médio e grande porte, intercaladas com espécies de pequeno porte. Comumente, grandes áreas de pastagens degradadas da região são utilizadas para o cultivo de eucalipto (Oliveira & Leite, 2000).

O relevo da região é predominantemente forte ondulado, caracterizado por encostas longas do tipo convexo ou convexo-côncavas com declividade menor do que 45 ° e interflúvios estreitos e planos.

A região apresenta geologia com embasamento cristalino granito-gnaiss dividido com poucos afloramentos rochosos de caráter básico como Gabros e Charnoquitos. Nos interflúvios ocorrem sedimentos do Terciário e do Quaternário, de origem fluvial e coluvial.

Inicialmente, foram selecionadas 48 amostras indeformadas de solos representativos da região, abrangendo 25 Latossolos (sete Latossolos Vermelhos, oito Latossolos Vermelho Amarelos e 10 Latossolos Amarelos), 12 Cambissolos Háplicos e 11 Neossolos Flúvicos, cujos resultados das características físicas e do teor de matéria orgânica são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1. Características físicas e teores de matéria orgânica de solos sob plantios de eucalipto no Vale do Rio Doce – MG.

Classe,	Horiz,	Prof,	Areia	Silte	Argila	Textura	Dp	Ds	Pt	MO
		cm	g kg ⁻¹				kg dm ⁻³		m ³ m ⁻³	dag kg ⁻¹
LV	A	0-11	460	200	340	Média	2,49	0,73	0,706	2,27
LVA	A	0-14	560	130	310	Média	2,46	1,13	0,542	1,14
LVA	A	0-33	540	120	340	Média	2,56	1,33	0,483	1,27
CX	A1	0-20	566	101	333	Média	2,59	1,16	0,551	1,69
CX	A1	0-22	442	251	307	Média	2,53	1,34	0,472	1,98
RY	A	0-16	566	98	337	Média	2,59	1,21	0,532	2,02
RY	3C2	66-93	511	268	221	Média	2,57	1,30	0,493	0,16
RY	3C2	37-92	199	663	138	Média	2,36	1,08	0,541	0,16
RY	4C3	78-119	60	772	168	Siltosa	2,72	1,07	0,607	0,11
LVA	A	0-15	370	70	550	Argilosa	2,36	1,08	0,543	0,98
LVA	A	0-18	450	80	470	Argilosa	2,59	1,29	0,502	1,84
LVA	A1	0-30	460	90	450	Argilosa	2,43	1,23	0,495	1,80
LVA	A1	0-9	560	90	350	Argilosa	2,49	1,14	0,540	2,63
LVA	Bw1	26-79	390	150	470	Argilosa	2,47	1,18	0,521	1,54
LA	A	0-22	550	90	360	Argilosa	2,63	1,28	0,514	1,66
LA	A	0-22	360	50	590	Argilosa	2,50	1,16	0,535	2,64
LA	A	0-42	360	80	550	Argilosa	2,58	1,22	0,526	1,96
LA	A	0-22	540	70	390	Argilosa	2,67	1,27	0,524	2,92
LA	A1	0-29	520	80	400	Argilosa	2,48	1,38	0,445	2,34
LA	A1	0-23	540	60	400	Argilosa	2,64	1,24	0,532	3,11
LA	Bw2	112-160	380	50	570	Argilosa	2,57	1,14	0,555	1,11
CX	A	0-16	347	90	563	Argilosa	2,48	0,87	0,648	3,91
CX	A	0-20	554	77	369	Argilosa	2,50	1,19	0,525	2,04
CX	A1	0-14	428	108	464	Argilosa	2,45	1,10	0,552	2,02
CX	Bi	32-70	336	113	551	Argilosa	2,57	1,14	0,557	1,44
CX	Bi2	97-97	306	209	486	Argilosa	2,53	0,82	0,676	5,79
RY	A	0-17	519	115	366	Argilosa	2,20	1,24	0,438	1,77
RY	A	0-29	377	117	505	Argilosa	2,62	1,12	0,572	3,14
RY	A	0-16	322	121	557	Argilosa	2,42	1,05	0,565	1,16
RY	A	0-12	291	186	522	Argilosa	2,55	1,18	0,537	1,16
RY	A1	0-31	238	196	566	Argilosa	2,43	1,17	0,518	1,96
LV	A	0-41	300	80	620	Muito argilosa	2,51	0,93	0,629	2,75
LV	A	0-16	170	50	780	Muito argilosa	2,53	0,56	0,777	7,02
LV	A	0-21	240	100	660	Muito argilosa	2,44	0,90	0,633	5,39
LV	Bw1	40-105	140	40	810	Muito argilosa	2,62	0,86	0,670	2,24
LV	Bw1	48-93	160	80	750	Muito argilosa	2,58	0,93	0,640	1,61
LV	Bw1	21-73	170	20	810	Muito argilosa	2,55	0,79	0,689	2,34
LVA	A	0-25	310	40	650	Muito argilosa	2,46	0,93	0,622	2,58
LA	A	0-16	250	20	730	Muito argilosa	2,41	0,68	0,718	7,17
LA	A	0-10	260	80	660	Muito argilosa	2,55	0,95	0,626	5,83
LA	Bw1	68-116	350	20	630	Muito argilosa	2,62	1,10	0,582	1,08
CX	A	0-17	158	36	806	Muito argilosa	2,47	1,08	0,563	2,08
CX	A	0-16	284	35	680	Muito argilosa	2,47	1,06	0,569	3,69
CX	A1	0-19	235	131	634	Muito argilosa	2,31	0,64	0,723	4,90
CX	A1	0-25	264	98	638	Muito argilosa	2,61	1,13	0,566	3,20
CX	Bi1	47-98	180	129	690	Muito argilosa	2,72	1,04	0,620	1,20
RY	A	0-10	233	131	636	Muito argilosa	2,38	0,97	0,591	1,96
RY	C1	12-60	142	245	613	Muito argilosa	2,56	1,22	0,523	0,30

Dp: densidade de partículas, Ds: densidade do solo, Pt: porosidade total, MO: matéria orgânica.

2.1. Obtenção das curvas de retenção de água no solo

Dados de umidade em base gravimétrica e volumétrica, e de tensão da curva de retenção de água no solo (CRA) foram ajustados, com o auxílio do software Soil Water Retention Curve - SWRC (Dourado Neto et al., 2001), ao modelo de van Genuchten (1980), Eq. 1.

$$\theta = \theta_s - \theta_r \left[1 + (\alpha h)^n \right]^{-m} + \theta_r \quad \text{Eq.1}$$

em que, θ = umidade do solo, em kg kg^{-1} ou $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; θ_s = umidade do solo na saturação, em kg kg^{-1} ou $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; θ_r = umidade residual do solo, em kg kg^{-1} ou $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; h = tensão da água no solo, em kPa; α , m e n = parâmetros de ajuste, sendo α expresso em kPa^{-1} , e m e n adimensionais. Foi adotada ao modelo a restrição de Mualem (1976), em que $m = 1 - 1/n$.

2.2. Determinação da macroporosidade e da microporosidade

Considerando que o volume de água retido à tensão de 6 kPa corresponde ao volume de microporos do solo (Oliveira, 1968; Kiehl, 1979), foi estimada a umidade do solo nessa tensão.

Para isso, depois de obtidos os parâmetros do modelo de van Genuchten, substituiu-se o valor de 6 kPa por h na equação, sendo possível, assim, obter o conteúdo de água drenável, ou seja, aquela retida nos macroporos, pela diferença entre o volume de água na saturação e o volume de água retido após aplicação da tensão de 6 kPa. Em seguida, obtiveram-se os percentuais de macroporos e de microporos e a razão macroporosidade/microporosidade.

2.3. Determinação do Índice “S”

O Índice “S” foi obtido com base em parâmetros do modelo de van Genuchten pela equação (Eq. 2) proposta por Dexter (2004a).

$$S = -n(\theta_s - \theta_r) \left[\frac{2n-1}{n-1} \right]^{\frac{1}{n-2}} \quad \text{Eq. 2}$$

em que, θ_s = umidade do solo na saturação, em kg kg^{-1} ou $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$; θ_r = umidade residual do solo, em kg kg^{-1} ou $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ e n = parâmetro de ajuste, adimensional.

Os valores de Índice “S” assim obtidos foram denominados de “Sg”, se na CRA os valores de água retida foram considerados em base gravimétrica, e de “Sv”, se tais valores foram considerados em base volumétrica.

Destaca-se que os valores do Índice “S” obtidos pela Eq. 2. são negativos, porém, conforme proposto por Dexter (2004), neste trabalho, seja nos quadros e figuras, bem como na interpretação e discussão, os valores de “S” foram, sempre, considerados em módulo.

A relação entre “Sg” e “Sv” foi investigada por meio de ajuste de equação de regressão aos valores respectivos desses índices.

A distribuição de frequência dos valores de Índice “S” derivados da CRA com umidade em kg kg^{-1} (“Sg”) e $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (“Sv”), para as 48 amostras de solo, foi obtida com o auxílio do software Statistica, versão 8 (StatSoft, 2007), sendo também avaliada a normalidade dos dados pelo teste de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 1965).

2.4. Índice “S” e características físicas dos solos

Conforme sugerido por Dexter (2004a), os valores de Índice “S” obtidos, tanto com base na CRA com umidade em kg kg^{-1} quanto na CRA com umidade em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$, das 48 amostras de solo, foram correlacionados, por Pearson, com algumas características físicas dos solos, tais como densidade do solo, porosidade total,

macroporosidade, relação macroporosidade/microporosidade, argila, silte mais argila, e, também, com o teor de matéria orgânica. Além das correlações, foi investigada a relação entre o Índice “S” e as características físicas de solo, a argila e a matéria orgânica por meio de equações. Ambos os procedimentos foram realizadas com auxílio do software Statistica, versão 8 (StatSoft, 2007).

2.5 – Índice “S” para um maior número de perfis de solo sob eucalipto na região do Vale do Rio Doce, MG

Para as 48 amostras de solos do Quadro 1, o modelo de van Genuchten foi ajustado considerando apenas os valores de água retida às tensões de 10 kPa e de 1500 kPa, além de θ_s estimado como Pt, conforme a Eq.1, e foram obtidos os valores de Índice “S”, com base na Eq. 2, denominados, neste caso, de Índice “S” calculado. Estes valores foram, então, relacionados aos valores de Índice “S” previamente ajustados com base nas curvas contendo as cinco tensões (10 kPa, 30 kPa, 100 kPa, 300 kPa e 1500 kPa) (Índice “S” ajustado) por meio de equação de regressão. Assim, foi possível estimar o Índice “S” ajustado para um número maior de perfis (142) para o quais só havia disponibilidade de dados de água retida às tensões de 10 kPa e de 1500 kPa, além de θ_s estimado como Pt, situação comumente encontrada nos levantamentos de solos.

Para esses 142 perfis de solo, foram calculados a média e o coeficiente de variação dos valores de Índice “S” assim estimados, considerando o horizonte A e o horizonte B (ou C).

2.6. Obtenção dos valores de produtividade atual (IMA7), produtividade potencial (IMAp) e das razões de produtividades (IMA7/IMAp)

A produtividade atual de plantios de eucalipto em localidades da região do Vale do Rio Doce, ou seja, o incremento médio anual de tronco, foi obtida de parcelas do inventário florestal contínuo da CENIBRA, sendo expressa como a produtividade ajustada para a idade referencial de 7 anos (IMA7).

Considerando que os plantios de eucalipto na região do Vale do Rio Doce, MG, estão implantados em sítios florestais que variam quanto às condições climáticas em nível local, foram obtidas simulações de crescimento da cultura do eucalipto utilizando o modelo 3-PG – Physiological Principles in Predicting Growth (Landsberg & Waring, 1997), parametrizado por Borges (2009).

Nessas simulações foram usados dados de radiação fotossinteticamente ativa, de precipitação e de temperatura máxima e mínima do período entre 2001 e 2008, provenientes de estações climatológicas automáticas existentes próximas às áreas. Foi adotado o valor de 1,0 para o modulador de fertilidade do modelo, indicando fertilidade plena. As simulações foram processadas desde a idade de três meses até 84 meses. Os valores obtidos correspondem à produtividade potencial, ou seja, ao incremento médio anual potencial de tronco (IMAp).

A seguir, os valores de IMA, ajustados para a idade de 7 anos (IMA7), provenientes do inventário florestal contínuo (IFC) da empresa foram divididos pelos de IMAp, obtendo-se, assim, os valores de razão de produtividades (IMA7/IMAp).

2.7. Relação do Índice “S” com a produtividade do eucalipto e proposição de faixas de valores de “S” associadas à qualidade física de solos para essa cultura

O IMA7 e o IMA7/IMAp de plantios de eucalipto cultivados nos 142 perfis de solos foram relacionados com os valores de Índice “Sv” (considerados em termos da média aritmética dos valores estimados para os Horizontes A e B (ou C)) pelo método da Linha de Fronteira (LF), conforme Walworth et al. (1986). A análise foi realizada com o auxílio do software Boundary Fit¹, selecionando-se os pontos do contorno superior do gráfico de dispersão entre o IMA7 ou IMA7/IMAp como função da variável “Sv”. Em seguida, converteu-se o maior valor estimado de IMA7, ou de IMA7/IMAp, a 100 % e os demais foram proporcionalizados, obtendo-se, assim, essas respectivas variáveis em termos relativos. Com o auxílio do software CurveExpert v.1.3 (Hyams, 1997), foi feito o ajuste de equações aos pares de dados de IMA7 e “Sv”, ou de IMA7/IMAp e “Sv”, ambos obtidos da LF.

¹ Desenvolvido na UFV pelos professores Júlio César Lima Neves, Roberto Aquino Leite e Victor Hugo Alvarez V. Comunicação pessoal.

Com base nas equações assim obtidas, e considerando como amplamente aceito na literatura, que o índice “S” possa refletir a qualidade física do solo, foram determinadas, conforme abordagem discreta, faixas de valores de “Sv” associadas a classes de qualidade física do solo para a cultura do eucalipto.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Índice “S” e suas relações com características físicas e com matéria orgânica de amostras de solos da região do Vale do Rio Doce - MG

Os valores de água retida nas diferentes tensões avaliadas, bem como os parâmetros do modelo de van Genuchten ajustado para descrever a curva de retenção de água nas 48 amostras de solos da região do Vale do Rio Doce – MG são apresentados no Quadro 2.

