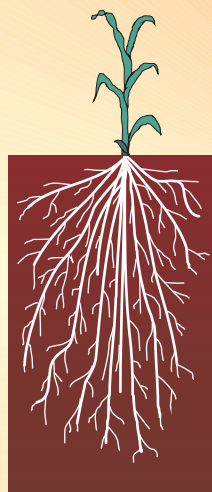


## Compactação do Solo: conseqüências para o Crescimento Vegetal



Solo sem impedimentos



Operações de  
revolvimento do solo



Solo compactado  
Pé-de-grade



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

ISSN 1517-5111

Abril, 2005

## ***Documentos 136***

# **Compactação do Solo: conseqüências para o crescimento vegetal**

Marcos Aurélio Carolino de Sá  
João de Deus Gomes dos Santos Junior

Planaltina, DF  
2005

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

**Embrapa Cerrados**

BR 020, Km 18, Rod. Brasília/Fortaleza

Caixa Postal 08223

CEP 73310-970 Planaltina - DF

Fone: (61) 3388-9898

Fax: (61) 3388-9879

<http://www.cpac.embrapa.br>

[sac@cpac.embrapa.br](mailto:sac@cpac.embrapa.br)

**Comitê de Publicações**

Presidente: *José de Ribamar N. dos Anjos*

Secretária-Executiva: *Maria Edilva Nogueira*

Supervisão editorial: *Maria Helena Gonçalves Teixeira*

Revisão de texto: *Maria Helena Gonçalves Teixeira*

Normalização bibliográfica: *Shirley da Luz Soares*

Capa: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Editoração eletrônica: *Leila Sandra Gomes Alencar*

Impressão e acabamento: *Divino Batista de Souza*  
*Jaime Arbués Carneiro*

**1ª edição**

1ª impressão (2005): tiragem 100 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).

CIP-Brasil. Catalogação na publicação.  
Embrapa Cerrados.

---

S111c Sá, Marcos Aurélio Carolino de.

Compactação do solo: conseqüências para o crescimento vegetal /  
Marcos Aurélio Carolino de Sá, João de Deus Gomes dos Santos Junior.  
– Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2005.  
26 p.— (Documentos / Embrapa Cerrados, ISSN 1517-5111; 136)

1. Compactação do solo. 2. Planta. 3. Crescimento. I. Santos Junior,  
João de Deus Gomes dos. II. Título. III. Série.

631.4 - CDD 21

---

© Embrapa 2005

# **Autores**

**Marcos Aurélio Carolino de Sá**

Eng. Agrôn. Dr., Embrapa Cerrados  
carolino@cpac.embrapa.br

**João de Deus Gomes dos Santos Junior**

Eng. Agrôn., Dr., Embrapa Cerrados  
jdsantos@cpac.embrapa.br

# Apresentação

Com este trabalho, os autores pretenderam discorrer sobre a compactação do solo em linguagem simples e objetiva, direcionada não apenas a pesquisadores, mas também a agricultores, extensionistas, estudantes e técnicos. Ao longo do texto, foram abordados temas como os fatores diretos e indiretos que afetam o crescimento de plantas; camadas compactadas no solo, desde sua identificação por métodos simples de campo até sua caracterização, com base nos métodos disponíveis, como avaliação do grau de compactação e penetrometria. Finalmente, teceram-se alguns comentários sobre a relação entre compactação e disponibilidade de água no solo, com base em intervalo hídrico ótimo e sugestões sobre as prioridades de pesquisa na área.

*Roberto Teixeira Alves*

Chefe-Geral da Embrapa Cerrados

# Sumário

Introdução .....	9
Fatores que Afetam o Crescimento de Plantas .....	10
Fatores diretos .....	10
Fatores indiretos .....	11
Camadas Compactadas no Solo .....	12
Identificação de Camadas Compactadas .....	14
Método alternativo .....	14
Avaliação da densidade, densidade relativa e grau de compactação ..	15
Penetrometria .....	17
Resistência à Penetração .....	20
Redefinição da disponibilidade de água .....	21
Considerações Finais .....	23
Referências .....	24
Abstract .....	26

# Compactação do Solo: conseqüências para o crescimento vegetal

---

*Marcos Aurélio Carolino de Sá*

*João de Deus Gomes dos Santos Junior*

## Introdução

Dos 207 milhões de ha do Cerrado, cerca de 139 milhões apresentam aptidão para exploração agropecuária. Destes, estima-se que 14 milhões estejam ocupados com culturas anuais, 50 milhões com pastagens cultivadas e 3,5 milhões com culturas perenes. Potencialmente cultiváveis restam, aproximadamente, 71,5 milhões de ha. Nos anos mais recentes, tem-se verificado forte pressão sobre os recursos naturais, sobretudo o solo, em virtude do crescimento populacional e aumento da demanda por alimentos, energia e fibras. A necessidade de intensificar a produção de maneira competitiva - o que nem sempre acontece de maneira sustentável - tem resultado na utilização de máquinas cada vez maiores e mais potentes, muitas vezes desconsiderando as características de cada solo ou mesmo o teor de água adequado para o preparo - zona de friabilidade - agravando os problemas de compactação.

Em sistemas de sequeiro, camadas compactadas aumentam a susceptibilidade das culturas a veranicos, resultando em menor produtividade, ao passo que em sistemas irrigados, a compactação do solo aumenta a necessidade de água para as culturas (i.e. redução do turno de rega). Isso requer maior consumo de água e de energia, bens cada vez mais escassos. Áreas de pastagens, por sua vez, vêm sofrendo degradação devido ao manejo inadequado dos animais e da fertilidade do solo. Além das conseqüências econômicas, há que se considerar também o custo ambiental: a compactação predispõe o solo à erosão, pois, com a degradação da sua estrutura, ocorre diminuição da infiltração de água e aumento

do escoamento superficial e, nos casos mais drásticos, o rompimento de terraços, resultando em perdas de água e solo e, conseqüentemente, assoreamento e poluição de cursos d'água.

