

### Qualidade física do solo: indicadores quantitativos





*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Embrapa Clima Temperado  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

ISSN 1516-8840

Outubro, 2007

versão  
ON-LINE

# *Documentos 196*

## **Qualidade Física do Solo: Indicadores Quantitativos**

**Cláudia Liane Rodrigues de Lima  
Clenio Nailto Pillon  
Ana Cláudia Rodrigues de Lima**

Pelotas, RS  
2007

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Clima Temperado**

Endereço: BR 392 km 78

Caixa Postal 403 - Pelotas, RS

Fone: (53) 3275 8199

Fax: (53) 3275-8219 / 3275-8221

Home page: [www.cpact.embrapa.br](http://www.cpact.embrapa.br)

E-mail: [sac@cpact.embrapa.br](mailto:sac@cpact.embrapa.br)

**Comitê de Publicações da Unidade**

Presidente: Walkyria Bueno Scivittaro

Secretária-Executiva: Joseane M. Lopes Garcia

**Membros:** Cláudio Alberto Souza da Silva, Lígia Margareth Cantarelli Pegoraro, Isabel Helena Vernetti Azambuja, Luís Antônio Suita de Castro, Sadi Macedo Sapper, Regina das Graças V. dos Santos

**Suplentes:** Daniela Lopes Leite e Luís Eduardo Corrêa Antunes

Revisores de texto: Sadi Macedo Sapper

Normalização bibliográfica: Regina das Graças Vasconcelos dos Santos

Editoração eletrônica: Oscar Castro

Composição e impressão: Embrapa Clima Temperado

**1ª edição**

1ª impressão 2007: 50 exemplares

**Todos os direitos reservados**

A reprodução não-autorizada desta publicação, no todo ou em parte, constitui violação dos direitos autorais (Lei no 9.610).

---

Lima, Claúdia Liane Rodrigues de.

QUALIDADE FÍSICA DO SOLO: INDICADORES QUANTITATIVOS / Claúdia Liane Rodrigues de Lima, Clênio Nailto Pillon, Ana Claúdia Rodrigues de Lima. -- Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 2007.

25 p. -- (Embrapa Clima Temperado. Documentos, 196).

ISSN 1516-8840

Estrutura do Solo - Densidade do solo - Porosidade do solo - Agregação do solo. I. Pillon, Clênio Nailto. II. Lima, Ana Claúdia Rodrigues de. L. III. Título. IV. Série.

CDD 631.43

---

# **Autores**

## **Cláudia Liane Rodrigues de Lima**

Dr(a)., pesquisadora visitante, convênio  
Petrobras/Fapeg/Embrapa, Br 392, km 78,  
Caixa Postal 403, 96001-970, Pelotas, RS  
(clrlima@yahoo.com.br)

## **Clenio Nailto Pillon**

Dr., pesquisador da Embrapa Clima  
Temperado, Br 392, km 78  
Caixa Postal 403, 96001-970, Pelotas, RS  
(pillon@cpact.embrapa.br)

## **Ana Cláudia Rodrigues de Lima**

Doutoranda, Universidade de Wageningen,  
Departamento de qualidade do solo, Grupo  
de tecnologia agrícola, P.O. Box 17, 6700 AA.  
Wageningen, The Netherlands,  
(ana.lima@wur.nl)



# **Apresentação**

O interesse em avaliar a qualidade do solo tem sido incrementado devido à consciência crítica em considerá-lo como um importante componente da biosfera. O conceito de qualidade de solo é bastante amplo e a dificuldade na sua definição provém da dependência de características intrínsecas, de seu uso e manejo, de interações do agroecossistema, e de fatores socioeconômicos e políticos.

O conhecimento da qualidade física do solo é de extrema importância para avaliar o nível de degradação imposta pelo uso agrícola e para estabelecer estratégias de utilização e manejo sustentável.

Neste contexto, o presente documento propõe-se a fornecer subsídios para avaliação e para a interpretação da qualidade física do solo, com a finalidade de potencializar a produtividade agrícola de solos sob diferentes agroecossistemas.

