ISSN 0100-6703

Camadas de Impedimento Mecânico do Solo em Sistemas Agrícolas com a Soja

Eleno Torres e Odilon Ferreira Saraiva

Embrapa

Comitê de Publicações

Clara Beatriz Hoffmann-Campo
(Presidente)

Alexandre José Cattelan
Alexandre Lima Nepomuceno
Flávio Moscardi
Ivania Aparecida Liberatti
Léo Pires Ferreira
Milton Kaster
Norman Neumaier
Odilon Ferreira Saraiva

Tiragem

2000 exemplares
Outubro/1999

TORRES, E.; SARAIVA, O.F. Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja. Londrina: Embrapa Soja, 1999. 58p. (Embrapa Soja. Circular Técnica, 23).

1. Física do solo. 2. Manejo do solo. 3. Soja - Manejo do solo. I. Embrapa Soja (Londrina, PR). II Título. III Série.

ISSN 0100-6703 CDD 631.43

© Embrapa 1999
Conforme Lei 5.988 de 14.12.73

Apresentação

A definição das estratégias de manejo do solo, primeira etapa de planejamento das práticas agrícolas, contribui para o sucesso na implantação e no desempenho da cultura de soja. A estabilidade de produção, associada à redução dos gastos com insumos e à redução das perdas causadas pela erosão, terá maior probabilidade de ser alcançada através de manejo adequado do solo, favorecendo os aspectos social e ecológico e resultando, consequentemente, em maior proteção ao ambiente.

As informações desta publicação se aplicam às regiões de cultivo extensivo de soja, localizadas em solos originários de rocha basáltica, sob condições de altas temperaturas no verão e com ocorrência de chuvas distribuídas por quase todo o ano. Outrossim, enfoca a importância e a forma de realização do monitoramento e o efeito que as práticas de manejo do solo e de rotação de culturas provocam na resistência do solo, no desenvolvimento radicular e na produtividade das culturas.

Esta publicação é resultado do esforço da Embrapa Soja que, em parceria com outras instituições de pesquisa e extensão rural, produziu informações relativas ao manejo de solos tão importantes no contexto agrícola nacional, na busca constante do desenvolvimento sustentável da cultura da soja.

Paulo Roberto Galerani

Chefe Adjunto de Pesquisa e Desenvolvimento
Embrapa Soja

Sumário

1. Introdução 7
2. Impedimento Mecânico do Solo e Desenvolvimento do Sistema Radicular 8
   - 2.1. Solo 8
   - 2.2. Crescimento Radicular 9
   - 2.3. Importância da Porosidade do Solo 12
   - 2.4. Raízes e o Impedimento Mecânico do Solo 16
3. Resistência do Solo à Penetração: Raízes x Penetrômetros 17
   - 3.1. Raízes 17
   - 3.2. Penetrômetros 18
   - 3.3. Comparação entre Raízes e Penetrômetros 22
   - 3.4. Bioporos: Crescimento Radicular e Penetrômetros 23
4. Propriedades Físicas do Solo e Produção das Culturas 25
   - 4.1. Efeitos Diretos e Indiretos sobre o Desenvolvimento das Plantas 25
   - 4.2. Avaliação da Compactação do Solo Através da Densidade Global 27
   - 4.3. Relação entre Densidade Global e a Resistência à Penetração do Solo 31
   - 4.4. Experiência em um Latossolo Roxo: Resistência do Solo à Penetração x Densidade Global do Solo 32
5. Avaliação e Monitoramento da Compactação do Solo 36
6. Manejo da Compactação do Solo no Plantio Direto 40
7. Referências Bibliograficas 55
8. Agradecimentos 58

Camadas de Impedimento Mecânico do Solo em Sistemas Agrícolas com a Soja

Eleno Torres[1]
Odilon F. Saraiva[1]

1 Introdução

No planejamento das práticas agrícolas, visando maximizar os ganhos de produtividade e redução dos custos, o manejo do solo é a primeira etapa e, talvez, uma das mais importantes para definir o sucesso do sistema agrícola a ser utilizado. O manejo adequado, além de proporcionar estabilidade de produção, diminuir os gastos com insumos e com as demais perdas causadas pela erosão, melhora a renda dos agricultores, fixa o homem no campo e melhora a qualidade de vida das comunidades devido a preservação do ambiente.