Verifica-se aumento da variabilidade entre os valores de água retida em base volumétrica com o aumento da tensão (CV = 13,1; 25,4; 26,9; 27,0; 27,6; 31,5 e 32,1 %), para as tensões de 0 (umidade de saturação), 10, 30, 100, 300 e 1500 kPa e para a tensão correspondente à umidade residual, respectivamente.

O parâmetro α (0,1655 a 115,68, com média de 13,216) foi o que apresentou maior variabilidade (CV = 167,2 %), dentre aqueles do modelo de van Genuchten, para as 48 amostras de solo, enquanto para o parâmetro n (12,296 a 14,212, com média de 12,952) a variabilidade (CV = 3,3 %) foi a menor.

Como na fórmula de cálculo do Índice “S” (Eq. 2., item 2.3.) tem-se a participação de θ_s , θ_r e n , as diferenças existentes entre os valores desses parâmetros do modelo de van Genuchten resultaram em distintos valores de Índice “S”.

Quadro 2. Retenção de umidade em diferentes tensões, parâmetros do modelo de van Genuchten, textura, macroporosidade, microporosidade e Índices “S” calculados a partir da CRA com umidade em kg kg^{-1} (“Sg”) e com umidade em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (“Sv”) de solos sob plantios de eucalipto, na região do Vale do Rio Doce – MG.

Unid, Map,	Hor,	Tensão (kPa)					Parâmetros de van Genuchten					Textura	Mp	μp	“Sg”	“Sv”
		10	30	100	300	1500	Θ_s	Θ_r	n	m	α					
		----- $\Theta (\text{m}^3 \text{m}^{-3})$ -----					----- $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ -----		kPa ⁻¹			----- $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ -----				
LV	A	0,176	0,156	0,149	0,121	0,083	0,706	0,077	1,2835	0,2209	53,9682	Média	0,507	0,199	0,1359	0,1001
LVA	A	0,187	0,177	0,163	0,155	0,109	0,542	0,087	1,3903	0,2807	4,0407	Média	0,324	0,218	0,0803	0,0906
LVA	A	0,254	0,235	0,209	0,197	0,158	0,483	0,105	1,2827	0,2204	12,3223	Média	0,266	0,217	0,0453	0,0600
CX	A1	0,265	0,244	0,230	0,211	0,168	0,551	0,088	1,2860	0,2224	75,1318	Média	0,382	0,169	0,0637	0,0742
CX	A1	0,280	0,264	0,248	0,238	0,180	0,472	0,179	1,3348	0,2508	0,5126	Média	0,102	0,370	0,0392	0,0524
RY	A	0,381	0,361	0,330	0,310	0,256	0,532	0,095	1,2296	0,1867	16,8707	Média	0,286	0,246	0,0494	0,0599
RY	3C2	0,279	0,252	0,233	0,222	0,121	0,493	0,144	1,4143	0,2929	0,1655	Média	0,064	0,429	0,0555	0,0724
RY	3C2	0,360	0,334	0,303	0,272	0,217	0,541	0,200	1,3373	0,2522	0,7027	Média	0,138	0,403	0,0565	0,0613
RY	4C3	0,243	0,225	0,211	0,199	0,166	0,607	0,293	1,2460	0,1974	1,7488	Siltosa	0,140	0,467	0,0422	0,0452
LVA	A	0,282	0,252	0,227	0,214	0,173	0,543	0,143	1,2468	0,1979	5,6600	Argilosa	0,233	0,310	0,0533	0,0577
LVA	A	0,229	0,211	0,198	0,179	0,125	0,502	0,171	1,2811	0,2194	2,6222	Argilosa	0,179	0,323	0,0406	0,0524
LVA	A1	0,273	0,245	0,222	0,207	0,161	0,495	0,133	1,2605	0,2067	5,6820	Argilosa	0,218	0,277	0,0441	0,0543
LVA	A1	0,244	0,229	0,206	0,189	0,148	0,540	0,106	1,3178	0,2411	23,7700	Argilosa	0,344	0,196	0,0654	0,0749
LVA	Bw1	0,260	0,242	0,225	0,213	0,141	0,521	0,098	1,2863	0,2226	4,7037	Argilosa	0,261	0,260	0,0573	0,0678
LA	A	0,191	0,171	0,159	0,147	0,107	0,514	0,123	1,3178	0,2411	7,7037	Argilosa	0,276	0,238	0,0528	0,0674
LA	A	0,166	0,142	0,121	0,110	0,095	0,535	0,156	1,2458	0,1973	11,3661	Argilosa	0,245	0,290	0,0468	0,0545
LA	A	0,366	0,343	0,322	0,310	0,250	0,526	0,117	1,2457	0,1972	3,2682	Argilosa	0,213	0,313	0,0480	0,0588
LA	A	0,192	0,159	0,134	0,119	0,091	0,524	0,091	1,4212	0,2963	6,0758	Argilosa	0,338	0,186	0,0716	0,0908
LA	A1	0,250	0,238	0,221	0,202	0,159	0,445	0,125	1,2815	0,2196	1,1211	Argilosa	0,136	0,309	0,0369	0,0507
LA	A1	0,197	0,179	0,163	0,152	0,109	0,532	0,153	1,3243	0,2449	1,0421	Argilosa	0,174	0,358	0,0537	0,0663
LA	Bw2	0,285	0,258	0,237	0,227	0,178	0,555	0,121	1,2621	0,2077	3,8772	Argilosa	0,245	0,310	0,0571	0,0653
CX	A	0,266	0,249	0,239	0,223	0,159	0,648	0,185	1,2694	0,2122	15,7811	Argilosa	0,327	0,321	0,0811	0,0711
CX	A	0,387	0,370	0,342	0,314	0,227	0,525	0,089	1,2928	0,2265	3,9774	Argilosa	0,264	0,261	0,0597	0,0710
CX	A1	0,398	0,367	0,317	0,281	0,246	0,552	0,147	1,2870	0,2230	3,8345	Argilosa	0,241	0,311	0,0590	0,0650

Mp: Macroporosidade, μp : microporosidade, Sg: Índice “S” calculado com base na CRA com umidade em kg kg^{-1} , Sv: Índice “S” calculado com base na CRA com umidade em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Θ_s : umidade do solo na saturação, Θ_r : umidade residual do solo, α , m e n = parâmetros de ajuste.

Continua...

Quadro 2. (continuação) Retenção de água em diferentes tensões, parâmetros do modelo de van Genuchten, textura, macroporosidade, microporosidade e Índices “S” calculados a partir da CRA com umidade em kg kg^{-1} (“Sg”) e com umidade em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (“Sv”) de solos sob plantios de eucalipto, na região do Vale do Rio Doce - MG.

classe de solo	Hor.	Tensão (kPa)					Parâmetros de van Genuchten					Textura	Mp	μp	“Sg”	“Sv”
		10	30	100	300	1500	Θ_s	Θ_r	n	m	α					
		----- Θ ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) -----					----- $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ -----							----- $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ -----		
CX	Bi	0,337	0,311	0,289	0,267	0,206	0,557	0,169	1,3067	0,2347	3,1553	Argilosa	0,231	0,326	0,0573	0,0653
CX	Bi2	0,408	0,386	0,355	0,340	0,262	0,676	0,169	1,2868	0,2229	17,5538	Argilosa	0,374	0,302	0,0985	0,0814
RY	A	0,204	0,193	0,182	0,167	0,133	0,438	0,157	1,3035	0,2329	0,7457	Argilosa	0,108	0,330	0,0379	0,0469
RY	A	0,299	0,273	0,240	0,229	0,160	0,572	0,165	1,2495	0,1997	4,2434	Argilosa	0,226	0,346	0,0527	0,0592
RY	A	0,271	0,252	0,232	0,214	0,168	0,565	0,230	1,2948	0,2277	1,4561	Argilosa	0,161	0,404	0,0519	0,0548
RY	A	0,235	0,218	0,203	0,191	0,137	0,537	0,244	1,4080	0,2898	0,2626	Argilosa	0,078	0,459	0,0509	0,0601
RY	A1	0,179	0,161	0,147	0,137	0,110	0,518	0,253	1,3148	0,2395	0,7643	Argilosa	0,106	0,412	0,0386	0,0454
LV	A	0,296	0,270	0,253	0,236	0,174	0,629	0,164	1,2928	0,2265	12,0974	Muito argilosa	0,333	0,296	0,0810	0,0757
LV	A	0,217	0,206	0,192	0,177	0,099	0,777	0,153	1,2755	0,2160	62,1282	Muito argilosa	0,502	0,275	0,1707	0,0973
LV	A	0,381	0,347	0,321	0,300	0,239	0,633	0,176	1,2569	0,2044	24,2413	Muito argilosa	0,330	0,303	0,0754	0,0678
LV	Bw1	0,263	0,239	0,217	0,204	0,160	0,670	0,156	1,3165	0,2404	9,5072	Muito argilosa	0,371	0,299	0,1017	0,0884
LV	Bw1	0,218	0,194	0,177	0,163	0,127	0,640	0,169	1,3362	0,2516	6,4164	Muito argilosa	0,333	0,307	0,0908	0,0845
LV	Bw1	0,310	0,299	0,267	0,256	0,169	0,689	0,143	1,2932	0,2267	39,6266	Muito argilosa	0,436	0,253	0,1117	0,0890
LVA	A	0,269	0,241	0,219	0,207	0,122	0,622	0,176	1,2746	0,2155	11,7511	Muito argilosa	0,308	0,314	0,0743	0,0694
LA	A	0,279	0,259	0,233	0,214	0,165	0,718	0,127	1,2755	0,2160	115,6825	Muito argilosa	0,494	0,224	0,1343	0,0922
LA	A	0,154	0,140	0,130	0,122	0,092	0,626	0,161	1,3021	0,2320	7,6422	Muito argilosa	0,319	0,307	0,0809	0,0774
LA	Bw1	0,430	0,408	0,377	0,348	0,278	0,582	0,118	1,2635	0,2086	5,6374	Muito argilosa	0,281	0,301	0,0638	0,0701
CX	A	0,320	0,285	0,242	0,229	0,157	0,563	0,266	1,2806	0,2191	1,6048	Muito argilosa	0,142	0,421	0,0433	0,0469
CX	A	0,391	0,375	0,351	0,330	0,269	0,569	0,203	1,2942	0,2273	2,4608	Muito argilosa	0,201	0,368	0,0562	0,0598
CX	A1	0,232	0,201	0,185	0,165	0,102	0,723	0,143	1,2964	0,2286	28,2936	Muito argilosa	0,453	0,270	0,1469	0,0953
CX	A1	0,295	0,278	0,261	0,243	0,189	0,566	0,232	1,2781	0,2176	2,0456	Muito argilosa	0,169	0,397	0,0462	0,0524
CX	Bi1	0,327	0,297	0,265	0,247	0,192	0,620	0,198	1,2669	0,2107	7,6084	Muito argilosa	0,270	0,350	0,0620	0,0644
RY	A	0,247	0,226	0,207	0,196	0,156	0,591	0,228	1,2992	0,2303	1,2228	Muito argilosa	0,166	0,425	0,0615	0,0600
RY	C1	0,229	0,208	0,187	0,177	0,140	0,523	0,232	1,2606	0,2067	2,1748	Muito argilosa	0,143	0,380	0,0357	0,0436

Mp: Macroporosidade, μp : microporosidade, Sg: Índice “S” calculado com base na CRA com umidade em kg kg^{-1} , Sv: Índice “S” calculado com base na CRA com umidade em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$. Θ_s : umidade do solo na saturação, Θ_r : umidade residual do solo, α , m e n = parâmetros de ajuste.

Dessa forma, os valores de Índice “S” derivados da CRA com umidade em base volumétrica (aqui denominados de “Sv”) variaram entre 0,044 e 0,100 (Quadro 2) com média de 0,067, e com variabilidade média de 22,3 %, como indicado pelo CV de “Sv” (valor não mostrado) entre as amostras de solo.

Os valores de “Sg” variaram de 0,036 a 0,171 entre as 48 amostras de solos analisados (Quadro 2), com média de 0,067. Observa-se que as médias de “Sv” e de “Sg” são iguais, contudo, a amplitude e a variabilidade (CV 45,0 %, dado não mostrado) são maiores para “Sg”. É interessante notar que essa variabilidade é de valor muito próximo ao da variabilidade da microporosidade (μp) (CV = 23,1 %). Já, a variabilidade entre as amostras de solos para “Sg” (CV = 45,0 %) é próxima à variabilidade para a macroporosidade (CV = 43,4 %).

Conforme se vê na Figura 2, “Sv” e “Sg” apresentam distintas distribuições de frequência. Para “Sg” (Figura 2.b), com base no teste de Shapiro-Wilk, rejeita-se a hipótese de nulidade, e, portanto, a distribuição não é normal. Claramente, percebe-se que ela é fortemente assimétrica à esquerda, ou seja, predominam (72,9 %) valores de “Sg” menores do que 0,075. Já para “Sv” (Figura 2.a) a distribuição é praticamente a normal, como indicado pela estatística W ($p = 0,051$), apresentando-se com menor grau de simetria do que a distribuição verificada para “Sg”.

Refletindo essas distintas amplitudes e distribuições de frequência, o relacionamento entre “Sg” e “Sv” seguiu um modelo curvilíneo, como mostrado na Figura 3. A natureza não linear desse relacionamento pode ser explicada pelo fato de que ao se utilizar a umidade em base volumétrica no ajuste da CRA, já se considera, implicitamente, a Ds.