*João Carlos Costa Gomes*

Chefe-Geral  
Embrapa Clima Temperado



# Sumário

|                                                          |    |
|----------------------------------------------------------|----|
| Qualidade Física do Solo: Indicadores Quantitativos .... | 9  |
| Introdução .....                                         | 9  |
| Qualidade do solo .....                                  | 10 |
| Qualidade física do solo .....                           | 12 |
| Fatores que afetam a qualidade física do solo .....      | 14 |
| Indicadores da qualidade física do solo .....            | 15 |
| Densidade do solo .....                                  | 16 |
| Porosidade do solo .....                                 | 17 |
| Estabilidade de agregados do solo .....                  | 18 |
| Resistência mecânica do solo à penetração .....          | 21 |
| Considerações finais .....                               | 22 |
| Referências .....                                        | 23 |



# Qualidade Física do Solo: Indicadores Quantitativos

---

**Cláudia Liane Rodrigues de Lima**  
**Clenio Nailto Pillon**  
**Ana Cláudia Rodrigues de Lima**

## Introdução

Atualmente, tem-se observado um crescente interesse na avaliação e na interpretação da qualidade do solo. Agricultores, naturalistas, ambientalistas e consumidores revelam diferentes opiniões do que significaria um solo com qualidade.

Para evitar conclusões errôneas tem-se sugerido a quantificação não apenas de um indicador, mas de um conjunto de parâmetros mínimos (minimum data set) de solo que possam auxiliar no seu diagnóstico. Indicadores biológicos, químicos e físicos têm sido utilizados no monitoramento da qualidade do solo. Porém, uma das maiores dificuldades encontradas está na escolha de parâmetros que sejam realmente sensíveis para detectar alterações em solos submetidos a diferentes sistemas de manejo.

Para um adequado crescimento, as plantas necessitam de uma estrutura que possibilite uma área de contato entre as raízes e o solo, que assegure a obtenção de água e nutrientes e um suficiente espaço poroso para o fornecimento adequado de oxigênio. Terras agrícolas vêm perdendo a sua qualidade física decorrente dos processos de degradação a que estão sendo expostas. A compactação, por exemplo, ao causar modificações

na estrutura do solo pode limitar a adsorção e a absorção de nutrientes, a infiltração e a distribuição de água e, por sua vez, resultar em problemas no estabelecimento e no crescimento de raízes. Esta limitação é originada por alterações em atributos físicos do solo, como aumento da densidade e da resistência à penetração, diminuição da porosidade e de modificações na continuidade dos poros.

Fatores externos e internos condicionam a resposta do solo à degradação da qualidade física. Os fatores externos são caracterizados, pelo tipo, pela intensidade e pela frequência da pressão exercida, por máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou pisoteio de animais e, os internos, pelos parâmetros físicos do solo.

Diante deste contexto, o objetivo deste documento é apresentar alguns conceitos e apontar alguns indicadores quantitativos utilizados na avaliação da qualidade física do solo.

## **Qualidade do solo**

Definir e quantificar a qualidade do solo não tem sido uma tarefa muito fácil. O conceito é bastante amplo e refere-se ao conhecimento de uma ampla gama de atributos que são dependentes de interações no ecossistema e da variabilidade espacial e temporal.

Conforme Doran e Parkin (1994) e Larson e Pierse (1994), algumas definições de solos têm sido propostas. Comum a todas é a capacidade do solo em exercer uma determinada função no presente e no futuro. De uma forma ampla, a qualidade do solo tem sido definida como “a capacidade de um tipo específico de solo em seu meio natural ou modificado de exercer várias funções como sustentar a produtividade biológica, manter ou melhorar a qualidade ambiental e contribuir para a saúde humana, de plantas e de animais” (KARLEN et al., 1997), ou, ainda, simplesmente, como sendo a “habilidade para o uso” (LARSON e PIERCE, 1994).