Uma área representativa da região de cultivo extensivo com a soja está localizada em solos originados do basalto, sob condições de clima quente, caracterizadas pela ocorrência de chuvas em quase todo o ano. Esses solos são formados por argilas predominantemente do tipo caulinita, que se caracterizam por apresentar baixa atividade. Devido a isso, a capacidade de troca catiônica (CTC) é altamente dependente da matéria orgânica que, além disso, apresenta efeitos diretos e indiretos sobre a agregação dos solos e, consequentemente, sobre os demais parâmetros do solo, como a água, a temperatura, o oxigênio e o impedimento mecânico, importantes para o desenvolvimento da soja e culturas associadas. A intensidade da degradação, manutenção ou recuperação da matéria orgânica e, portanto, do

[1] *Engº Agrº M.Sc. e Ph.D., respectivamente, pesquisadores da Embrapa Soja, Cx. Postal 231, CEP 86001-970, Londrina- PR.*

seu efeito sobre a relação solo-sistema radicular e produtividade das culturas, são praticamente definidos pelas práticas de manejo de solo.

A seleção das práticas adequadas de manejo do solo e de rotação de culturas depende do monitoramento do efeito que essas práticas provocam na resistência do solo à penetração, no desenvolvimento radicular e na produtividade das culturas. Desta maneira, a avaliação e o monitoramento das camadas de impedimento mecânico do solo ao desenvolvimento radicular, tornam-se ferramenta importantes para caracterizar a evolução de sistemas agrícolas e, também, para servir como subsídio indispensável a ser usado no planejamento e direcionamento das práticas de cultivo empregadas dentro de uma propriedade agrícola. Com este objetivo o documento procura repassar aos técnicos uma série de informações que podem auxiliar na resolução dos problemas relacionados com a compactação do solo.

2 Impedimento Mecânico do Solo e Desenvolvimento do Sistema Radicular

2.1. Solo

O efeito do impedimento mecânico sobre o desenvolvimento radicular é dependente das características pedológicas e das práticas de manejo a que o solo é submetido. Num ambiente natural, as características dos minerais primários e secundários em interação com o clima, determinam o estado de agregação individual natural do solo denominada de "ped", ou seja, agregados naturais separados dos agregados adjacentes por superfícies frágeis (Baver *et al.*, 1973). O solo pode também não ter agregação natural e ser denominado de apedal. Os agregados naturais individuais podem ser classificados de acordo com sua forma e arranjamento e os mais comuns são esfereoidal (granular, grumosa), bloco (angulares e subangulares), prismática (prismática propriamente dito e colunares) e laminar (Kiehl,

1979). A estrutura esfereoidal, com seus subtipos granular e grumoso, é mais comum nas camadas superficiais do solo e dependentes da matéria orgânica. O subtipo grumoso apresenta maior quantidade de microporos em relação ao granular, principalmente nos solos com altos teores de matéria orgânica. Os demais tipos de estrutura comentados aparecem nos horizontes inferiores. Os agregados do tipo prismático e em blocos, em condições naturais, são maiores do que os agregados do tipo esfereoidal, podendo por isso, proporcionar menor quantidade de espaços vazios no solo. Esse fato, no entanto, dependendo da continuidade desses espaços, pode não limitar o crescimento das raízes. Em condições naturais, a estabilidade da estrutura do solo quase sempre é elevada e depende do clima, da dinâmica da matéria orgânica, da textura do solo e dos fenômenos físicos e biológicos que interferem na floculação e cimentação dos seus agregados. Já no ambiente agrícola, a manutenção da estrutura do solo é um resultado dinâmico que, além do clima e da textura do solo, depende do manejo e das espécies cultivadas, os quais podem afetar, tanto os agregados naturais (ped), como a formação dos agregados não naturais do solo. Estes, na maioria das vezes, são resultantes da atividade física e/ou biológica proporcionadas pelas práticas de manejo. Desta maneira, o manejo da estrutura do solo, através das práticas de cultivo e do efeito que estas exercem, principalmente sobre a formação e estabilidade dos agregados, definem a quantidade, o tamanho, o formato e a orientação de espaços vazios no solo e, consequentemente, a relação entre macro e microporos e a continuidade da macroporosidade (fendas, canais e outros espaços vazios). Assim, dependendo do manejo, o solo pode se tornar um ambiente favorável ou, então, apresentar a formação de camadas compactadas restritivas à distribuição das raízes.