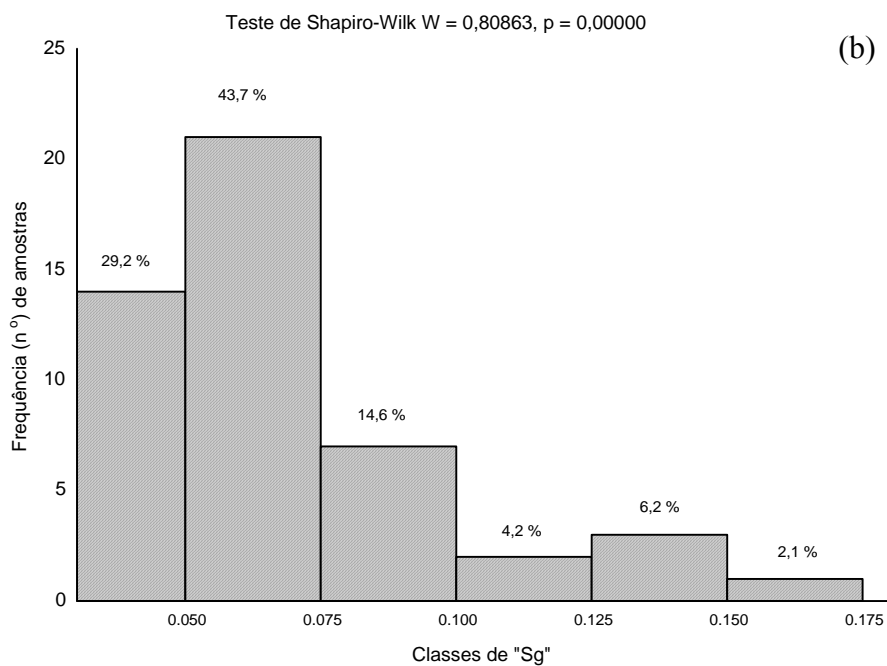
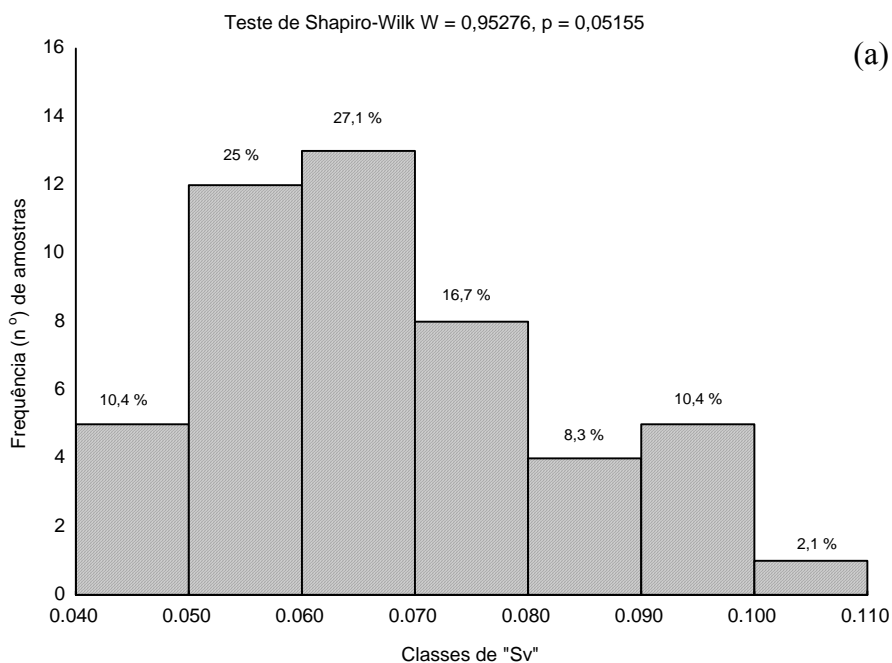


Figura 2: Distribuição de frequência dos valores de Índice “S” estimado a partir da curva de retenção de água (CRA) com unidade em kg kg^{-1} (“Sg”) (a) e estimado a partir da curva de retenção de água (CRA) com unidade em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (“Sv”) (b), de 48 amostras de solos cultivados com eucalipto no Vale do Rio Doce – MG.

Na investigação do relacionamento entre o Índice “S”, tanto “Sv” como “Sg”, e características físicas do solo e teor de matéria orgânica (Quadro 3) verificou-se que as correlações, por Pearson, do Índice “S” com a Ds, a Pt, a Mp, a μ_p , a Mp/μ_p e a MO foram todas significativas ($p < 0,001$), sendo negativa para a Ds e μ_p e positivas para as demais características; além disso, apenas para Ds e Pt essas correlações foram mais estreitas com “Sg” de que com “Sv”. Já para argila ($p < 0,01$) e silte mais argila ($p < 0,1$) as correlações só foram significativas com “Sg”.

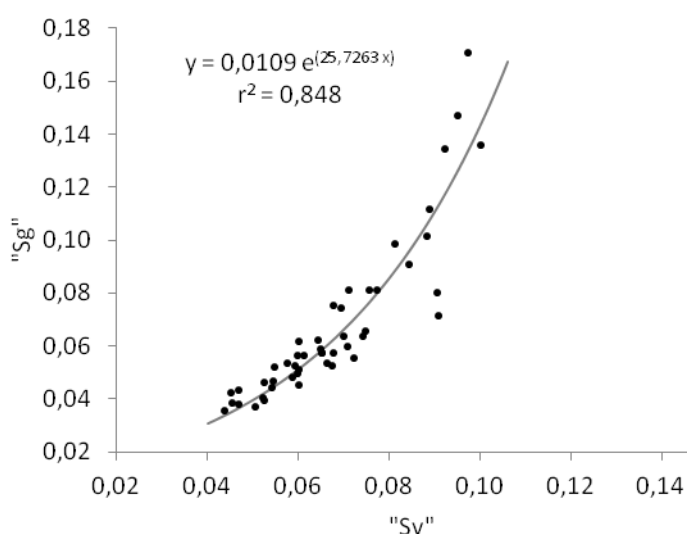


Figura 3. Relação entre o Índice “S” obtido a partir do ajuste da CRA com unidade em kg kg^{-1} (“Sg”) em função do Índice “S” obtido a partir do ajuste da CRA com unidade em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (“Sv”), para solos sob plantios de eucalipto, na região do Vale do Rio Doce – MG.

Esses relacionamentos entre o Índice “S”, tanto para “Sv” como para “Sg”, e características do solo são melhor visualizados nas Figuras 4 e 5, respectivamente. Numa comparação entre os relacionamentos dessas duas figuras, vê-se que os relacionamentos são lineares para “Sv” (exceto para argila, que não foi significativo) e curvilíneos para “Sg” (exceto para argila e matéria orgânica, que são lineares). Verifica-se assim que para as características físicas que dependem da Ds, além da própria Ds, é que existe mudança do caráter linear (“Sv”) para o curvilíneo (“Sg”) no relacionamento com o Índice “S”.

Quadro 3. Coeficientes de correlação linear simples entre o Índice “S”, calculado a partir da curva de retenção de água (CRA) com umidade em kg kg^{-1} (“Sg”) e em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ (“Sv”) e características físicas de solos do Vale do Rio Doce – MG.

Característica	“Sg”	“Sv”
	----- n = 48 -----	
Ds	- 0,89 ^{***}	- 0,67 ^{***}
Pt	0,89 ^{***}	0,70 ^{***}
Mp	0,86 ^{***}	0,86 ^{***}
μp	- 0,42 ^{**}	- 0,61 ^{***}
Mp/ μp	0,74 ^{***}	0,82 ^{***}
Arg	0,39 ^{**}	0,20 ^{ns}
S+A	0,28 ^o	- 0,01 ^{ns}
MO	0,65 ^{***}	0,48 ^{***}

Ds: densidade do solo, Pt: porosidade total, Mp: macroporosidade e Mp/ μp : relação macroporosidade/micro porosidade; Arg: teor de argila, S+A: Silte mais argila, MO: teor de matéria orgânica, n: número de amostras avaliadas; ^{***}, ^{**}, ^o, ^{ns}: significativo a 0,1 %, 1 %, 10 % e não significativo respectivamente.

Fica claro, pela observação e análise das Figuras 4 e 5 que maiores valores de Ds estão associados à menores valores de “S” e que menores valores de Pt, de Mp e de Mp/ μp também estão associados a menores valores de “S”. De fato, as correlações entre Ds e Pt, Mp, Mp/ μp foram, todas, negativas e significativas a 0,1 % de probabilidade.

Quanto à correlação negativa entre o Índice “S” e Ds, verificada neste trabalho (Quadro 3), resultados semelhantes foram encontrados por Dexter (2004a) em solos da Espanha, por Andrade & Stone (2009) em solos do Cerrado brasileiro, e por Streck et al. (2008) em solos do Sul do Brasil. À medida em que os solos se tornam compactados, a curva de retenção de umidade começa a apresentar mudanças na sua forma, de modo que há redução na inclinação da curva no ponto de inflexão (Hillel, 1980) e, conseqüentemente, há redução no valor de “S”. Tal fato é atribuído à diminuição na relação Mp/ μp , o que causa a diminuição dos teores de água em tensões mais baixas.

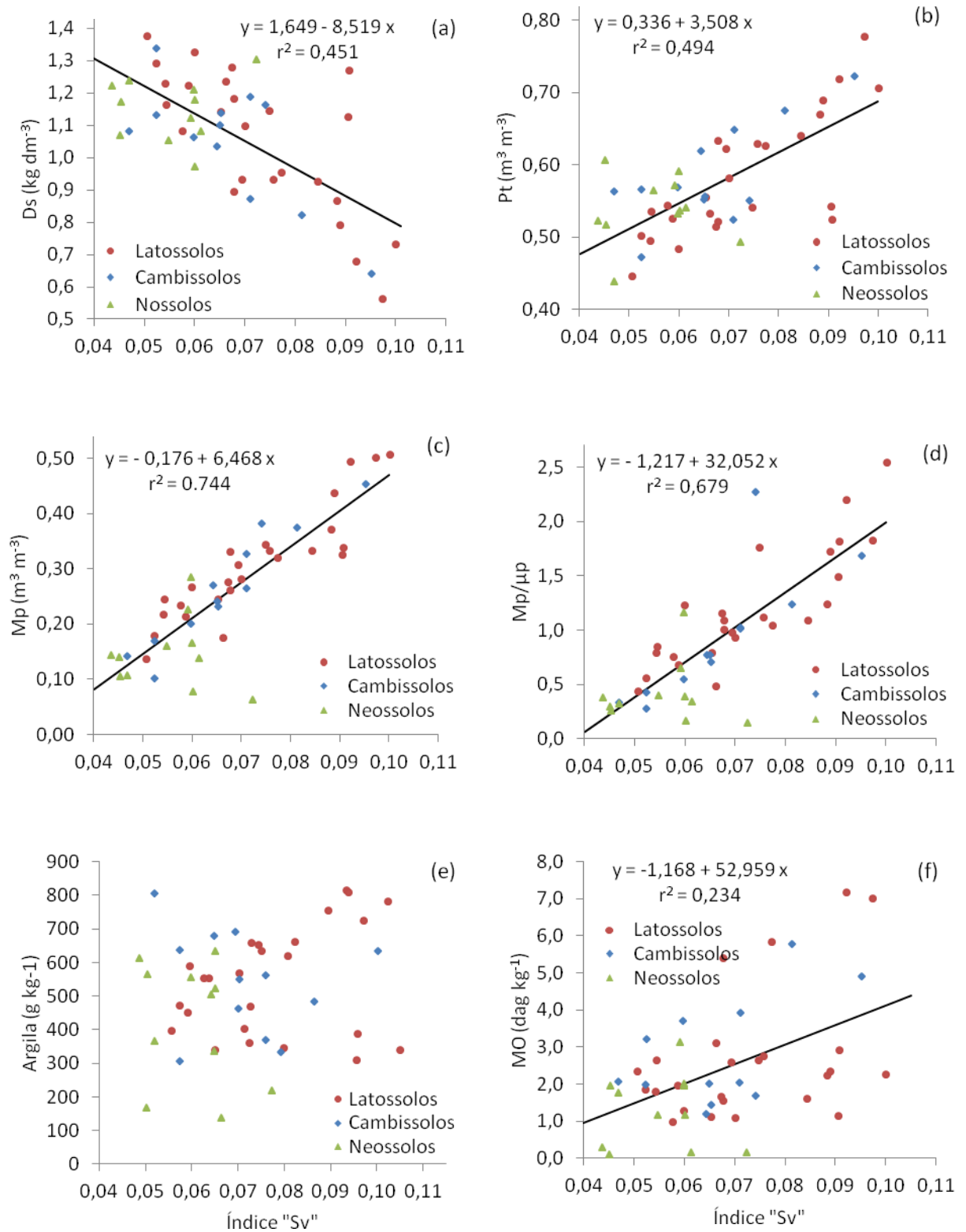


Figura 4. Relação do índice "S", calculado a partir da curva de retenção de água (CRA) com umidade em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ("Sv"), com a densidade do solo (a), a porosidade total (b), o volume de macroporos (c), a relação macroporos/microporos (d), o teor de argila (e) e o teor de matéria orgânica (f), em solos do Vale do Rio Doce – MG. Exceto para argila (ns), todas as demais equações são significativas a 0,1 % de probabilidade.