Entretanto, sabe-se que nenhum solo exerce satisfatoriamente todas estas funções, algumas das quais ocorrem em ambientes naturais e outras são resultados das modificações humanas (GOVAERTS et al., 2006).

Percepções do que seria um “bom solo” variam e são dependentes das prioridades individuais com relação às suas funções (DORAN e PARKIN, 1994; SHUKLA et al., 2006). Uma “alta qualidade de solo” significa a manutenção de uma maior produtividade com mínima degradação do solo e do ambiente (GOVAERTS et al., 2006).

A avaliação da qualidade do solo é a base para a quantificação da sustentabilidade agrícola. Basicamente, emprega-se a comparativa e a dinâmica. A comparativa é aquela na qual o desempenho dos sistemas de manejo é avaliado comparando-se com sistemas alternativos em um determinado momento. O processo dinâmico baseia-se na avaliação do desempenho dos sistemas de manejo ao longo do tempo (LARSON e PIERCE, 1994).

No entanto, considera-se que a qualidade do solo não pode ser medida diretamente, devendo ser inferida a partir de indicadores físicos, químicos e biológicos os quais influenciam a capacidade do solo em desempenhar uma determinada função (WANDER e BOLLERO, 1999; SHUKLA, et al., 2006).

Um conjunto de indicadores básicos que quantifiquem a qualidade do solo ainda não foi satisfatoriamente definido, devido à dificuldade de identificar o que representa a qualidade do solo e como ela deve ser realmente medida. Segundo Doran e Parkin (1996), a identificação dos indicadores e dos seus métodos de avaliação tem sido complexo pela multiplicidade dos fatores físicos, químicos e biológicos que controlam os processos do solo e sua variação em intensidade ao longo do tempo e do espaço.

## Qualidade física do solo

Indicadores físicos representam grande relevância no monitoramento da qualidade do solo, com vistas à sustentabilidade agrícola. Até o momento, a qualidade física “ideal” para um solo ainda não é conhecida. A dependência desta definição está na grande variedade de solo e na adoção de determinado sistema de cultura e manejo. Para tanto, é necessária a determinação de referenciais que possam servir de base para a interpretação e sua comparação. O critério de referência pode ser um local específico que represente uma área natural ou experimental com tipo de solo e condições climáticas similares. Tem sido sugerido adotar como critério de referência as condições de solos que suportam uma vegetação nativa e ou que tenham sofrido mínimos distúrbios antropogênicos (DORAN e PARKIN, 1994).

Uma estratégia comumente sugerida para se avaliar um conjunto de indicadores da qualidade é o estabelecimento de um índice de qualidade, o qual poderá ser útil no monitoramento do estado físico do solo e para a identificação de práticas de manejo adequadas, constituindo uma ferramenta de medição da capacidade do solo em exercer funções ambientais e de produtividade.

Inúmeras propriedades alteram espacial e temporalmente, em função de práticas de manejo e do uso da terra. Existem trabalhos com valores pré-estabelecidos de parâmetros físicos como restritivos ou críticos ao desenvolvimento radicular e, por sua vez, à produtividade agrícola como o de Taylor et al. (1966) que sugerem uma resistência à penetração radicular  $> 2$  MPa como restritiva ao crescimento radicular e o de Canarache (1990) que aponta e classifica algumas classes de resistência à penetração, relacionando-as com limitações impostas ao crescimento de raízes (Tabela 1).