A caracterização de camadas compactadas num perfil de solo nem sempre é fácil. Atualmente, têm-se usado métodos empíricos, como a abertura de trincheiras ou mesmo ensaios de resistência à penetração e avaliações de densidade, mas é necessário o conhecimento (nem sempre disponível) de uma série de outros fatores associados ao solo e ao crescimento de plantas para sua correta interpretação. No estágio atual de conhecimento, a avaliação de propriedades e características físicas do solo que afetam indiretamente o crescimento de plantas (textura, agregação, densidade e porosidade do solo) muito pouco contribui para o entendimento de seus efeitos no crescimento vegetal, caso as relações com fatores que afetam diretamente esse crescimento (energia de retenção da água pelo solo, aeração, resistência à penetração, temperatura) não sejam estabelecidas.

Nesta publicação, são abordados os fatores que afetam o crescimento de plantas com ênfase na relação compactação e disponibilidade hídrica.

## **Fatores que Afetam o Crescimento de Plantas**

As considerações sobre os fatores que afetam o crescimento de plantas são baseadas em [Letey \(1985\)](#).

### **Fatores diretos**

Os fatores que diretamente afetam o crescimento vegetal são conteúdo de água, taxa de difusão de oxigênio, temperatura e resistência mecânica que o solo oferece à emergência de plântulas e ao crescimento radicular, esta última, diretamente relacionada com o grau de compactação do solo.

A água é fundamental para o crescimento vegetal. Entretanto, mais importante do que o seu conteúdo é o seu potencial no solo, ou seja, a energia com que o solo retém a água e que, conseqüentemente, será a energia necessária para que esta água seja removida pelas raízes. Diferentes tipos de solo retêm diferentes conteúdos de água a um dado potencial, em função de sua textura, mineralogia e teores de matéria orgânica. Contudo, há uma relação entre o potencial e o



conteúdo de água que é específica para cada solo, sendo possível determinar o conteúdo de água e inferir o potencial a que essa água está retida, desde que a curva característica de retenção de água para o referido solo seja conhecida.

As raízes respiram, consumindo oxigênio e emitindo gás carbônico. Para que o metabolismo vegetal seja adequado, são necessárias trocas gasosas entre as raízes e a atmosfera, fenômeno denominado aeração do solo, associado à porosidade e à continuidade dos poros.

O crescimento vegetal também é influenciado pela temperatura, que afeta a germinação de sementes, o desenvolvimento de raízes e das plantas, a atividade microbiana, a difusão de solutos e gases, as reações químicas e uma série de processos relevantes ocorridos no solo.

Finalmente, o crescimento vegetal é diretamente afetado pela resistência mecânica que o solo oferece ao crescimento de raízes e aumenta com o grau de compactação do solo. Essa resistência tem sido avaliada com o uso de penetrômetros.

Sendo assim, surge uma questão: Qual o valor ótimo de cada um desses fatores para a produção vegetal? A resposta dessa questão é bastante complexa, pois alguns desses fatores variam tanto no tempo quanto no espaço (e também ao longo do perfil do solo), como a disponibilidade de água que varia em função da precipitação pluvial, irrigação e evapotranspiração. A taxa de difusão de oxigênio também muda em função do conteúdo de água no solo, do mesmo modo que a resistência mecânica à penetração de raízes que é menor em condições de maior teor de água. Soma-se a isso o fato de que diferentes espécies vegetais respondem de maneira distinta a esses fatores, sendo que, para uma mesma espécie ou variedade, essa resposta também pode variar ao longo do ciclo da planta.

## **Fatores indiretos**

Entre os fatores que afetam indiretamente o crescimento radicular, podem-se citar a densidade do solo, a textura, a estrutura, a estabilidade de agregados e a distribuição do tamanho de poros. Esses fatores estão associados com a disponibilidade de água, aeração, temperatura e resistência mecânica à penetração das raízes. Entre os quatro fatores que afetam diretamente o crescimento das plantas, o conteúdo de água é o dominante e controlador dos

outros três, como ilustrado na Figura 1. Assim, o efeito da água na resistência à penetração do solo, aeração e temperatura pode ser intensificado pelo aumento na densidade do solo. Entretanto, essas relações ainda não estão bem estabelecidas para solos tropicais, sobretudo, os do Bioma Cerrado.



**Figura 1.** Representação esquemática das relações entre o conteúdo de água e outros atributos do solo que afetam diretamente o crescimento das plantas.

Fonte: adaptado de [Letey \(1985\)](#).