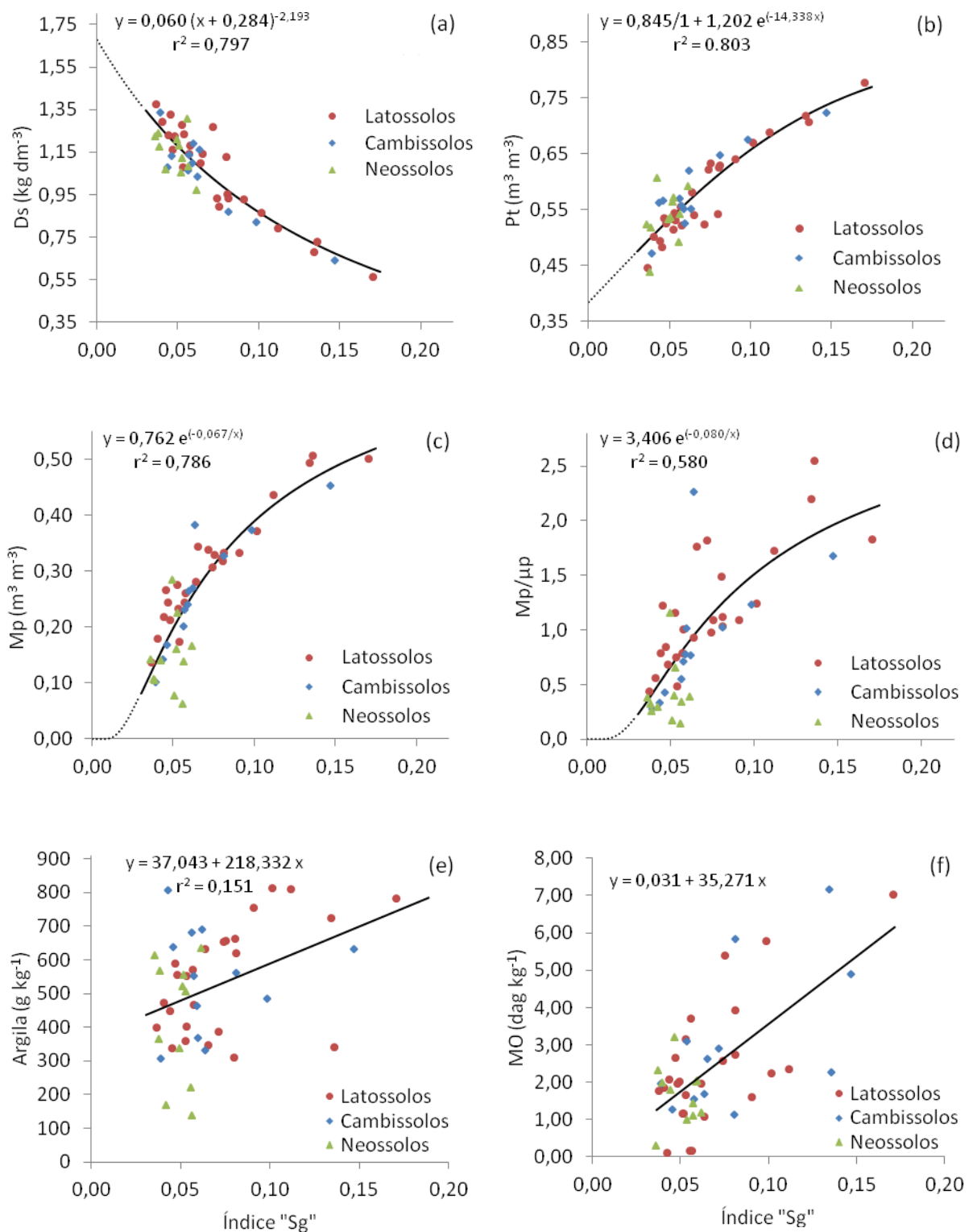


Figura 5. Relação do índice “S”, calculado a partir da curva de retenção de água (CRA) com umidade em kg kg^{-1} (“Sg”), com a densidade do solo (a), a porosidade total (b), o volume de macroporos (c), a relação macroporos/microporos (d), o teor de argila (e) e o teor de matéria

orgânica (f), em solos do Vale do Rio Doce – MG. Todas as equações são significativas a 0,1 % de probabilidade, exceto para argila, que é significativa a 1 % de probabilidade.

Neste trabalho, a correlação menos estreita verificada entre “Sv” e Ds comparativamente à verificada entre “Sg” e Ds pode ser atribuída ao fato de que ao se utilizar a umidade em base volumétrica no ajuste da CRA, já se considera, implicitamente, a Ds, como já mencionado neste trabalho

A correlação positiva e significativa entre “Sg” e teores de argila (Quadro 3) encontrada no presente estudo difere de resultados verificados por Dexter (2004a) e por Streck et al. (2008). Dexter (2004a) observou ligeira tendência ao decréscimo nos valores de S, derivado da CRA em base gravimétrica, com o aumento do teor de argila quando avaliou esse comportamento em 355 diferentes tipos de solos da Suécia. Já Streck et al. (2008), ao testarem a sensibilidade do Índice “S”, derivado de CRA também em base gravimétrica, em relação à algumas características de um Nitossolo e de seis diferentes Latossolos do Sul do Brasil, não encontraram correlação significativa entre o Índice “S” e os teores de argila. A ausência de correlação significativa entre “Sv” e argila, verificada neste trabalho, pode também ser explicada pelo fato de que correlação entre argila e Ds foi negativa e significativa a 0,1 % de probabilidade, uma vez que “Sv” já incorpora o efeito de Ds.

A correlação positiva e significativa a 0,1 % de probabilidade entre os Índices “S” (“Sv” e “Sg”) e MO como verificado neste trabalho, se alinha ao também verificado por Dexter (2004a) e Chakraborty et al. (2010), cabendo notar que neste trabalho esse relacionamento foi mais estreito para “Sg”, o que pode ser explicado também pela correlação negativa e significativa existente entre Ds e MO ($r = - 0,635$, $p < 0,001$). Esses resultados evidenciam o acerto da sugestão de Dexter (2004a) quanto ao uso de funções de pedotransferência para visualizar de forma minuciosa os relacionamentos entre o Índice “S” e outras características do solo, e ressalta a importância de que, para isso, algumas características como matéria orgânica e densidade do solo estejam bem especificadas.

O Índice “S” representa a estrutura do solo, a qual governa algumas características intrínsecas aos solos, tais como densidade do solo, porosidade total, macroporosidade e microporosidade, dentre outras. Este Índice tem sido considerado como um avanço na quantificação da qualidade estrutural do solo a partir das curvas de

retenção de água do solo (Silva et al., 2010), tendo em vista que de modo geral, segundo esses autores, a maioria dos trabalhos que quantificam a distribuição de poros com base nas curvas de retenção de água se limitam a fornecer valores de macro e microporos.

A distribuição de poros por tamanho, reflexo da estrutura do solo, deve ser observada no sentido de que a condição de qualidade física do solo estabelece o formato da CRA. Segundo Silva et al. (2010), maiores valores de Índice “S” são indicativos de melhor qualidade física, pois são solos estruturados e com poros de diferentes tamanhos, Já pequenos valores de Índice “S” indicam condição de solo desestruturado, com alta homogeneidade estrutural.

Desse modo, o Índice “S” pode refletir processos associados ao sistema poroso do solo, como por exemplo, os fluxos de água e ar no solo bem como a condição física do solo para o crescimento radicular das plantas, e, assim, pode se relacionar às condições para o crescimento e desenvolvimento das plantas e a sustentabilidade do ecossistema.

Nas 48 amostras de solo avaliadas, os valores de “Sg” foram iguais ou maiores que 0,036 e os de “Sv” iguais ou maiores que 0,044, superiores, assim, ao valor de 0,035, proposto por Dexter (2004a) como limite entre solos com má e boa qualidade física. É importante mencionar que o Índice “S” necessita ainda de ajustes referentes aos limites e valores críticos para as condições de solos e culturas do Brasil.

Nesse sentido, e visando um melhor aproveitamento dos dados relativos a retenção de água constantes dos levantamentos de solos (que usualmente apresentam os valores de umidade de saturação, ou seja, da Pt, e da água retida a 10 e a 1500 kPa, procedeu-se, para as 48 amostras de solos aqui avaliada à obtenção de uma equação que descreve o relacionamento entre o Índice “S” constante do quadro 2 em função do valor de Índice “S” obtido das CRAs ajustadas, também pelo modelo de van Genuchten, apenas aos dados de umidade de saturação e água retida às tensões de 10 e 1500 kPa. A equação obtida, de natureza curvilínea (modelo quadrático recíproco, Figura 6), é válida para valores de Índice “S” calculados de até 0,221.

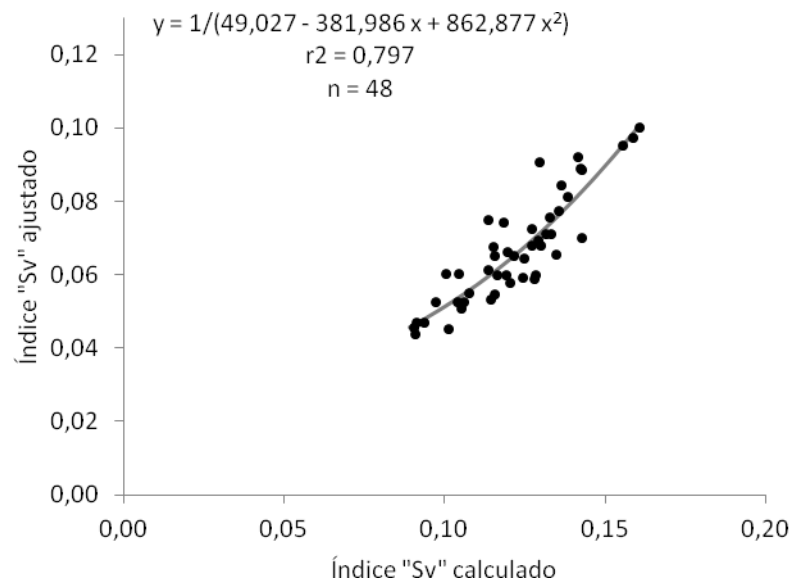


Figura 6. Equação para o Índice “S” derivado da CRA ajustada conforme o modelo de van Genuchten, utilizando-se a água retida, em base volumétrica, às tensões de 10, 30, 100, 300 e 1500 kPa, além da umidade de saturação (θ_s) (Índice “S” ajustado), em função do Índice “S” derivado de CRA ajustada apenas com θ_s , e a água retida a 10 e 1500 kPa (Índice “S” calculado), para 48 amostras de solos da região do Vale do Rio Doce – MG.

3.2. Índice “S” e produtividade de eucalipto, na região do Vale do Rio Doce - MG

Os valores estimados de Índice “S”, tanto “Sg” como “Sv”, para o horizonte A e o horizonte B (ou C) de 142 perfis de solo cultivados com eucalipto na região do Vale do Rio Doce – MG são apresentados no Quadro 4.

Observa-se uma maior amplitude desses valores de Índice “S” quando comparados aos das 48 amostras constantes do item 3.1, Quadro 2. Assim, considerando todas as classes de solo em conjunto, no horizonte A os valores de “Sg” variaram de 0,0193 a 0,1728, com média de 0,0612 e CV de 48,5 %, enquanto os de “Sv” variaram de 0,0265 a 0,1477, com média de 0,0631 e CV de 40,6 % (Quadro 5). No horizonte B

(ou C) “Sg” variou de 0,0191 a 0,125, com média de 0,0539 e CV de 39,9 %; já “Sv” variou de 0,0256 a 0,1340, com média de 0,0584 e CV de 36,6 % (Quadro 5).

Quadro 4. Valores de Índice “S” de perfis de solos (horizontes A, B ou C), no Vale do Rio Doce – MG e de produtividades atuais (IMA7), potenciais (IMAp) e razão de produtividades (IMA7/IMAp) de plantios de eucalipto neles cultivados.

Região	Classe de solo	"Sg" A	"Sg" B ou C	"Sv" A	"Sv" B ou C	----- m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹ -----		
						IMA7	IMAp	IMA7/IMAp
Belo Oriente	PVA	0,1083	0,0288	0,1066	0,0336	57,15	61,96	0,84
Belo Oriente	CX	0,0576	0,0531	0,0441	0,0556	55,04	61,96	0,81
Belo Oriente	LV	0,1368	0,0544	0,1008	0,0624	32,87	61,96	0,48
Belo Oriente	LVA	0,1314	0,0514	0,0923	0,0585	39,47	61,96	0,58
Belo Oriente	LVA	0,0378	0,0302	0,0399	0,0358	53,55	61,96	0,79
Belo Oriente	LVA	0,0733	0,0586	0,0735	0,0693	28,10	61,96	0,41
Belo Oriente	CX	0,0540	0,0431	0,0628	0,0577	33,40	61,96	0,49
Belo Oriente	CX	0,0594	0,0630	0,0615	0,0660	33,13	61,96	0,49
Belo Oriente	CX	0,1471	0,0739	0,0954	0,0726	43,74	61,96	0,64
Belo Oriente	LVA	0,0906	0,0627	0,0711	0,0659	35,55	61,96	0,52
Belo Oriente	LA	0,0799	0,0739	0,0765	0,0747	43,59	61,96	0,64
Belo Oriente	LVA	0,0632	0,0475	0,0713	0,0585	30,01	61,96	0,44
Belo Oriente	LVA	0,0408	0,0423	0,0540	0,0519	33,96	61,96	0,50
Belo Oriente	LVA	0,0665	0,0580	0,0685	0,0694	36,22	61,96	0,53
Belo Oriente	LVA	0,0521	0,0427	0,0597	0,0567	26,18	61,96	0,38
Belo Oriente	LA	0,1188	0,1096	0,0816	0,0874	33,32	61,96	0,49
Belo Oriente	CX	0,0631	0,0306	0,0621	0,0370	39,69	61,96	0,58
Belo Oriente	LVA	0,0425	0,0194	0,0434	0,0264	21,06	61,96	0,31
Belo Oriente	LA	0,0473	0,0526	0,0600	0,0665	26,27	61,96	0,39
Belo Oriente	LA	0,0591	0,0340	0,0515	0,0368	48,73	61,96	0,72
Belo Oriente	LA	0,0517	0,0565	0,0639	0,0659	37,35	61,96	0,55
Belo Oriente	CX	0,0450	0,0310	0,0492	0,0417	18,22	61,96	0,27
Belo Oriente	LA	0,0408	0,0653	0,0507	0,0672	30,58	61,96	0,45
Belo Oriente	RY	0,0433	0,0368	0,0563	0,0497	29,63	61,96	0,43
Belo Oriente	RY	0,0395	0,0329	0,0464	0,0421	29,10	61,96	0,43
Belo Oriente	RY	0,0379	0,0434	0,0469	0,0445	55,33	61,96	0,81
Belo Oriente	CX	0,0750	0,0535	0,0747	0,0591	48,62	61,96	0,71
Belo Oriente	RY	0,0501	0,0277	0,0621	0,0401	40,92	61,96	0,60
Belo Oriente	LVA	0,0579	0,0380	0,0602	0,0465	35,14	61,96	0,52
Belo Oriente	LA	0,0582	0,0630	0,0635	0,0678	30,72	61,96	0,45
Belo Oriente	LVA	0,0432	0,0746	0,0482	0,0655	39,34	61,96	0,58
Belo Oriente	LVA	0,0561	0,0808	0,0513	0,0686	32,92	61,96	0,48
Belo Oriente	CX	0,0290	0,0248	0,0348	0,0318	35,37	61,96	0,52
Belo Oriente	LV	0,0417	0,0467	0,0444	0,0528	32,09	61,96	0,47
Belo Oriente	CX	0,0425	0,0504	0,0399	0,0474	39,13	61,96	0,57
Belo Oriente	LA	0,0636	0,0542	0,0584	0,0549	36,01	61,96	0,53
Belo Oriente	LV	0,0547	0,0500	0,0606	0,0530	37,05	61,96	0,54
Belo Oriente	LA	0,0450	0,0421	0,0537	0,0493	38,88	61,96	0,57
Belo Oriente	LVA	0,0492	0,0644	0,0537	0,0630	44,25	61,96	0,65
Belo Oriente	LA	0,0410	0,0538	0,0471	0,0583	42,64	61,96	0,63

“Sg”A: Índice “S”, calculado com umidade em kg kg⁻¹, do horizonte A; “Sg” B ou C: Índice “S”, calculado com umidade em kg kg⁻¹, do horizonte B ou C; “Sv”A: Índice “S”, calculado com umidade em m³ m⁻³, do horizonte A; “Sv” B ou C: Índice “S”, calculado com umidade em m³ m⁻³, do horizonte B ou C; CV:

coeficiente de variação; N: número de observações; LV: Latossolo Vermelho; LVA: Latossolo Vermelho Amarelo; LA: Latossolo Amarelo; CX: Cambissolo Háplico; RY: Neossolo Flúvico.