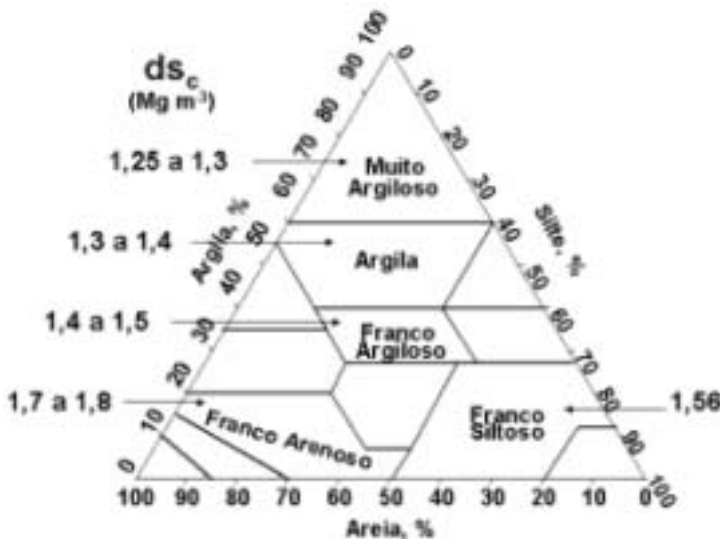
**Tabela 1** Classes de resistência do solo à penetração e limitações ao crescimento de raízes das plantas.

| Classes           | Resistência à penetração, $\text{Mg m}^{-3}$ | Limitações ao crescimento de raízes |
|-------------------|----------------------------------------------|-------------------------------------|
| Muito baixa       | <1,1                                         | Sem limitação                       |
| Baixa             | 1,2 – 2,5                                    | Pouca limitação                     |
| Média             | 2,6 – 5,0                                    | Algumas limitações                  |
| Alta              | 5,1 – 10,0                                   | Sérias limitações                   |
| Muito alta        | 10,1 – 15,0                                  | Raízes praticamente não crescem     |
| Extremamente alta | > 15,0                                       | Raízes não crescem                  |

Ainda não existem valores de densidade de solo considerados limitantes à produtividade agrícola. Alguns estudos têm sido feitos nesse sentido, mas ainda existem questionamentos e dúvidas. Reichert et al. (2003), por exemplo, apontaram alguns intervalos de valores de densidade limitantes à produtividade agrícola, em função da textura do solo (Figura 1). Observando a Figura 1, verifica-se que os solos com maior quantidade de argila apresentam uma densidade crítica inferior a aqueles mais arenosos. Observando-se essa relação, percebe-se que solos franco arenosos possuem um intervalo de densidade considerado crítico ao desenvolvimento de plantas de 1,70 a 1,80  $\text{Mg m}^{-3}$  (Figura 1).

Adicionalmente a essas pesquisas, uma indicação de parâmetros físicos considerados críticos ao desenvolvimento de plantas tem sido proposta para condições específicas de solo e manejo, como por exemplo o estudo de Lima et al. (2007). Neste trabalho, considerando a resistência do solo à penetração (RP) observou-se para um Argissolo Vermelho distrófico arênico que para uma RP de 1,5 MPa, valores de densidade inferiores a 1,37 e superiores a 1,69  $\text{Mg m}^{-3}$  podem ser restritivos ao crescimento radicular. Por outro lado, considerando uma RP de 2,5 MPa, valores de densidade inferiores a 1,49 e superiores a

1,83  $\text{Mg m}^{-3}$  podem ser limitantes ao desenvolvimento das plantas. Para uma RP de 3 e 3,5 MPa foi indicado, respectivamente, valores de densidade adequados ao crescimento de culturas de 1,53 a 1,88  $\text{Mg m}^{-3}$  e de 1,57 a 1,93  $\text{Mg m}^{-3}$ .



**Figura 1** Densidade crítica ( $Ds_c$ ) para diferentes classes texturais de solo.

## Fatores que afetam a qualidade física do solo

Dentre os fatores que afetam a Qualidade Física do Solo QFS estão principalmente os sistemas de preparo e de manejo como, o cultivo contínuo na mesma área, o uso e a utilização de áreas em níveis inadequados de umidade, o pisoteio de animais em pastagens, o trânsito de máquinas e a utilização de implementos com carga elevada sobre o solo.

## Indicadores da qualidade física do solo

Os indicadores de qualidade do solo devem ser de fácil obtenção e que possam informar as mudanças que ocorrem e, por sua vez, passíveis de uso por qualquer pessoa.