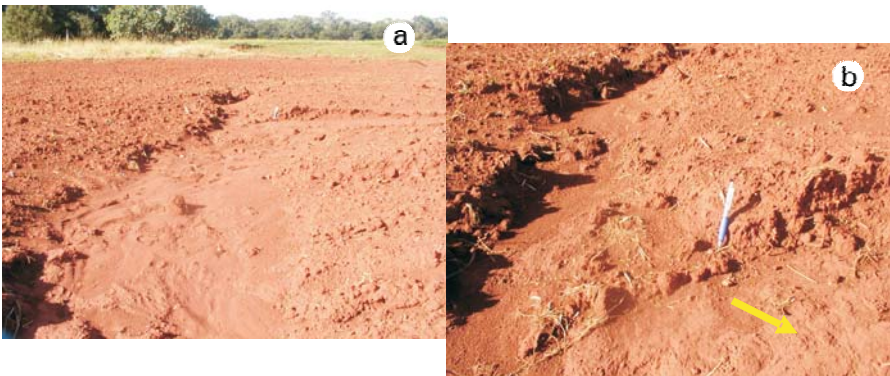
## Camadas Compactadas no Solo

Compactação é o processo pelo qual as partículas do solo e agregados são rearranjados, tendo estes últimos suas forma e tamanho alterados. Esse rearranjo resulta no decréscimo do espaço poroso e aumento da densidade ([HAMZA; ANDERSON, 2005](#)). A compactação é causada pela ação do homem ao manejar o solo utilizando máquinas e implementos de maneira inadequada. Difere do adensamento, pois, esse rearranjo de agregados e partículas com conseqüente aumento da densidade ocorre devido a causas naturais nos processos de formação do solo, como, por exemplo, em horizontes B texturais, fragipans e duripans. A compactação altera uma série de fatores que afeta o crescimento radicular, como aeração, retenção de água, resistência à penetração de raízes podendo, inclusive, aumentar a susceptibilidade do solo à erosão, como será discutido a seguir.

Cerca de 90% da água disponível para as plantas está retida entre as tensões de 6 a 100 kPa. Apenas 24 mm de água são disponíveis na camada de 0 a 30 cm de solo nos Latossolos e somente 9 mm nos Neossolos Quartzarênicos, (solos predominantes no Bioma Cerrado, sendo os primeiros de textura média a argilosa

e os últimos de textura arenosa), quantidades essas insuficientes para contrapor às altas taxas de evapotranspiração em períodos de veranicos muito freqüentes durante a estação chuvosa na região do Cerrado (RESCK; SILVA, 1990). Com a compactação desses solos, a quantidade de água disponível tende a diminuir (SILVA; KAY, 1997), devido à deterioração da estrutura. Nesse contexto, quando a compactação atinge níveis críticos, esta assume relevância nas relações físicas, químicas e biológicas do solo que afetam o crescimento de plantas, resultando em menor produtividade além de predispor o solo à erosão pela redução da porosidade e infiltração, o que aumenta o escoamento superficial (Figura 2).

A compactação do solo pode ser um sintoma decorrente do manejo que pode influenciar a resistência à penetração de maneira diferenciada no perfil. Em sistemas convencionais de preparo de solo, o revolvimento excessivo pode causar compactação subsuperficial, (também chamada de pé-de-grade ou pé-de-arado dependendo do implemento utilizado), impedindo o crescimento das raízes em profundidade, tornando as plantas mais susceptíveis a veranicos ou mesmo causando deficiência de oxigênio em condições de excesso de chuvas. Em sistema de plantio direto, o solo pode apresentar compactação próxima à superfície, devido ao trânsito de máquinas agrícolas nas operações de plantio, pulverização e colheita. Em áreas de pastagem, semelhante ao plantio direto, também é comum observar uma camada compactada nos primeiros 10 cm de profundidade em decorrência do pisoteio dos animais.



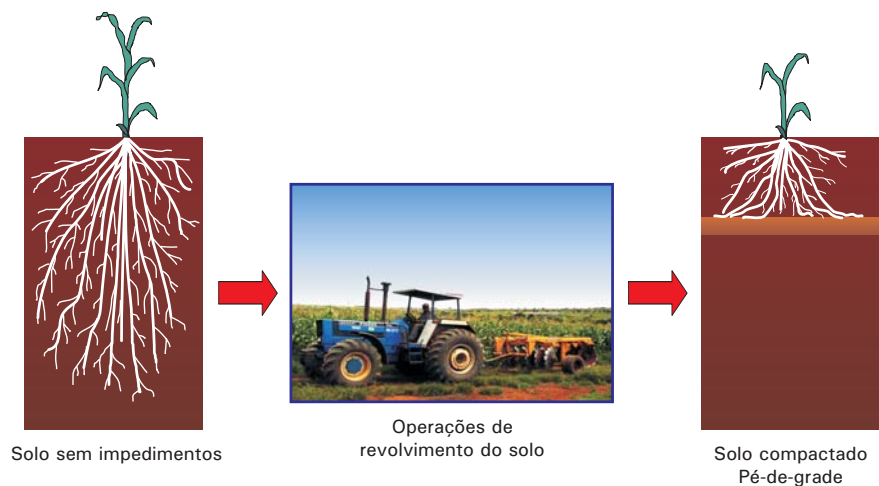
**Figura 2.** Sulco de erosão em área compactada (a) e detalhe do sulco de erosão, mostrando a ocorrência do pé-de-grade (seta) (b).

## Identificação de Camadas Compactadas

### Método alternativo

A maneira mais simples de se identificar camadas compactadas no campo é a abertura de trincheiras e a observação do sistema radicular, principalmente, quando se trata de compactação subsuperficial ou pé-de-grade. Nesse caso, quando a compactação limita o crescimento radicular, é possível observar grande concentração de raízes na camada superficial, pois elas não conseguem ultrapassar a camada compactada, o que predispõe a cultura a veranicos (Figura 3). Ao se cutucar a parede da trincheira com uma faca ou canivete, é possível constatar maior resistência do solo na camada compactada.