Continua...

Quadro 4. (continuação) Valores de Índice “S” de perfis de solos (horizontes A, B ou C), no Vale do Rio Doce – MG e de produtividades atuais (IMA7), potenciais (IMAp) e razão de produtividades (IMA7/IMAp) de plantios de eucalipto neles cultivados.

Região	Classe de solo	"Sg" A	"Sg" B ou C	"Sv" A	"Sv" B ou C	IMA7	IMAp	IMA7/IMAp
						----- m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹ -----		
Belo Oriente	CX	0,0372	0,0299	0,0460	0,0362	33,35	61,96	0,49
Belo Oriente	LVA	0,0482	0,0650	0,0506	0,0623	29,38	61,96	0,43
Belo Oriente	CX	0,0452	0,0635	0,0530	0,0632	34,17	61,96	0,50
Belo Oriente	LV	0,0632	0,0678	0,0584	0,0638	37,15	61,96	0,55
Belo Oriente	LV	0,0655	0,0664	0,0599	0,0630	19,15	61,96	0,28
Belo Oriente	LVA	0,0440	0,0496	0,0489	0,0527	33,85	61,96	0,50
Belo Oriente	LVA	0,0416	0,0489	0,0537	0,0595	33,85	61,96	0,50
Belo Oriente	CX	0,0314	0,0391	0,0447	0,0469	40,20	61,96	0,59
Belo Oriente	LA	0,0475	0,0611	0,0607	0,0721	37,89	61,96	0,56
Belo Oriente	LA	0,0570	0,0636	0,0642	0,0715	41,61	61,96	0,61
Belo Oriente	LA	0,0525	0,0569	0,0611	0,0644	34,33	61,96	0,50
Belo Oriente	PVA	0,1216	0,0388	0,1474	0,0425	40,77	61,96	0,60
Belo Oriente	LA	0,0569	0,0633	0,0618	0,0668	41,97	61,96	0,62
Belo Oriente	CX	0,0809	0,0583	0,0654	0,0599	20,62	61,96	0,30
Belo Oriente	RY	0,0363	0,0550	0,0490	0,0612	34,04	61,96	0,50
Belo Oriente	LA	0,0495	0,0652	0,0522	0,0627	48,19	61,96	0,71
Belo Oriente	RY	0,0467	0,0586	0,0491	0,0609	39,92	61,96	0,59
Belo Oriente	CX	0,0489	0,0824	0,0602	0,1236	36,32	61,96	0,53
Belo Oriente	LV	0,0635	0,0591	0,0602	0,0577	36,12	61,96	0,53
Belo Oriente	LVA	0,0553	0,0422	0,0590	0,0490	26,83	61,96	0,39
Belo Oriente	CX	0,0444	0,0724	0,0480	0,0712	29,93	61,96	0,44
Belo Oriente	RY	0,0582	0,0394	0,0705	0,0488	29,20	61,96	0,43
Belo Oriente	LV	0,0637	0,0499	0,0673	0,0527	32,36	61,96	0,47
Belo Oriente	RY	0,0542	0,0416	0,0629	0,0512	40,44	61,96	0,59
Guanhães	LV	0,1150	0,0338	0,1169	0,0350	48,01	60,70	0,72
Guanhães	CX	0,0382	0,0951	0,0399	0,1066	50,90	60,70	0,76
Guanhães	LV	0,0958	0,0402	0,0810	0,0398	55,09	60,70	0,83
Guanhães	RY	0,0600	0,0748	0,0673	0,0710	33,00	60,70	0,49
Guanhães	LV	0,0851	0,0708	0,0774	0,0710	33,00	60,70	0,49
Guanhães	CX	0,1501	0,0440	0,1468	0,0525	21,14	60,70	0,32
Guanhães	CX	0,1152	0,0303	0,1266	0,0316	38,64	60,70	0,58
Guanhães	LV	0,1093	0,0483	0,1098	0,0499	41,71	60,70	0,62
Guanhães	LVA	0,0471	0,0539	0,0512	0,0597	41,18	60,70	0,62
Guanhães	LV	0,0639	0,0626	0,0793	0,0725	52,76	60,70	0,79
Guanhães	LV	0,0845	0,0447	0,0731	0,0516	49,04	60,70	0,73
Guanhães	LV	0,0524	0,0334	0,0398	0,0377	51,71	60,70	0,77
Guanhães	LVA	0,1372	0,0374	0,1472	0,0383	32,27	60,70	0,48
Guanhães	LV	0,0556	0,0483	0,0570	0,0552	45,64	60,70	0,68
Guanhães	LA	0,0573	0,0753	0,0701	0,0828	53,58	60,70	0,80
Guanhães	LV	0,0793	0,0812	0,0741	0,0750	50,02	60,70	0,75

“Sg”A: Índice “S”, calculado com umidade em kg kg⁻¹, do horizonte A; “Sg” B ou C: Índice “S”, calculado com umidade em kg kg⁻¹, do horizonte B ou C; “Sv”A: Índice “S”, calculado com umidade em m³ m⁻³, do

horizonte A; "Sv" B ou C: Índice "S", calculado com umidade em $m^3 m^{-3}$, do horizonte B ou C; CV: coeficiente de variação; N: número de observações; LV: Latossolo Vermelho; LVA: Latossolo Vermelho Amarelo; LA: Latossolo Amarelo; CX: Cambissolo Háplico; RY: Neossolo Flúvico.

Continua...

Quadro 4. (continuação) Valores de Índice "S" de perfis de solos (horizontes A, B ou C), no Vale do Rio Doce – MG e de produtividades atuais (IMA7), potenciais (IMAp) e razão de produtividades (IMA7/IMAp) de plantios de eucalipto neles cultivados.

Região	Classe de solo	"Sg" A	"Sg" B ou C	"Sv" A	"Sv" B ou C	----- $m^3 ha^{-1} ano^{-1}$ -----		IMA7/IMAp
						IMA7	IMAp	
Guanhães	LV	0,1018	0,0515	0,0738	0,0451	47,00	60,70	0,70
Guanhães	CX	0,1234	0,1250	0,1210	0,1340	43,85	60,70	0,66
Guanhães	LV	0,0644	0,0440	0,0563	0,0426	46,17	60,70	0,69
Guanhães	LV	0,0533	0,0417	0,0452	0,0406	55,50	60,70	0,83
Guanhães	CX	0,0329	0,0234	0,0352	0,0272	63,03	60,70	0,94
Guanhães	LA	0,0608	0,0601	0,0585	0,0601	50,36	60,70	0,75
Guanhães	LVA	0,0738	0,0335	0,0914	0,0408	51,31	60,70	0,77
Guanhães	CX	0,0772	0,0684	0,0645	0,0654	46,87	60,70	0,70
Guanhães	LV	0,1122	0,0826	0,0847	0,0769	35,63	60,70	0,53
Guanhães	CX	0,0848	0,0588	0,0743	0,0616	62,22	60,70	0,93
Guanhães	LV	0,1119	0,0923	0,0741	0,0705	32,96	60,70	0,49
Guanhães	LV	0,0553	0,0315	0,0527	0,0379	46,32	60,70	0,69
Guanhães	CX	0,0579	0,0682	0,0616	0,0678	41,82	60,70	0,63
Guanhães	LVA	0,0521	0,1087	0,0530	0,1310	38,07	60,70	0,57
Guanhães	LVA	0,0485	0,1152	0,0448	0,1124	53,63	60,70	0,80
Guanhães	LV	0,1728	0,0951	0,0986	0,0827	39,14	60,70	0,59
Guanhães	LVA	0,0415	0,0346	0,0364	0,0303	53,45	60,70	0,80
Guanhães	LV	0,0795	0,1036	0,0715	0,0825	33,17	60,70	0,50
Guanhães	CX	0,0757	0,0952	0,0763	0,0786	41,07	60,70	0,62
Guanhães	CX	0,0279	0,0357	0,0286	0,0369	36,38	60,70	0,54
Guanhães	LVA	0,0357	0,0299	0,0357	0,0332	59,20	60,70	0,89
Ipaba	CX	0,0984	0,0204	0,1254	0,0275	45,40	61,96	0,67
Ipaba	LA	0,1291	0,0971	0,1477	0,1082	45,90	61,96	0,67
Ipaba	LA	0,0275	0,0365	0,0330	0,0402	45,90	61,96	0,67
Ipaba	LVA	0,0371	0,0415	0,0396	0,0432	36,32	61,96	0,53
Ipaba	RY	0,0251	0,0191	0,0284	0,0256	32,46	61,96	0,48
Ipaba	RY	0,0222	0,0228	0,0290	0,0302	43,30	61,96	0,64
Ipaba	CX	0,0233	0,0204	0,0305	0,0301	43,30	61,96	0,64
Ipaba	PVA	0,0312	0,0333	0,0355	0,0390	41,07	61,96	0,60
Ipaba	LVA	0,0310	0,0254	0,0368	0,0306	41,07	61,96	0,60
Ipaba	CX	0,1054	0,0974	0,1440	0,1323	44,77	61,96	0,66
Ipaba	LA	0,0379	0,0871	0,0485	0,0836	30,63	61,96	0,45
Ipaba	RY	0,0858	0,1026	0,1213	0,1256	29,16	61,96	0,43
Ipaba	RY	0,0453	0,0534	0,0559	0,0696	30,16	61,96	0,44
Ipaba	LVA	0,0761	0,0689	0,0711	0,0671	43,62	61,96	0,64
Ipaba	RY	0,0528	0,0487	0,0558	0,0522	41,41	61,96	0,61
Ipaba	RY	0,0650	0,0549	0,0635	0,0596	49,56	61,96	0,73
Ipaba	CX	0,0464	0,0560	0,0495	0,0581	43,30	61,96	0,64
Ipaba	LA	0,0193	0,0574	0,0265	0,0586	34,93	61,96	0,51
Ipaba	RY	0,0697	0,0207	0,0799	0,0272	20,92	61,96	0,31

"Sg"A: Índice "S", calculado com umidade em $kg kg^{-1}$, do horizonte A; "Sg" B ou C: Índice "S", calculado com umidade em $kg kg^{-1}$, do horizonte B ou C; "Sv"A: Índice "S", calculado com umidade em $m^3 m^{-3}$, do horizonte A; "Sv" B ou C: Índice "S", calculado com umidade em $m^3 m^{-3}$, do horizonte B ou C; CV:

coeficiente de variação; N: número de observações; LV: Latossolo Vermelho; LVA: Latossolo Vermelho Amarelo; LA: Latossolo Amarelo; CX: Cambissolo Háplico; RY: Neossolo Flúvico.

Continua...

Quadro 4. (continuação) Valores de Índice “S” de perfis de solos (horizontes A, B ou C), no Vale do Rio Doce – MG e de produtividades atuais (IMA7), potenciais (IMAp) e razão de produtividades (IMA7/IMAp) de plantios de eucalipto neles cultivados.

Região	Classe de solo	"Sg" A	"Sg" B ou C	"Sv" A	"Sv" B ou C	IMA7	IMAp	IMA7/IMAp
						---- m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹ ----		
Ipaba	RY	0,0274	0,0389	0,0386	0,0464	39,51	61,96	0,58
Ipaba	LVA	0,0389	0,0412	0,0410	0,0454	38,75	61,96	0,57
Ipaba	RY	0,0289	0,0384	0,0402	0,0544	44,39	61,96	0,65
Ipaba	RY	0,0444	0,0649	0,0627	0,0895	36,13	61,96	0,53
Ipaba	CX	0,0229	0,0325	0,0287	0,0381	27,57	61,96	0,40
Ipaba	LVA	0,0284	0,0441	0,0341	0,0492	36,86	61,96	0,54
Ipaba	RY	0,0204	0,0211	0,0289	0,0266	45,66	61,96	0,67
Ipaba	LVA	0,0284	0,0501	0,0344	0,0498	40,17	61,96	0,59
Ipaba	RY	0,0436	0,0381	0,0516	0,0466	36,38	61,96	0,53
Ipaba	RY	0,0552	0,0377	0,0617	0,0448	40,16	61,96	0,59
Ipaba	LVA	0,0596	0,0663	0,0645	0,0672	35,16	61,96	0,52
Ipaba	LA	0,0474	0,0459	0,0614	0,0584	32,66	61,96	0,48
Nova Era	CX	0,0485	0,0650	0,0550	0,0675	55,37	64,73	0,78
Nova Era	LA	0,0573	0,0662	0,0631	0,0757	55,37	64,73	0,78
Nova Era	CX	0,0593	0,0535	0,0653	0,0609	45,78	64,73	0,64
Nova Era	CX	0,0614	0,0629	0,0731	0,0715	58,31	64,73	0,82
Nova Era	LA	0,0395	0,0478	0,0543	0,0564	51,55	64,73	0,72
Nova Era	CX	0,0662	0,0369	0,0656	0,0432	53,75	64,73	0,75
Nova Era	LV	0,0613	0,0715	0,0645	0,0745	45,43	64,73	0,64
Nova Era	LVA	0,0478	0,0523	0,0588	0,0575	17,26	64,73	0,24
Nova Era	CX	0,0356	0,0386	0,0478	0,0473	47,72	64,73	0,67
Nova Era	CX	0,0373	0,0459	0,0498	0,0534	43,83	64,73	0,62

“Sg”A: Índice “S”, calculado com umidade em kg kg⁻¹, do horizonte A; “Sg” B ou C: Índice “S”, calculado com umidade em kg kg⁻¹, do horizonte B ou C; “Sv”A: Índice “S”, calculado com umidade em m³ m⁻³, do horizonte A; “Sv” B ou C: Índice “S”, calculado com umidade em m³ m⁻³, do horizonte B ou C; CV: coeficiente de variação; N: número de observações; LV: Latossolo Vermelho; LVA: Latossolo Vermelho Amarelo; LA: Latossolo Amarelo; CX: Cambissolo Háplico; RY: Neossolo Flúvico.