O local e a frequência de medição serão dependentes do objetivo do estudo e do uso do solo. O número de amostras ou medições dependerá da variabilidade do local amostrado, de modo que se tenha uma boa representatividade. Outros fatores de relevância são o tipo e a umidade de solo, sinais de erosão, manejo, declividade, topografia, clima e cultura implantada.

Os indicadores físicos da qualidade do solo devem estar relacionados ao arranjo estrutural das partículas sólidas e à porosidade e refletir, limitações no desenvolvimento radicular, emergência de plântulas, movimento de água no perfil e, conseqüentemente, a potencialidade produtiva. Associados a esses fatores devem revelar alterações estruturais provocadas pela adoção de determinado sistema de manejo, assim como problemas relacionados à compactação, ao encrostamento superficial e à susceptibilidade à erosão.

Os indicadores usualmente utilizados são a densidade, a porosidade, a estabilidade de agregados e a resistência mecânica do solo à penetração.

Precauções na escolha de indicadores físicos deverão ser consideradas. Estudo como o de Schipper e Sparling (2000) mostra que alguns indicadores como, por exemplo, a condutividade hidráulica apresenta alta variabilidade dos dados (48%), o que implicaria a necessidade de um grande número de amostras (147 amostras de cada área estudada) para que o grau de confiabilidade desta medição fosse em torno de 90%. A mesma tendência foi mostrada para a macroporosidade. Estes mesmos autores afirmam que embora uma alta variabilidade seja encontrada, estes indicadores poderão ser úteis na avaliação da qualidade do solo. O fato de não encontrar

diferenças significativas nos valores de condutividade hidráulica entre diferentes sistemas de uso do solo pode estar, portanto, relacionado a uma alta variabilidade espacial encontrada nas medidas de campo, que, de acordo com Warrick e Nielsen (1980), pode ser de até 420%. Resultados similares foram obtidos por Lima et al. (2002), sendo encontrado mais de 100% de variabilidade na condutividade hidráulica em campo natural comparado a sistemas convencionais de manejo de cultivo de arroz em um Planossolo.

## Densidade do solo

É um parâmetro físico que reflete o arranjo das partículas de solo e que, por sua vez, define características do sistema poroso. Varia com a profundidade no perfil, com a textura, a natureza, o tamanho e a forma das partículas e com fatores externos e ambientais. Representa a relação entre a massa de solo seco e o seu volume, sendo expressa normalmente em  $\text{Mg m}^{-3}$ .

A quantificação da densidade é feita conforme Blake & Hartge (1986). Consiste na utilização de cilindros metálicos (anéis) de volume conhecido, os quais são inseridos no solo com auxílio de um martelo pedológico (Figura 2a). Posteriormente a retirada das amostras de solo, que pode ser feita com equipamentos variados (Figura 2b), retira-se com faca ou estilete possíveis sobras de solo ao redor do cilindro (Figura 2c), permitindo com que o volume do cilindro seja o mesmo do solo. Finalmente, o solo é seco em estufa a  $105^{\circ}\text{C}$  por aproximadamente 48 horas e a densidade pode ser quantificada pela relação entre a massa do solo seco (Mg) e o seu volume ( $\text{m}^3$ ).



**Figura 2.** Procedimento utilizado na inserção (a) e na retirada (b) de amostras de solo (c) para determinação da densidade e da porosidade do solo.

## Porosidade do solo

É um parâmetro variável pelos mesmos fatores apontados no item densidade do solo. Representa o volume de solo ocupado por ar e água, ou seja, quantifica a fração do volume total do solo ocupado por poros ou o espaço do solo não ocupado por partículas sólidas.

Em função do diâmetro, os poros podem ser classificados em macro e microporos, os quais apresentam, respectivamente, diâmetro superior e inferior a aproximadamente 0,05 mm. Os macroporos promovem a circulação de água no solo. Os microporos são responsáveis pela retenção de água. A quantidade e a qualidade do espaço poroso são determinadas pela forma, pelo tamanho, pela quantidade e pelo arranjo das partículas sólidas. Sob o ponto de vista agrícola, a porosidade exerce importância dentre outros fatores na estimativa da infiltração, da drenagem e do movimento de água e crescimento de raízes.