Entretanto, esse método apresenta limitações uma vez que possibilita apenas identificar uma camada compactada sem, contudo, caracterizá-la. Ou seja, não é possível definir qual o grau de compactação e o quanto este estaria afetando o crescimento e a produtividade da cultura, bem como decidir com segurança sobre a necessidade de alguma operação motomecanizada para descompactação do solo. Tais operações são, em geral, bastante dispendiosas, como a subsolagem, por exemplo.



**Figura 3.** Representação esquemática de pé-de-grade e comportamento do sistema radicular.

## Avaliação da densidade, densidade relativa e grau de compactação

A densidade é um atributo freqüentemente utilizado para se caracterizar a compactação do solo. Entretanto, é complicado relacionar a densidade do solo com o crescimento vegetal uma vez que valores de densidade variam de solo para solo, principalmente, em função de sua textura. Solos arenosos apresentam valores de densidade naturalmente mais elevados em relação a solos argilosos. Como exemplo, podemos citar uma densidade de  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ , que em um solo argiloso pode significar um elevado grau de compactação, enquanto em um solo arenoso, pode significar solo solto.

Para resolver esse problema, esforços têm sido conduzidos no intuito de encontrar atributos que eliminem as diferenças entre solos quanto ao crescimento das culturas. É o caso da densidade relativa, descrita por [Håkansson e Lipiec \(2000\)](#) como uma relação entre a densidade atual do solo e uma densidade de referência (Equação 1) e do grau de compactação ([DIAS JUNIOR, 1996](#)), ou seja, a densidade relativa expressa em porcentagem em que a densidade de referência é considerada como a máxima compactação suportada pelo solo. A densidade de referência pode ser obtida em um ensaio de compressão uniaxial, a uma pressão de 200 kPa ([HÅKANSSON, 1990](#)) ou em um ensaio de Proctor standard ([DIAS JÚNIOR, 1996](#)). Nesses ensaios, o solo é compactado em condições padronizadas, obtendo-se uma densidade mais elevada que é a densidade de referência. Interessante observar que, no ensaio de Proctor, obtêm-se densidades de referência mais elevadas, sendo, entretanto, mais simples e de custo mais baixo quando comparado ao ensaio de compressão uniaxial ([HÅKANSSON; LIPIEC, 2000](#)).

$$D_{sr} = \frac{D_s}{D_{smáx}} \quad (1)$$

onde:

$D_{sr}$  é a densidade relativa;

$D_s$  é a densidade atual do solo;

$D_{smáx}$  é a densidade máxima, obtida em amostra compactada no ensaio de compressão uniaxial ou no ensaio de Proctor.

O conceito de grau de compactação é bastante antigo, sendo utilizado pela engenharia civil na construção de aterros e na pavimentação de estradas ([BRASIL, 2005](#)), sendo recentemente aplicado ao estudo da compactação em solos agrícolas e sua relação com o crescimento e produtividade das culturas ([ALVES et al., 2003](#); [SANTOS et al., 2005](#)). Outro conceito que também poderia ser relacionado com o crescimento de plantas é a Razão de Compactação, calculada com base na densidade do solo - equação 2 - ([BRASIL, 2005](#)) ou com base no volume de poros - equação 3 - ([WILEY; STARZEWSKI, 1972](#)), também chamada por estes autores de índice de densidade.

$$RC\% = \frac{Ds - Dsmin}{Dsmáx - Dsmin} \times 100 \quad (2)$$

onde:

*RC* é a razão de compactação do solo (%);

*Ds* é a densidade atual do solo;

*Dmín.* é a densidade mínima do solo (no estado solto);

*Dsmáx.* é a densidade máxima, obtida em amostra compactada no ensaio de compressão uniaxial ou ensaio de Proctor.

$$RC\% = \frac{VPmáx - VPatual}{VPmáx - VPmín} \times 100 \quad (3)$$

onde:

*RC* é a razão de compactação do solo (%);

*Vpmáx.* é o volume de poros máximo do solo, (no estado solto);

*VPatual* é o volume de poros atual do solo;

*Vpmín.* é o volume de poros mínimo, determinado em amostra compactada no ensaio de compressão uniaxial ou ensaio de Proctor.

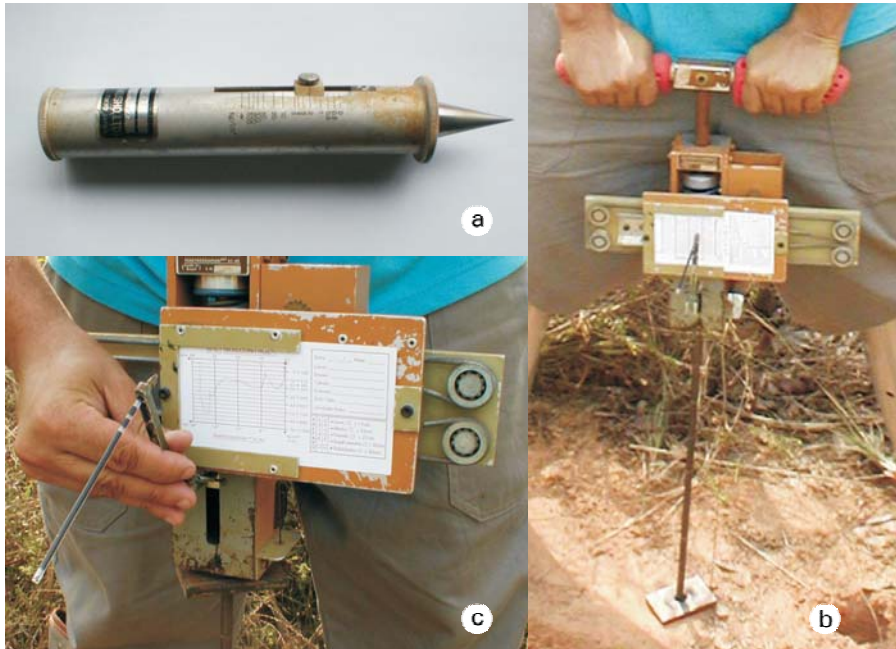
Segundo [Håkansson e Lipiec \(2000\)](#), a densidade relativa isola o efeito da textura na densidade do solo, permitindo comparar solos de diferentes texturas quanto ao grau de compactação. [Håkansson \(1990\)](#) verificou que a produção ótima de cevada ocorreu em densidade relativa de 0,87, em solos com diferentes texturas e conteúdos de matéria orgânica, variando com a distribuição de chuvas de cada ano, na média de 100 experimentos de campo com cevada.