Esses resultados indicam maior amplitude e maior variabilidade dos valores para “Sg” comparativamente a “Sv”. Indicam também que os valores de “Sg” e de “Sv” e as respectivas variabilidades foram maiores no horizonte A do que no B (ou C). Esses maiores valores de “Sg” e “Sv” no horizonte A podem ser explicados principalmente pelos maiores teores de matéria orgânica no horizonte A (média de 2,94 dag kg⁻¹) do que no B (ou C) (média de 0,94 dag kg⁻¹), haja vista a correlação positiva entre MO e os Índices “S”, já mostrada no Quadro 3 para 48 amostras de solo da região.

Como já discutido no item 3.1, a menor variabilidade de “Sg” comparativamente à de “Sv” entre os solos é consequência de a Ds já ser implicitamente considerada nos

valores de água retida utilizados para obtenção da CRA, e, assim, conseqüentemente,
nos valores de “SV”.

Quadro 5. Valores médios de Índice “S” de perfis de diferentes classes de solos (horizontes A, B ou C), e de produtividades atuais (IMA7), potenciais (IMAp) e razão de produtividades (IMA7/IMAp) de plantios de eucalipto neles cultivados, no Vale do Rio Doce – MG.

Região	Classe de solo	“Sg” A		“Sg” B ou C		“Sv” A		“Sv” B ou C		IMA7	IMA7	IMAp	IMA7/IMAp	N
		Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	CV	Média	Média	
			%		%		%		%	m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹	%	m ³ ha ⁻¹ ano ⁻¹		
Belo Oriente	LV	0,0699	43,9	0,0563	14,8	0,0645	27	0,0579	8,9	32,4	19,3	62,0	0,475	7
	LVA	0,0585	39,7	0,0515	30,3	0,0588	22,3	0,0564	21,1	34,1	22,1	62,0	0,500	17
	LA	0,0579	33,7	0,0610	27,3	0,0604	15,4	0,0644	18,1	38,1	17,0	62,0	0,560	15
	CX	0,0574	50,2	0,0513	34,9	0,0561	27,4	0,0580	38,3	36,1	26,1	62,0	0,529	15
	RY	0,0458	17,4	0,0419	25,0	0,0554	16,2	0,0498	15,9	37,3	23,9	62,0	0,548	8
	Todas	0,0595	42,5	0,0525	30,7	0,0609	29,25	0,0574	25,6	36,2	22,6	62,0	0,531	64
Guanhães	LV	0,0878	35,7	0,0592	40,1	0,0744	28,1	0,0569	30,7	44,9	17,1	60,7	0,672	17
	LVA	0,0623	56,4	0,0590	62,6	0,0657	61,7	0,0637	64,6	47,0	21,0	60,7	0,704	7
	LA	0,0590	4,2	0,0677	15,9	0,0643	12,7	0,0714	22,5	52,0	4,4	60,7	0,778	2
	CX	0,0783	52,5	0,0644	51,0	0,0775	52,9	0,0662	50,8	44,6	27,7	60,7	0,668	10
	RY	0,0600	0,0	0,0748	0,0	0,0673	0,0	0,0710	0,0	33,0	0,0	60,7	0,494	1
	Todas	0,0781	44,1	0,0614	45,0	0,0729	41,5	0,0618	43,7	45,3	20,7	60,7	0,678	37
Ipaba	LVA	0,0428	42,5	0,0482	31,6	0,0459	33,2	0,0504	26,1	38,8	7,7	62,0	0,570	6
	LA	0,0523	84,7	0,0648	40,5	0,0634	77,3	0,0698	37,9	38,0	19,4	62,0	0,558	5
	CX	0,0593	67,7	0,0453	71,8	0,0756	72,6	0,0572	76,3	40,9	18,3	62,0	0,600	5
	RY	0,0451	45,0	0,0432	53,4	0,0552	46,0	0,0537	52,9	37,6	21,0	62,0	0,552	13
	Todas	0,0476	57,6	0,0478	49,3	0,0571	59,1	0,0556	49,4	38,6	17,0	62,0	0,566	31
Nova Era	LV	0,0613	0,0	0,0715	0,0	0,0645	0,0	0,0745	0,0	45,4	0,0	64,7	0,638	1
	LVA	0,0478	0,0	0,0523	0,0	0,0588	0,0	0,0575	0,0	17,3	0,0	64,7	0,242	1
	LA	0,0484	25,9	0,0570	22,7	0,0587	10,5	0,0660	20,7	53,5	5,1	64,7	0,751	2
	CX	0,0514	25,2	0,0505	23,8	0,0594	16,9	0,0573	19,6	50,8	11,5	64,7	0,713	6
	Todas	0,0514	21,7	0,0541	22,1	0,0597	13,3	0,0608	18,5	47,4	24,7	64,7	0,666	10
Todas		0,0612	48,5	0,0539	39,9	0,0631	40,6	0,0584	36,6	39,8711	23,6	61,8	0,587	142

“Sg”A: Índice “S”, calculado com umidade em kg kg⁻¹, do horizonte A; “Sg” B ou C: Índice “S”, calculado com umidade em kg kg⁻¹, do horizonte B ou C; “Sv”A: Índice “S”, calculado com umidade em m³ m⁻³, do horizonte A; “Sv” B ou C: Índice “S”, calculado com umidade em m³ m⁻³, do horizonte B ou C; CV: coeficiente de variação; N: número de observações; LV: Latossolo Vermelho; LVA: Latossolo Vermelho Amarelo; LA: Latossolo Amarelo; CX: Cambissolo Háplico; RY: Neossolo Flúvico.

Tendo em vista que em muitos levantamentos de solos as CRAs são obtidas em amostras deformadas, pode-se propor que nessas situações “Sv” por já refletir o efeito de densidade do solo, seja uma modalidade de Índice “S” capaz de permitir uma melhor utilização dos dados de levantamentos pedológicos. Além disso, como mostrado no item 3.1 deste trabalho e no item presentemente discutido, “Sv” apresenta-se com variabilidade considerável entre solos, ainda que menor do que a de “Sg”. Portanto, optou-se por escolher “Sv” no estudo do relacionamento entre índice S e produtividade do eucalipto.

Considerando que as árvores que exploram o solo, por intermédio de seu sistema radicular, calculou-se a média aritmética dos valores de “Sv” do horizonte A e do horizonte B (ou C) para fins de relacionamento com a produtividade do eucalipto.

A distribuição de frequência dos valores de “Sv” assim obtidos não segue a normalidade, como indicado pela estatística W, pelo teste de Shapiro-Wilk (Figura 7), sendo assimétrica à esquerda.

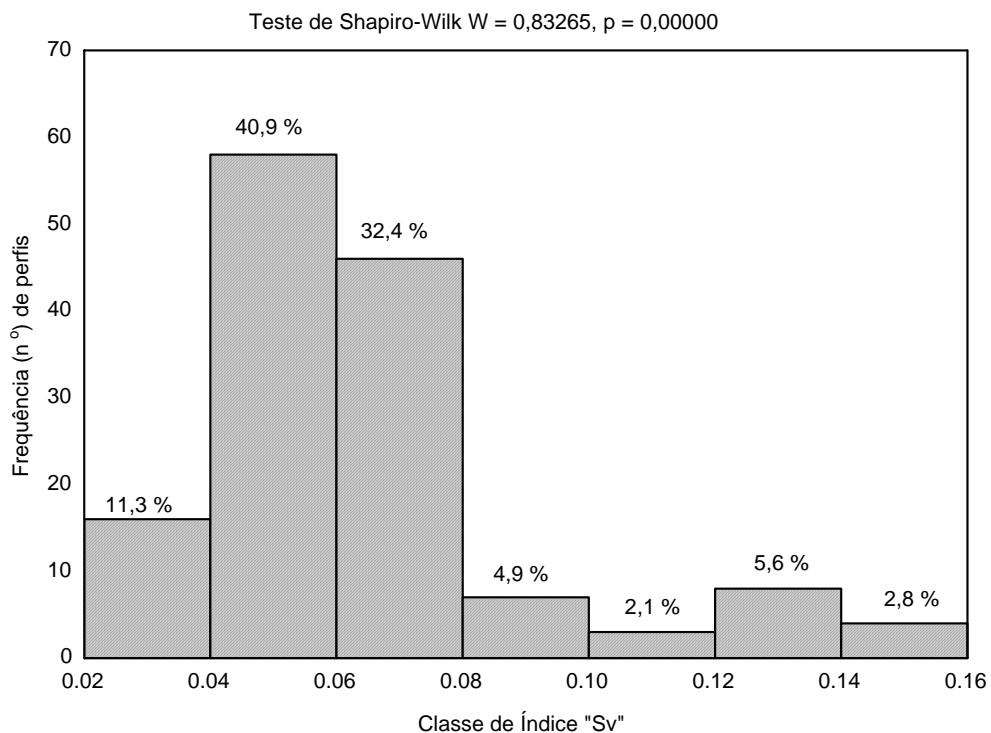


Figura 7: Distribuição de frequência dos valores de Índice “S”, estimado a partir da curva de retenção de água (CRA) com umidade em $m^3 m^{-3}$ (“Sv”), de 142 perfis de solos (média dos horizontes A e B ou C) cultivados com eucalipto no Vale do Rio Doce – MG.

Quanto à produtividade atual do eucalipto (IMA7, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), ela se situou em termos da média de todas as regiões e perfis de solos considerados, em 39,87, variando entre regiões de 36,2 e 38,6 para Região de Belo Oriente e Ipaba a 45,3 e 47,4 para a Região de Guanhães e de Nova Era, as mais produtivas (Quadro 5).

Por sua vez, os valores de produtividade potencial para a idade de 7 anos (IMAp, em $\text{m}^3 \text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$), obtidos pelo modelo 3-PG, pouco variaram entre Regiões (60,7 em Guanhães a 64,7 em Nova Era) com média em termos do conjunto das regiões com média geral de 61,8 (Quadro 5).

A razão de produtividades (IMA7/IMAp) variou de 0,242 (para LVA, em Nova Era) a 0,778 (Para LA, em Guanhães), sendo, em termos da média das regiões e classes de solo de 0,587. Na região de Guanhães, os valores de IMA7/IMAp foram, quase sempre, os maiores e menos variáveis com a classe de solo, exceção feita para os Neossolos Flúvicos desta região.

Considerando que os valores de IMAp foram pouco variáveis entre as regiões, o relacionamento entre o Índice “S” e a produtividade do eucalipto poderia ser feito apenas entre “Sv” e IMA7. De todo modo, optou-se por fazê-lo também entre “Sv” e IMA7/IMAp, em razão da maior aderência conceitual da razão de produtividades. Afinal, é amplamente sabido que o clima é o principal fator controlador da produtividade e da distribuição dos biomas vegetais, vindo a seguir, os fatores fisiográficos e o solo que, geralmente covaria com a fisiografia, para uma mesma condição de planta e de manejo, no caso, de manejo silvicultural. A propósito, os plantios de eucalipto avaliados abrangem um mesmo conjunto de materiais genéticos, todos clonais, e são submetidos ao mesmo esquema de manejo silvicultural, condições essas que permitem propor que o valor da razão de produtividades é fundamentalmente definido pelas condições de solo que interferem nos fluxos de água, ar e nutrientes para as plantas. Esses fluxos são influenciados pelas características e propriedades físicas do solo, que se refletem na sua qualidade física. Dessa forma, procedeu-se ao relacionamento da produtividade do eucalipto tanto em termos de produtividade atual (IMA7 relativo, Figura 8.a), como da razão de produtividades (IMA7/IMAp relativo, Figura 8.b) como função de “Sv” considerando a média dos valores de “Sv” dos horizontes A e B (ou C) dos 142 perfis de solos.

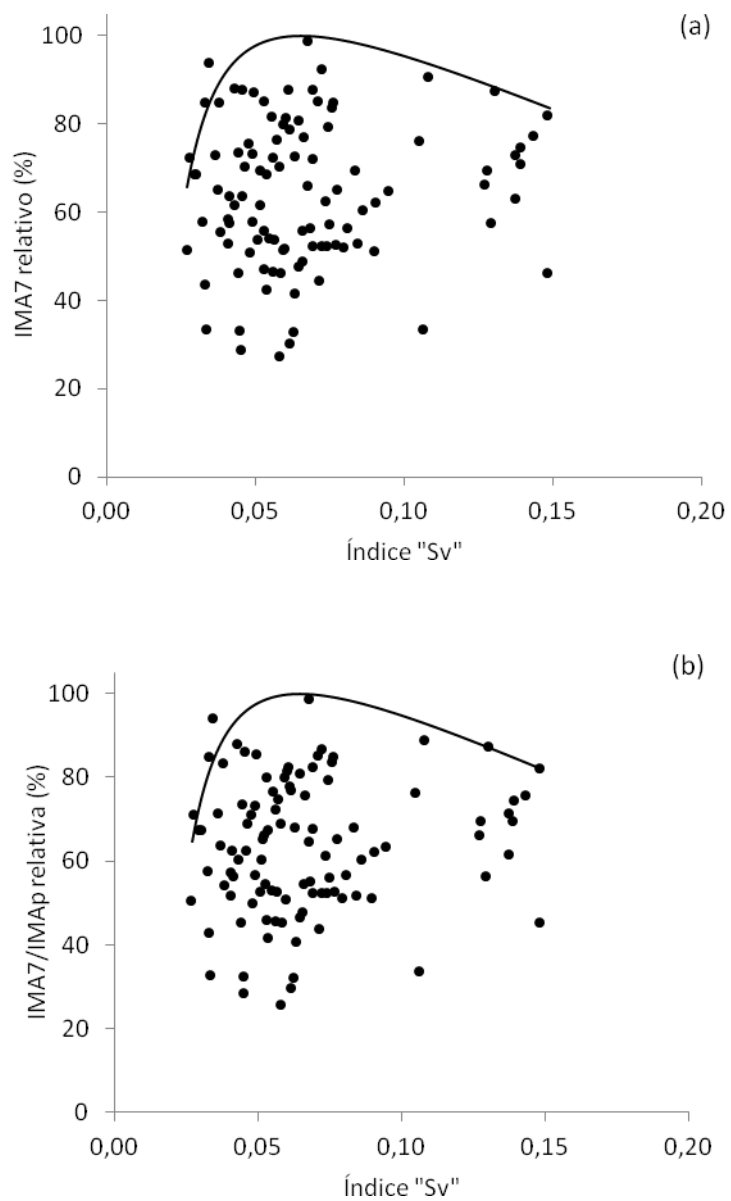


Figura 8. Gráfico de dispersão da produtividade atual (IMA7, a) e de razão de produtividades (IMA7/IMAp, b) em resposta aos valores estimados de Índice "S" derivado de curvas de retenção de água em base volumétrica, "Sv". A curva contínua representa a linha de fronteira superior do relacionamento.