A determinação pode ser feita por métodos indiretos ou diretos. Indiretamente é feita a partir da densidade do solo ( $D_s$ ) e de partículas ( $D_p$ ) pela expressão matemática:  $1 - (D_s/D_p)$ , e diretamente, conforme Embrapa (1997), utilizando os mesmos cilindros para a determinação da densidade do solo, através do uso de uma mesa de tensão com a finalidade de drenar os poros existentes em amostras saturadas, baseando-se em uma energia de retenção de água de 0,60 m (Figura 3). A macroporosidade é calculada pela diferença de umidade entre o solo saturado e drenado a 0,60 m. A microporosidade é avaliada a partir da diferença de umidade de solo drenado a 0,60 m e seco em estufa a 105°C. Pela soma da quantidade de macroporos e de microporos é quantificada a porosidade total do solo.

Fotos: C. L. R. Lima



**Figura 3.** Amostras de solo em uma mesa de tensão para a avaliação da macroporosidade, da microporosidade e da porosidade total.

## Estabilidade de agregados do solo

A agregação refere-se à ligação entre as partículas primárias do solo, resultante da ação de agentes cimentantes e de forças coesivas. Dentre os agentes cimentantes, citam-se o efeito da matéria orgânica dos óxidos de ferro e de alumínio e de minerais de argila. A quantificação é feita a partir da medição de agregados estáveis retidos em peneiras de malha com diferentes diâmetros. A estabilidade de agregados pode ser

determinada por via úmida, com a utilização de um equipamento de oscilação vertical de Yoder (1936) (Figura 4) ou por via seca, ambas segundo Kemper e Rosenau (1986) (Figura 5). O princípio baseia-se na determinação da distribuição de agregados do solo estáveis retidos em cada classe ou diâmetro de malha de peneira. Esta determinação permite inferir sobre a infiltração, a resistência à erosão e o encrostamento superficial do solo.

Fotos: C. L. R. Lima



**Figura 4.** Vista superior do equipamento utilizado na avaliação da agregação do solo por via úmida.

Fotos: C. L. R. Lima



**Figura 5.** Peneiras com diferentes malhas de diâmetro (4,76; 2,00; 1,00; 0,50 e 0,25 mm) utilizadas na avaliação da estabilidade de agregados do solo estáveis por via úmida e por via seca.

## Resistência mecânica do solo à penetração

A determinação baseia-se na utilização de penetrômetro de impacto ou eletrônico, que fundamenta-se no princípio da inserção no solo de uma haste metálica e graduada pelo deslocamento vertical a uma distância conhecida. Os dados coletados no campo em impactos  $\text{dm}^{-1}$  são transformados em unidades de resistência ( $\text{kgf cm}^{-2}$ ), utilizando-se a equação descrita por Stolf (1991):  $R = 5,6 + 6,89N$ , em que:  $N$  = número de impactos  $\text{dm}^{-1}$ ;  $R$  = resistência do solo ( $\text{kgf cm}^{-2}$ ). Os resultados da resistência do solo obtidos em  $\text{kgf cm}^{-2}$  são convertidos em MPa, considerando que  $1 \text{ kgf cm}^{-2}$  corresponde a 0,098 MPa.

Equipamentos mais sofisticados, como os penetrômetros digitais apresentam maior praticidade, pois permitem o armazenamento eletrônico da RP em camadas ou profundidade de solo.

A avaliação da RP é dependente da umidade do solo, portanto, independente do tipo de equipamento utilizado, sugere-se que seja feito o acompanhamento da umidade gravimétrica do solo.

Alguns equipamentos utilizados para avaliação da resistência a penetração são mostrados nas Figuras 6a (penetrômetro de impacto), 6b, 6c e 6d (penetrômetros eletrônicos).