Por sua vez, pesquisas realizadas no Brasil, mais especificamente em Minas Gerais, levaram à conclusão de que o efeito do grau de compactação na produtividade das culturas depende da textura e da classe do solo, sendo que, em alguns solos, a produtividade pode aumentar com o incremento do grau de compactação até certo nível, quando começa a decrescer (comportamento quadrático), enquanto em outros solos, o aumento no grau de compactação reduz a produtividade linearmente. [Alves et al. \(2003\)](#) observaram que, em um Latossolo Vermelho-Amarelo textura argilosa, a produtividade de matéria seca do feijoeiro apresentou comportamento quadrático, aumentando até um grau de compactação de 70% (ou  $Dsr = 0,7$ ) e diminuindo a partir desse valor, enquanto, em um Latossolo Vermelho distroférico, a produtividade de matéria seca apresentou redução linear, em função do aumento do grau de compactação.

[Santos et al. \(2005\)](#) constataram comportamento quadrático para a produção de matéria seca do milho em função do grau de compactação em três solos, sendo que a máxima produção, a partir da qual ocorre redução, aconteceu em grau de compactação 72% em um solo arenoso (Neossolo Quartzarênico, 49 g kg<sup>-1</sup> de argila), entre 75% e 77% para um Latossolo Vermelho-Amarelo, textura média (326 g kg<sup>-1</sup> de argila) e 65% para um Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura argilosa (356 g kg<sup>-1</sup> de argila).

## Penetrometria

Outra maneira de se identificar e caracterizar camadas compactadas é com o uso de penetrômetros ou penetrógrafos. A resistência mecânica que o solo oferece a esses equipamentos apresenta correlação com a resistência oferecida ao sistema radicular. Entretanto, esses equipamentos apenas simulam a resistência ao crescimento de raízes uma vez que elas podem crescer através de poros, fendas ou mesmo canais abertos pela fauna do solo, enquanto os penetrômetros literalmente rompem o solo, vencendo sua resistência. Os penetrômetros são mais simples, permitindo avaliações pontuais de resistência à penetração, ao passo que os penetrógrafos registram a resistência ao longo do perfil em gráficos ([Figura 4](#)), apresentando, entretanto, o mesmo princípio de funcionamento. Esses equipamentos podem ser de vários tipos, como os de impacto, os de mola ou dinamométricos e os digitais que utilizam células de carga.



**Figura 4.** Equipamentos utilizados para determinação da resistência à penetração: Penetrômetro dinamométrico de bolso (a); Penetrógrafo dinamométrico (b). Detalhe do registro da resistência à penetração pelo penetrógrafo (c).

Em todos os casos, eles apresentam uma haste com ponta de formato cônico cujo ângulo é padronizado ([Figura 5](#)), sendo a resistência à penetração expressa pelo índice de cone que nada mais é do que uma unidade de pressão, ou seja, a força registrada pela mola ou célula de carga (kg) dividida pela área da base do cone, expressa em  $\text{kg cm}^{-2}$ , kPa (kilopascal) ou MPa (megapascal), sendo a última unidade a mais utilizada em trabalhos científicos. No caso de penetrômetros de impacto, são utilizadas fórmulas para conversão do número de impactos em unidades de pressão, conforme [Stolf \(1991\)](#).

Penetrômetros de bancada são utilizados para determinação da resistência à penetração em amostras indeformadas de solo (anéis volumétricos) em que é possível obter rigoroso controle do teor de água da amostra durante a realização dos ensaios. Na Embrapa Cerrados, está sendo desenvolvido um protótipo de penetrômetro de bancada dinamométrico de baixo custo e fácil operação ([Figura 6](#)).



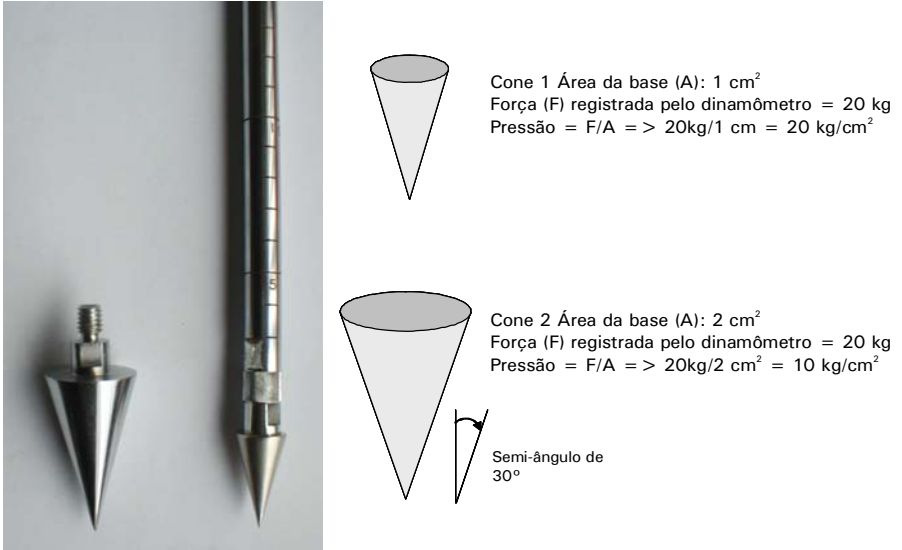


Figura 5. Exemplos de pontas e cálculo do índice de cone.