A observação das Figuras 8.a e 8.b revela a existência de uma fronteira superior no relacionamento entre IMA7 relativo ou IMA7/IMAp relativo em função de “Sv”. Aos pontos que se alinham a essa fronteira foram ajustadas equações de regressão mostradas na Figura 9.

A observação da Figura 9 revela que o relacionamento entre a produtividade e a razão de produtividades e o Índice “S” não é simétrico. À esquerda do ponto de máximo, a produtividade ou razão de produtividades respondem, positivamente, muito mais à variação de “Sv” do que as respostas negativas verificadas em função do aumento de “Sv” à direita do ponto de máximo. A existência de um ponto de máximo no relacionamento entre produtividade e razão de produtividades e Índice “S” indicaria a existência de um nível ótimo de heterogeneidade da estrutura, ou seja, de um arranjo ótimo do sistema poroso do solo com vistas a harmonização dos fluxos de água e ar e, num sentido mais amplo, assim, da qualidade física do solo.

A idéia de que exista um ponto ótimo de Índice “S” e de que acima deste, portanto, possa haver penalização da produtividade, é discordante da proposição feita por Dexter (2004a), referida em Silva et al. (2010) de que o aumento dos valores de “S” indicaria, sempre, melhoria na qualidade física. A propósito, ainda como referido em Silva et al. (2010), Dexter (2004a) propõe, tentativamente, os seguintes valores como indicativos de classes de qualidade física: $S < 0,020$ (muito pobre); $0,035 > S \geq 0,020$ (pobre); $0,050 > S \geq 0,035$ (boa) e $S \geq 0,050$ (muito boa).

Para a cultura do eucalipto, pode-se, com base nas equações da Figura 9, propor as classes de qualidade física constantes dos Quadros 6 e 7, também mostradas nas Figuras 10 e 11, para IMA7 relativo e IMA7/IMAp relativos, respectivamente.

Com base nos valores de “Sv” fez-se, então, o diagnóstico da qualidade física dos 142 perfis de solos cultivados com eucalipto na região do Vale do Rio Doce – MG, considerando o horizonte A e o B (ou C) como também o perfil (média dos horizontes A e B (ou C)). Esse diagnóstico foi feito tanto em base à produtividade atual (IMA7 relativo, Quadro 8) tanto em base à razão de produtividades (IMA7/IMAp, Quadro 9).

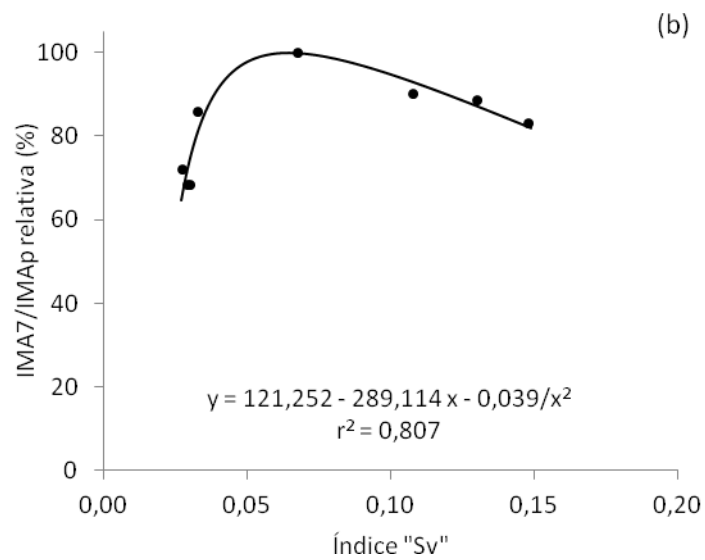
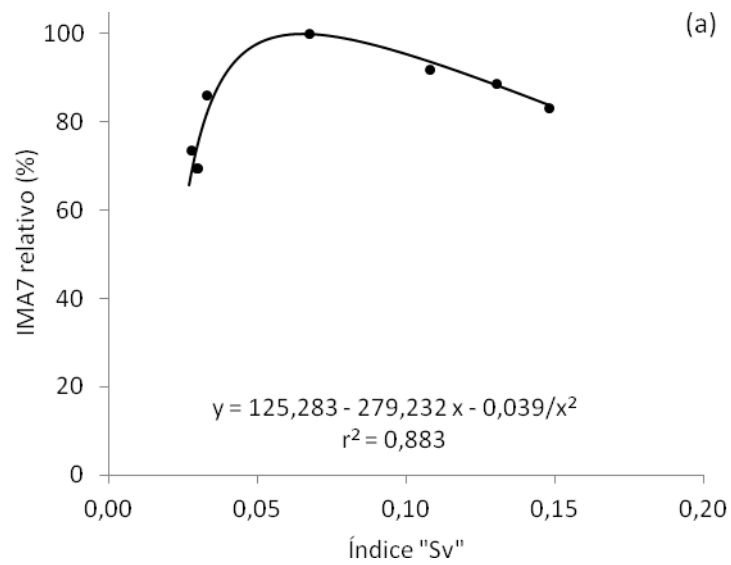


Figura 9. Produtividade (IMA7) (a) e Razão de produtividades (IMA7/IMAp) (b) de plantios de eucalipto em 142 perfis de solos, na região do Vale do Rio Doce – MG. As equações correspondem à linha de fronteira do relacionamento.

Quadro 6. Classes de qualidade física de solos e respectivos valores de Índice “S” derivado de CRA com umidade em base volumétrica “Sv”, com base no crescimento relativo (IMA7 relativo) da cultura do eucalipto, conforme o método da Linha de Fronteira.

IMA7 relativo (%)	“Sv”	Classe de qualidade física
< 50	< 0,0237	muito pobre
50 a 70	0,0237 a 0,0281	pobre
70 a 90	0,0282 a 0,0383	regular
90 a 100	0,0384 a 0,0653	boa
100 a 90	0,0654 a 0,1239	boa, tendendo a regular
90 a 70	0,1240 a 0,1996	regular, tendendo a pobre
70 a 50	> 0,1997	pobre, tendendo a muito pobre

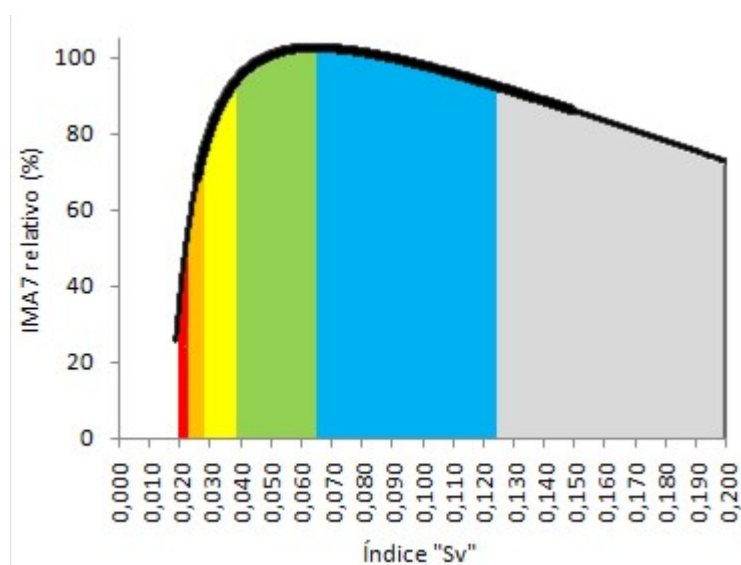


Figura 10. Representação gráfica das faixas de Índice “S” associadas à classes de qualidade física de solos, com base no crescimento relativo (IMA7 relativo) da cultura do eucalipto, pelo método da linha de fronteira (vermelho: muito pobre, laranja: pobre, amarelo: regular, verde: boa, azul: boa, tendendo a regular, cinza claro: regular, tendendo a pobre, cinza escuro: pobre, tendendo a muito pobre). No gráfico, a porção menos espessa da curva indica extrapolação do modelo ajustado.

Quadro 7. Classes de qualidade física de solos e respectivos valores de Índice “S” derivado de CRA com umidade em base volumétrica “Sv”, com base na razão de produtividades (IMA7/IMAp relativo) da cultura do eucalipto, conforme o método da Linha de Fronteira.

IMA7/IMAp relativo (%)	“Sv”	Classe de qualidade física
< 50	< 0,0243	muito pobre
50 a 70	0,0243 a 0,0287	pobre
70 a 90	0,0288 a 0,0386	regular
90 a 100	0,0387 a 0,0640	boa
100 a 90	0,0641 a 0,1166	boa, tendendo a regular
90 a 70	0,1167 a 0,1829	regular, tendendo a pobre
70 a 50	> 0,1829	pobre, tendendo a muito pobre

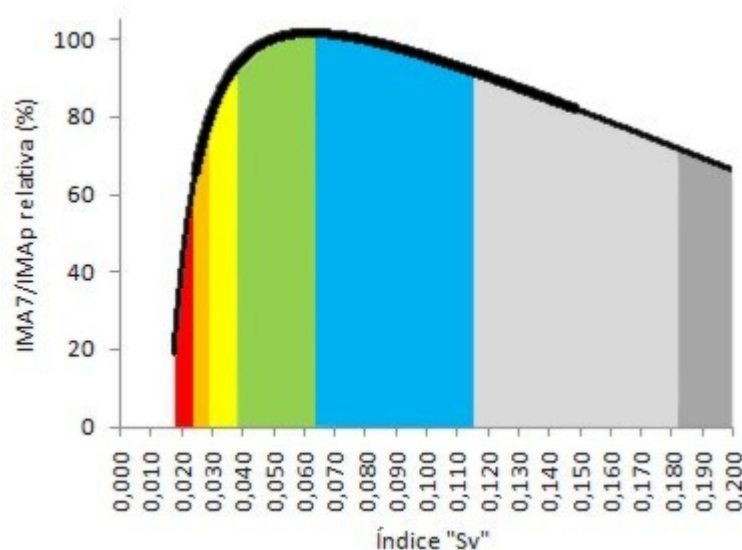


Figura 11. Representação gráfica das faixas de Índice “S” associadas à classes de qualidade física de solos, com base na razão de produtividades (IMA7/IMAp relativo) da cultura do eucalipto, pelo método da linha de fronteira (vermelho: muito pobre, laranja: pobre, amarelo: regular, verde: boa, azul: boa, tendendo a regular, cinza claro: regular, tendendo a pobre, cinza escuro: pobre, tendendo a muito pobre). No gráfico, a porção menos espessa da curva indica extrapolação do modelo ajustado.

Quadro 8. Frequência absoluta (n) e relativa (n, %) em classes de qualidade física de solos, em termos do horizonte A, B (ou C) ou da média destes, com base nos valores de Índice “S” associados à produtividade atual (IMA7) de plantios de eucalipto, na região do Vale do Rio Doce – MG.

Classe de qualidade física	Horizonte A				Horizonte B ou C				Perfil (média A, B (ouC))			
	n	n (%)	Média	CV (%)	n	n (%)	Média	CV (%)	n	n (%)	Média	CV (%)
muito pobre	0	0			0	0			0	0		
pobre	1	0,7	0,0265	0	6	4,2	0,0268	2,6	2	1,4	0,0274	2,0
regular	15	10,6	0,0327	10,0	18	12,6	0,0345	8,9	13	9,2	0,0335	7,5
boa	82	57,7	0,0539	14,2	72	50,8	0,0526	14,0	79	55,6	0,0545	13,2
boa, tendendo a regular	37	26,1	0,0822	19,4	42	29,6	0,0762	17,8	36	25,4	0,0774	14,8
regular, tendendo a pobre	7	4,9	0,1407	7,2	4	2,8	0,1307	2,8	12	8,4	0,1379	5,7
pobre, tendendo a muito pobre	0	0			0	0			0	0		

Quadro 9. Frequência absoluta (n) e relativa (n, %) em classes de qualidade física de solos, em termos do horizonte A, B (ou C) ou da média destes, com base nos valores de Índice “S” associados à razão de produtividades (IMA7/IMAp) de plantios de eucalipto, na região do Vale do Rio Doce – MG.

Classe de qualidade física	Horizonte A				Horizonte B ou C				Perfil (média A, B (ouC))			
	n	n (%)	Média	CV (%)	n	n (%)	Média	CV (%)	n	n (%)	Média	CV (%)
muito pobre	0	0			0	0			0	0		
pobre	4	2,8	0,0281	3,6	6	4,2	0,0268	2,6	2	1,4	0,0274	2,0
regular	13	9,2	0,0341	8,8	18	12,6	0,0345	8,9	14	9,9	0,0338	8,1
boa	76	53,5	0,0534	13,6	71	50,1	0,0525	13,9	73	51,4	0,0540	12,4
boa, tendendo a regular	39	27,5	0,0771	15,6	42	29,6	0,0748	15,3	41	28,9	0,0759	15,2
regular, tendendo a pobre	10	7,0	0,1344	9,8	5	3,5	0,1293	3,5	12	8,4	0,1379	5,7
pobre, tendendo a muito pobre	0	0			0	0			0	0		

Verifica-se, numa avaliação geral, que as freqüências de solos nas classes de qualidade física são de mesma ordem de magnitude quando se considera a produtividade atual (IMA7, Quadro 8) ou a razão de produtividades (IMA7/IMAp, Quadro 9). Dessa forma, o diagnóstico dos solos sob a cultura do eucalipto, na região do Vale do Rio Doce – MG, será aqui comentado com base na razão de produtividades.