**Figura 6.** Penetrômetros utilizados na avaliação da resistência do solo à penetração: (a) de impacto (campo); (b, c) penetrômetro eletrônico (campo e laboratório) e (d) eletrônico (laboratório).

## Considerações finais

O solo é um dos mais importantes recursos naturais e deve ser utilizado de forma sustentada e equilibrada que não venha a prejudicar a sua utilização em gerações futuras.

A capacidade produtiva do solo e, por sua vez, a qualidade, são dependentes da interação de parâmetros físicos, químicos e biológicos.

Indicadores físicos descritos nesse documento, como a quantificação da densidade, da porosidade, da agregação e da resistência do solo à penetração, revelam grande importância no monitoramento da qualidade do solo. O monitoramento da qualidade do solo deve ser um processo rotineiro na agricultura visando, portanto, a busca por atividades conservacionistas e sustentáveis.

## Referências

BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk density. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy: Soil Science Society of America, 1986. p. 363-375.

CANARACHE, A. PENETR - A generalized semi-empirical model estimating soil resistance to penetration. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 51-70, 1990.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Ed.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: Soil Science Society of America: American Society of Agronomy, 1994. p. 3-21. (Soil Science Society of America Journal, Special Publication, 35).

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Quantitative indicators of soil quality: A minimum data set. In: DORAN, J. W.; JONES, A. J. (Ed.) **Methods for Assessing Soil Quality**. Madison: Soil Society of America, 1996. p. 25-37.

EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. atual. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 1997. 212 p.

GOVAERTS, B.; SAYRE, K.D.; DECKERS, J. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 87, p. 163-174. 2006.

LARSON, W. E.; PIERCE, F. J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Ed.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Soil Science Society of America: American Society of Agronomy, 1994. p. 37-51.

KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R.F.; SCHUMMAN, G.E. Soil quality: A concept, definition and Framework for evaluation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 4-10, 1997.

KEMPER, W.D.; ROSENAU, R.C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. (Ed.) **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy, 1986. p. 425-443.

LIMA, A. C. R.; PAULETTO, E. A.; LIBARDI, P. L.; GOMES, A. S. Hydraulic characterization of a lowland soil under long-term management system. **Advances in Geocology**, Holanda, v. 35, p. 247-257, 2002.

LIMA, C. L. R.; REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; SUZUKI, L. E. A. S.; DALBIANCO, L. Densidade crítica ao crescimento de plantas considerando água disponível e resistência à penetração de um Argissolo Vermelho distrófico arênico. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 4, p. 1166-1169, 2007.

REICHERT, J. M.; REINERT, D. J.; BRAIDA, J. A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Revista Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v. 27, p. 29-48, 2003.

SCHIPPER, L. A.; SPARLING, G. P. Performance o soil condition indicators across taxonomic groups and land uses. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, p. 300 - 311, 2000.

SHUKLA, M. K.; LAL, R.; EBINGER, M. Determining soil quality indicators by factor analysis. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 87, p. 194-204, 2006.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de formação e transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, p. 229-235, 1991.

TAYLOR, H. M.; ROBERTSON, G. M.; PARKER, J. J. Soil strength root penetrations for medium to coarse textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v. 102, p. 18-22, 1966.

WANDER, M. M.; BOLLERO, G. A. Soil quality assessment of tillage impact in Illinois. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 63, p. 961-971, 1999.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spacial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. p. 319-344.

YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. **Journal of the American Society of Agronomy**, Geneva, v. 28, p. 337-351, 1936.





*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária*  
*Centro de Pesquisa Agropecuária de Clima Temperado*  
*Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*  
*BR 392 km 78 - 96001-970 Pelotas RS Cx. Postal 403*  
*Fone (53) 3275-8100 Fax (53) 3275-8221*  
*[www.cpact.embrapa.br](http://www.cpact.embrapa.br)*  
*[sac@cpact.embrapa.br](mailto:sac@cpact.embrapa.br)*



**Ministério da  
Agricultura, Pecuária  
e Abastecimento**