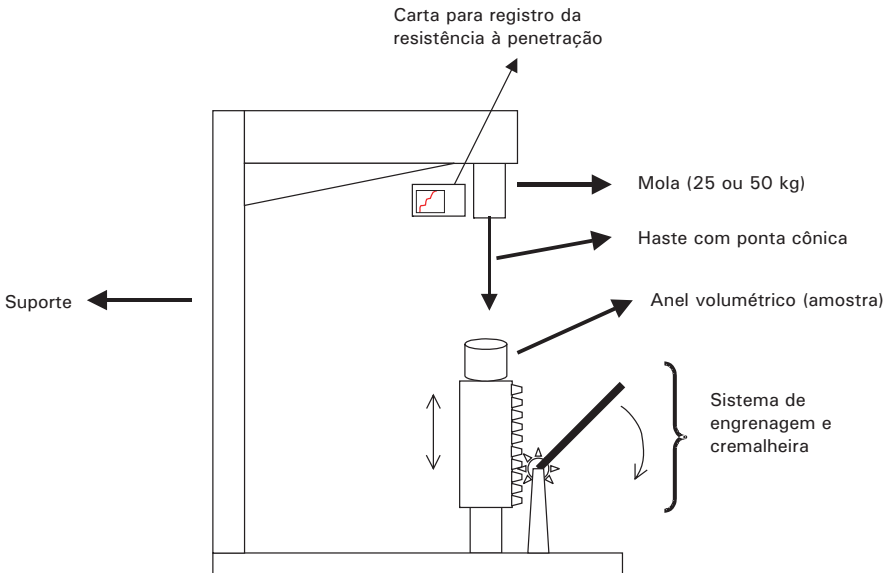
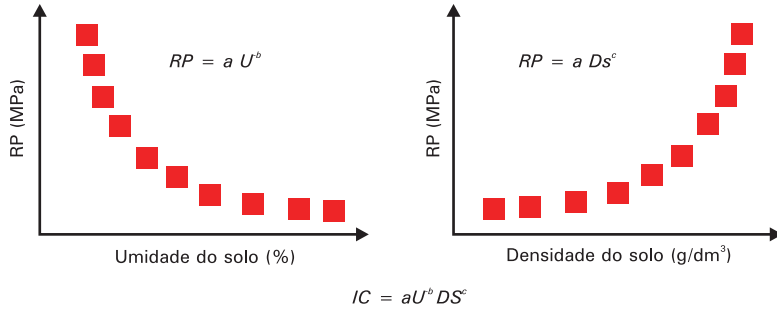


Figura 6. Esquema do penetrômetro dinamométrico de bancada.

Têm sido considerados como limitantes ao crescimento radicular os valores de 2,0 MPa para culturas anuais; 2,5 MPa para pastagens; e 3,0 MPa para espécies arbóreas. Entretanto, esses valores são apenas uma referência, uma vez que podem variar de cultura para cultura e numa mesma cultura, entre variedades ou cultivares, sendo necessários ainda mais estudos nesse sentido. Outra limitação à utilização de penetrometria na fazenda é o índice de cone que varia num mesmo solo em função da densidade e da umidade, sendo que medições realizadas com o solo seco podem fornecer índices de cone bastante elevados, dando um falso diagnóstico de compactação, pois na mesma condição, os valores podem ser muito baixos estando o solo úmido, conforme será discutido mais adiante.

## **Resistência à Penetração**

A caracterização da compactação do solo com base em penetrometria e sua relação com o crescimento de raízes apresentam limitações, pois a resistência à penetração expressa pelo índice de cone (IC) varia em função do teor de água, densidade do solo, teor de argila e matéria orgânica ([BUSSCHER et al., 1997](#); [IMHOFF et al., 2000](#)). O aumento do teor de água diminui o IC, devido ao efeito lubrificante da água ao redor das partículas de solo, enquanto o aumento da densidade - resultado da compactação e degradação da estrutura - aumenta esse índice. No caso da textura, solos muito argilosos apresentam maior IC, por que há maior coesão entre as partículas, enquanto a matéria orgânica influencia por estar relacionada à agregação e à estruturação do solo. Sendo o IC alterado por tantos fatores, alguns autores têm proposto modelos empíricos para descrevê-lo, sendo o mais utilizado o de [Busscher \(1990\)](#) que propôs uma relação potencial do IC com o teor de água e a densidade:  $IC = a\theta^{-b} Ds^c$ , onde  $\theta$  é o teor de água no solo;  $Ds$  é a densidade,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são parâmetros da regressão que variam de solo para solo. Sendo assim, o índice de cone diminui potencialmente com o aumento da umidade do solo e aumenta potencialmente com a densidade ([Figura 7](#)). Uma vez estabelecida essa relação, ela será válida para um solo específico ou solos com textura, mineralogia e teores de matéria orgânica semelhantes. Um problema é que a maioria das informações disponíveis na literatura diz respeito a solos de clima temperado ou a regiões brasileiras que não pertencem ao Bioma Cerrado.