Dessa forma, 90,2 (horizonte A) e 92,3 % (horizonte B ou C) dos solos situam-se nas classes de qualidade física regular, boa e boa tendendo a regular. Considerando a média desses horizontes, 90,2 % dos solos situam-se nessas classes tomadas em conjunto. Isso indica que menos de 10 % dos solos apresentam qualidade física “pobre”, “pobre tendendo a regular” e “regular tendendo a pobre”, não havendo nenhum solo com qualidade física muito pobre. Verifica-se também no Quadro 9 que em torno de 80 % dos solos situam-se nas duas melhores classes de qualidade física, quais sejam “boa” e “boa tendendo a regular”, com ampla predominância da classe “boa”. Os valores de Índice “Sv” associados a essas classes abrangem a faixa de 0,039 a 0,117 (Quadro 7), cujo limite inferior é um pouco menor do que o proposto por Dexter (2004a), referido em Silva et al. (2010) para a classe de melhor qualidade física (0,050), por ele denominada de “muito boa”, e neste trabalho de “boa”. Já o limite superior (0,117) que seria considerado por essa proposição de Dexter (2004a) como também indicativo da melhor classe de qualidade física, neste trabalho é indicativo da transição de qualidade física “boa para regular”.

Esses resultados, além de permitirem constatações sobre a qualidade física, são também importantes para embasar comparações futuras, no contexto de monitoramento da qualidade física com base no Índice “S”. Nessa linha, pode-se também sugerir que seja feita uma estratificação dos solos levando-se em conta o número de rotações com eucalipto em cada perfil de solo. Esta estratégia, em princípio, permitiria se ter idéia dos reflexos da utilização dos solos com a cultura do eucalipto sobre sua qualidade física.

Observa-se que 94,4 e 90,2 % dos solos (horizonte A) encontram-se em classes de qualidade física regular, boa e boa tendendo a regular, consideradas conjuntamente. Já com base no horizonte B (ou C) 93,0 e 92,3 % situam-se nessas mesmas classes, também consideradas em conjunto.

É importante ressaltar que a boa qualidade física é uma condição necessária à obtenção de altos níveis de produtividade (seja IMA7 ou IMA7/IMAp), mas não é uma condição suficiente, uma vez que como mostrado na Figura 8 (a e b), há vários perfis de solo nos quais a qualidade física se encontra na classe boa, e não obstante, a produtividade não é alta. Tais pontos são consequência da existência de outros fatores limitantes à obtenção de altas produtividades, uma vez que pelo método da Linha de Fronteira, obtem-se o efeito isolado de um dado fator de produção (Mediavilla & Escudero, 2003; Fernandes, 2010). Essa característica do método da Linha de Fronteira permite, de forma satisfatória, sua aplicação em estudos para avaliação das mudanças na qualidade do solo, uma vez que o método de LF pode ser utilizado para modular as curvas de pontuação padronizadas (Wymore, 1993) para cada indicador do solo.

A utilização do Índice “S” para representar a qualidade física do solo é promissora, devendo também ser considerados outros indicadores que reflitam a qualidade química e biológica do solo, sempre na busca de um conjunto mínimo de indicadores (minimum dataset). Ainda, estudos adicionais com o Índice “S” devem ser realizados para as condições de Brasil com outros solos e culturas. Também se sugere que na determinação das curvas de retenção de umidade do solo seja utilizado um maior número de pontos nas menores tensões de modo a se obter, com maior grau de acurácia os valores de Índice “S” e, para embasar o desenvolvimento funções de transferência pedológica.

4. CONCLUSÕES

- O parâmetro S relaciona-se com características físicas que refletem o sistema poroso do solo e com o teor de matéria orgânica, mostrando-se capaz de representar a qualidade física de solos cultivados com eucalipto e, assim, útil para integrar modulador pedológico a ser usado em modelos de crescimento com base processual, como o 3-PG.
- Foram obtidas faixas de valores de “S” associadas a classes descritivas da qualidade física do solo para o eucalipto.
- Em torno de 80 % dos solos cultivados com eucalipto na região do Vale do Rio Doce – MG apresentam boa qualidade física.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, R.S.; STONE, L.F. Índice S como indicador da qualidade física de solos do cerrado brasileiro. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.4, p.382–388, 2009.
- ARAÚJO, E.A. Qualidade do solo em ecossistemas de mata nativa e pastagens na região leste do Acre, Amazônia Ocidental. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2008. 233p. (Tese de Doutorado).
- BORGES, J.S. Parametrização, calibração e validação do modelo 3-PG para eucalipto na região do Cerrado de Minas Gerais. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009. 77p. (Dissertação de Mestrado).
- BURGER, J. A.; KELTING, D.L. Soil quality monitoring for assessing sustainable forest management. In: *The contribution of soil science to the development of and implementation of criteria and indicators of sustainable forest management*. Madison, Soil Science Society of America, p.17-52, 1998. (SSSA Special Publication, 53).
- CHAKRABORTY, D.; GARG, R.N.; TOMAR, R.K.; DWIVEDI, B.; AGGARWAL, P.; SINGH, R.; BEHERA, U.K.; THANGASAMY, A.; SINGH, D. Soil physical quality S influenced by long-term application of fertilizers manure under maize-wheat system. *Soil Science*, v.175, p.128-136, 2010.
- CHAER, G.M. Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2001. 89p. (Dissertação de Mestrado).
- DA SILVA, A.P. Interação manejo versus física. In: *Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água*, 15, 2004, Santa Maria. Palestra. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2004. CD-ROM.

- DEXTER, A.R. Soil physical quality Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, v.120, 201–214, 2004a.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part II. Friability, tillage, filth and hard-setting. *Geoderma*, v.120, p.215-225, 2004b.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part III. Unsaturated hydraulic conductivity and general conclusions about S-theory. *Geoderma*, v.120, p.227-239, 2004c.
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BZEDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, Soil Science Society of America. p.3-21. 1994. (Special Publication, 35).
- DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D.R.; HOPMANS, J.W.; REICHARDT, K.; BACCHI, O.O.S.; LOPES, P.P. Programa para confecção da curva de retenção de água no solo, modelo Van Genuchten. *Soil Water Retention Curve, SWRC (version 3,00 beta)*. Piracicaba: Universidade de São Paulo, 2001.
- FAO. Global planted forests thematic study: results and analysis, by A. Del Lungo, J. Ball and J. Carle. *Planted Forests and Trees Working Paper 38*. Rome (also available at (www.fao.org/forestry/site/10368/en)). 2006.
- FERNANDES, L.V. Normas e determinação de faixas de suficiência para diagnose foliar com base no crescimento relativo de eucalipto. Viçosa, UFV, 2010. 81p. (Dissertação de Mestrado).
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A. Homogeneidade da qualidade física do solo nas entrelinhas de um pomar de laranjeira com sistemas de manejo da vegetação permanente. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.31, p.637-645, 2007.
- GLOVER, J.D.; REGANOLD, J.P. & ANDREWS, P.K. Systematic method for rating soil quality of conventional, organic, and integrated apple orchards in Washington State. *Agriculture, Ecosystems and Environment*. v.80, p.29-45, 2000.
- HILLEL, D. *Introduction to Soil Physics*. San Diego: Accademic Press. 385p. 1980.
- HYAMS, D. *CurveExpert 1.34*. A curve fitting system for Windows Double-precision. 1997.
- KARLEN, D.L.; STOTT, D.E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of 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, 1994. (Special Publication, 35).
- KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R.F.; SHUMAN, G.E. Soil Quality: a concept, definition, and framework for evaluation. *Soil Science Society American Journal*. v.61, p.4-10, 1997.
- KIEHL, E.J. *Manual de Edafologia: Relações solo planta*. São Paulo: Ceres, 264p. 1979.
- KIMMINS, J.P. *Forest Ecology: a foundation for sustainable forest management and environment ethics in forestry*. 3.ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2004. 611p.
- LANDSBERG, J.J.; WARING, R.H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*. v.95, p.209-228, 1997.
- MEDIAVILLA, S.; ESCUDERO, A. Stomatal responses to drought at a Mediterranean site: a comparative study of co-occurring woody species differing in leaf longevity. *Tree Physiology*. v.23, p.987-996, 2003.
- MENEZES, A.A. *Produtividade do eucalipto e sua relação com a qualidade e a classe de solo*. Viçosa, MG: UFV, 2005. (Tese de doutorado).
- MIELNICZUK, J. *Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas*. In: SANTOS, A.S.; CAMARGO, F.A.O. (Eds). *Fundamentos da matéria orgânica dos solos*. Porto Alegre: Genesis, p.1-8, 1999.
- MUALEM, Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resources Research*, v. 12, p.513-522, 1976.
- OLIVEIRA, L.B. *Determinação da macro e micro porosidade pela “mesa de tensão” em amostras de solo com estrutura indeformada*. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v.3, p.197-200. 1968.
- OLIVEIRA, A.A.K.; LEITE, A.S. *Projeto Leste: Folha Ipatinga, SE.24-Z-D-II. Escala 1:100.000*. v.20. Belo Horizonte, SEME/COMIG/CPRM, 2000. 58p.
- PEDROTTI, A.; MÉLLO JÚNIOR, A.V. *Avanços em Ciências do Solo: A física do solo na produção agrícola e qualidade ambiental*. São Cristóvão: Editora UFS, Aracaju: Fapitec, 2009, 212p.
- PIERCE, F.J.; LARSON, W.E. *Developing criteria to evaluate sustainable land management*. In: KIMBLE, J.M. (Ed.), *Proc. of the 8th Int. Soil Management Workshop: Utilization of Soil Survey Information for*

- Sustainable Land Use, USDA-SCS, National Soil Survey, Lincoln, p.7-14, 1993.
- POGGIANI, F.; STAPE, J.L.; GONÇALVES, J.L.M. Indicadores de sustentabilidade das plantações florestais. Piracicaba. Série Técnica IPEF. v.12, n.31, p.33-44, 1998.
- REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Coluna de areia para medir a retenção de água no solo – protótipos e teste. *Ciência Rural*, v.36, n.6, p.1931-1935, 2006.
- SANTOS, C.A.P. Qualidade de solos sob eucalipto fertirrigado no Vale do Rio Doce – MG. 2004. 61f. Dissertação (Mestrado em microbiologia agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.
- SHAPIRO, S.S.; WILK, M.B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, v.52, p.591-611, 1965.
- SHOENHOLTZ, S. H.; VAN MIEGROT, H.; BURGER, J. A. A review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. *Forrest Ecology and Management* , v.13, p.335-356, 2000.
- SILVA, A.P.; TORMENA, C.A.; DIAS JUNIOR, M.S.; IMHOFF, S.; KLEIN, V.A. Indicadores da qualidade física do solo. In: VAN LIER, Q.J. (Editor). *Física do Solo*. Viçosa – MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo – SBCS. p.241-281, 2010.
- SINGER, M.J.; EWING, S. Soil quality. In : Sumner, M.E. (Ed.). *Handbook of soil science*. Boca Raton/London: CRC Press, 2000. p.G271-G298.
- SMITH, J.L.; HALVORSON, J.J.; PAPENDICK, R.I. Using multiple-variable indicator kriging for evaluation soil quality. *Soil Science Society American Journal*. v.57, p.743-749, 1993.
- SOJKA, R.E.; UPCHURCH, D.R. Reservations regarding the soil quality concept: discussion. *Soil Science Society American Journal*. v.63, n.5, p.1039-1054, 1999.
- SOUZA, L.S.; SOUZA, L.D.; SOUZA, L.F.S. Indicadores físicos e químicos de qualidade do solo sob o enfoque de produção vegetal: estudo de caso para citros em solos coesos de tabuleiros costeiros. In: Congresso Brasileiro de Ciencia do solo, 29, Ribeirão Preto: UNESP, 2003. CD-ROM...
- STATSOFT, Inc. STATISTICA (data analysis software system), version 8.0. 2007. www.statsoft.com.
- STENBERG, B. Monitoring soil quality of arable land: microbiological indicators. *Acta Agriculturae Scandinavia*, Estocolmo, v.49, p.1-24, 1999.

- STRECK, C.A.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; HORN, R. Relações do parâmetro S para algumas propriedades físicas de solos do sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.32, p.2603-2612, 2008. Número Especial.
- TORMENA, C. A.; da SILVA, A. P. Avaliação da qualidade física de um solo utilizando o parâmetro S. In: *Reunião Brasileira de Manejo e Conservação do Solo e da Água*, 15, 2004, Santa Maria. Resumos expandidos. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2004. CD-ROM.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P. & LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, v.22, p.573-581, 1998.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.C. DEXTER, A.R. Quantification of the Soil Physical Quality of a Tropical Oxisol Using the S Index. *Cientia Agricola*. v.65, p.56-60, 2008.
- TÓTOLA, M.R.; CHAER, G.M. Microorganismos e processos microbiológicos como indicadores da qualidade dos solos. In: ALVAREZ V, V.H. et al Eds. *Tópicos em Ciência do Solo*. v.2. Viçosa: SBCS, 2002. p.195-276
- TURCO, R.F.; BLUME, H. Indicators of soil quality. In: *Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas*, 23, Lavras. Anais... Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Sociedade Brasileira de Microbiologia, 1998.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of American Journal*, v.44, p.892-898, 1980.
- WALKER, J.; REUTER, D.J. Indicators of Catchment Health: a Technical Perspective. Melbourne: CSIRO, 1996. 174p.
- WALWORTH, J. L.; LETZSCH, W. S.; SUMNER, M. E. Use of boundary lines in establishing diagnostic norms. *Soil Science Society of American Journal*. v.50; p.123-128, 1986.
- WEBB, R.A. Use of the boundary line and analysis of biological data. *Journal of Horticultural Science*. v.47, p.309-319, 1972.
- WYMORE, A.W. *Model-Based Systems Engineering. An Introduction to the Mathematical Theory of Discrete Systems and to the Tricotyledon Theory of System Design*. CRC, Boca Raton, FL, 1993.