**Figura 7.** Representação esquemática da resistência à penetração (Índice de cone) em função da umidade e da densidade do solo.

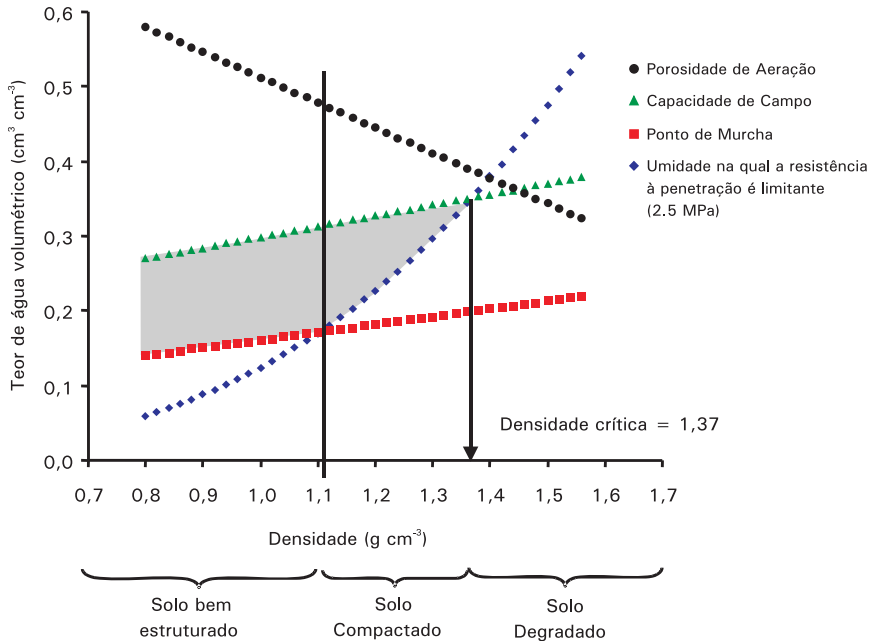
Quanto à relação entre o IC e o crescimento radicular, esta depende da espécie vegetal ou mesmo da cultivar em estudo. Valores de 2 MPa foram citados por [Spivey et al. \(1986\)](#) como limitantes, enquanto [Unger e Kaspar \(1994\)](#) relataram valores de 2,5 MPa. [Beutler e Centurion \(2003\)](#) constataram que a produção de grãos de soja é reduzida em valores de IC entre 1,66 MPa e 3,05 MPa, dependendo da cultivar utilizada. Portanto, sendo esse índice variável em função da densidade e da umidade, a interpretação de uma simples avaliação de resistência à penetração, feita no campo, requer o conhecimento de uma série de atributos do solo e suas inter-relações, principalmente, se o objetivo for a tomada de decisão sobre a necessidade ou não de alguma operação para descompactação. Também, muitas vezes o solo apresenta valores altos de resistência à penetração com raízes crescendo ao longo de bioporos, formados pela meso e macrofauna e por raízes mortas ([WILLIAMS; WEIL, 2004](#)). Ao se optar por medidas diretas de resistência à penetração como indicadores de compactação do solo, sugere-se que elas sejam feitas depois de um período chuvoso, com o solo próximo de sua capacidade de campo. Sendo diagnosticada resistência considerada crítica (entre 2 e 3 MPa) em teor de água próximo da capacidade de campo, a situação tende a piorar com a perda de água do solo, como já discutido anteriormente.

## Redefinição da disponibilidade de água

Freqüentemente, considera-se como ótimo para o crescimento vegetal o conteúdo de água entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente ou água disponível. Entretanto, [Letey \(1985\)](#) observou que um intervalo hídrico realmente não limitante (*non-limiting water range*) também devesse levar em consideração a porosidade de aeração e/ou a resistência à penetração

particularmente em solos com estrutura pobre e densidades elevadas. [Silva et al. \(1994\)](#) propuseram que esse intervalo hídrico fosse considerado como menos limitante (*least limiting water range*), sendo o termo traduzido para o português como intervalo hídrico ótimo.

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) integra em função da densidade do solo, fatores que limitam diretamente o crescimento vegetal, como o potencial da água, a taxa de difusão de oxigênio e a resistência à penetração de raízes, estabelecendo uma amplitude de conteúdos de água no solo na qual o crescimento vegetal é menos limitado, bem como um valor de densidade crítica no qual o crescimento da maioria das culturas é paralisado ([SILVA et al., 1994](#)). Também, possibilita melhor caracterização do grau de compactação do solo (Figura 8).



**Figura 8.** Intervalo hídrico ótimo (área cinza).

Fonte: Adaptado de [Leão et al. \(2004\)](#).

O IHO apresentado na [Figura 8](#) foi determinado para um Latossolo Vermelho Distrófico. Se para o referido solo o valor da densidade estivesse abaixo de 1,10, não haveria limitações físicas. Valores acima de 1,10 já caracterizam compactação. Valores de densidade acima de 1,37 limitariam completamente o crescimento de raízes.

O IHO varia em função dos atributos do solo, como textura, mineralogia e teor de carbono orgânico, qualidade da matéria orgânica e sistema de manejo. Dessa forma, ao longo do ciclo de uma cultura, quanto maior for a freqüência de conteúdos de água no solo fora do IHO maior será o efeito negativo na produtividade. Sistemas de manejo e de rotação de culturas que permitam um IHO mais amplo terão menor probabilidade de ocorrência de teores de água limitantes ao crescimento das culturas, ou seja, fora do IHO ([SILVA; KAY, 1997](#)).

## Considerações Finais

Como sugestão de prioridades para a pesquisa, faz-se necessária a avaliação do IHO e definição de outros atributos como indicadores da qualidade física do solo, como a densidade relativa ou grau de compactação, relacionando-os com a produtividade vegetal em diversos sistemas de uso e manejo do solo no Bioma Cerrado onde a prática de agricultura intensiva, com adoção de alta tecnologia é cada vez mais freqüente. Entretanto, é importante prevenir a compactação, evitando o excesso de operações motomecanizadas. Deve-se observar, também, o conteúdo ideal de água no solo para sua realização. Em áreas de pastagens, evitar o superpastejo e taxas de lotação acima da capacidade de suporte das pastagens. Espera-se, como resultado, contribuição aos avanços técnicos e científicos no conhecimento da compactação de solos no Cerrado e sua relação com sistemas de manejo, priorizando a escolha dos mais sustentáveis. Mais conhecimento sobre o tema pode também auxiliar na tomada de decisão em diferentes esferas, como: (a) governamental - para abertura de novas áreas, planejamento agropecuário e/ou concessão de crédito, em função do tipo de solo e manejo a ser adotado; (b) social e econômico - para melhoria das condições do solo visando à eficiência e à sustentabilidade dos sistemas de produção; (c) ambiental - para reduzir as perdas de água e solo e o assoreamento dos cursos d'água.

## Referências

- ALVES, V. G.; ANDRADE, M. J. B.; CORRÊA, J. B. D.; MORAES, A. R.; SILVA, M. V. Concentração de macronutrientes na parte aérea do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) em função da compactação e classes de solos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 27, n. 1, p. 44-53, jan/fev, 2003.
- BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Efeito do conteúdo de água e da compactação do solo na produção de soja. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, n. 7, p. 849-856, 2003.
- BRASIL. Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes. **Manual de Pavimentação** 3. ed. Rio de Janeiro, 2005. 334 p.
- BUSSCHER, W. J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to a common water content. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 33, n. 2, p. 519-524, 1990.
- BUSSCHER, W. J.; BAUER, P. J.; CAMP, C. R.; SOJKA, R. E. Correction of cone index for soil water content differences in a coastal plain soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, p. 205-217, 1997.
- DIAS JÚNIOR, M. S. **Notas de aula de física do solo**. Lavras: UFLA, 1996. 168 p.
- HÅKANSSON, I. A method for characterizing the state of compactness of the plough layer. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 16, p. 105-120, 1990.
- HÅKANSSON, I.; LIPIEC, J. A review of the usefulness of relative bulk density values in studies of soil structure and compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 53, p. 71-85, 2000.
- HAMZA, M. A.; ANDERSON, W. K. Soil compaction in cropping systems: A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 82, p. 121-145, 2005.
- IMHOFF, S.; SILVA, A. P.; TORMENA, C. A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 35, n. 7, p. 1493-1500, 2000.
- LEÃO, T. P.; SILVA, A. P.; MACEDO, M. C. M.; IMHOFF, S.; EUCLIDES, V. P. B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 28, p. 415-423, 2004.

LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v. 1, p. 277-294, 1985.

RESCK, D. V. S.; SILVA, J. E. da. Soil organic matter dynamics under different tillage systems in the Cerrados region in Brazil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 14., 1990, Kyoto. **Transaction...** Kyoto: ISSS, 1990. v. 6, p. 325-326.

SANTOS, G. A.; DIAS JÚNIOR, M. S.; GUIMARÃES, P. T. G.; FURTINI NETO, A. E. Diferentes graus de compactação e fornecimento de fósforo influenciando no crescimento de plantas de milho (*Zea mays* L.) cultivadas em solos distintos. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 4, p. 740-752, jul./ago. 2005.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Effect of soil water content variation on the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 61, p. 884-888, 1997.

SILVA, A. P.; KAY, B. D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 58, p. 1775-1781, 1994.

SPIVEY, L. D.; BUSSCHER, W. J.; CAMPBELL, R. B. The effect of texture on strength of southeastern coastal plain soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 6, p. 351-363, 1986.

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

UNGER, P.; KASPAR, T. C. Soil compaction and root growth: a review. **Agronomy Journal**, Madison, v. 86, p. 759-766, 1994.

WILLIAMS, S. M.; WEIL, R. R. Crop cover root channels may alleviate soil compaction effects on soybean crop. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 4, p. 1403-1409, 2004.

WILSON, Z.; STARZEWSKI, K. **Soil mechanics in foundation engineering: Properties of soils and site investigations**. New York: J. Wiley, 1972. v. 1, 252 p.

# Soil Compaction: consequences for the vegetal growth

---

**Abstract** – *Soil compaction is a problem in modern agriculture. Over cultivation, intensive cropping and inappropriate soil management leads to soil compaction. There are important factors which directly affect plant growth, such as water, oxygen, temperature and mechanical resistance to seedling emergence or root growth. By the way, factors indirectly affecting plant growth are soil physical attributes, such as bulk density, texture, aggregation, aggregate stability and pore size distribution. To identify compact layers in soil, trench assessment, bulk density, relative bulk density or compactness degree and penetrometer evaluations can be used. But, these methods request knowledge about other soil attributes for a correct interpretation of analytical results. Recently, soil compaction has been interpreted by the least limiting water range (LLWR), defined as the range in soil water content within which limitations to plant growth associated with water potential, aeration and mechanical resistance to root penetration are small. However, further research is necessary to evaluate and validate LLWR in Cerrado soils.*

*Index terms: Soil, least limiting water range, penetrometer, bulk density.*