2.2. Crescimento Radicular

No caso da soja, segundo Gandolfi *et al.* (1983), o sistema radicular é constituído de um eixo principal formado pela radícula e

um grande número de raízes secundárias distribuídas em várias ordens ao longo desse eixo. A maior parte das raízes adventícias emergem da porção mais inferior do hipocótilo (Fig. 1). Se não ocorrerem impedimentos físico e químico, no início do estádio vegetativo, a raiz principal tem rápido crescimento, podendo atingir até a 60 cm de profundidade e as raízes laterais desenvolvem-se 20 a 25 cm de comprimento nos 15 cm superficiais do solo. No início da fase reprodutiva, a raiz principal pode atingir até 75 cm de profundidade e o desenvolvimento das raízes laterais atinge mais de 25 cm de comprimento, concentrando-se nos 15 cm superficiais

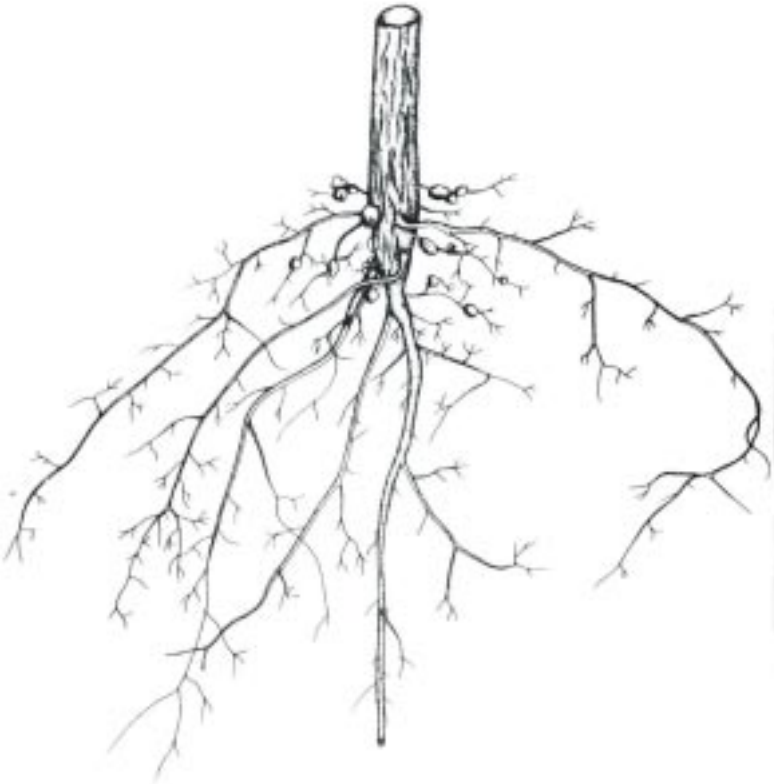

FIG. 1. Sistema radicular da soja. Fonte: Gandolfi *et al.* (1983).

do solo. Finalmente, no enchimento de vagens, as raízes laterais, que inicialmente tem um crescimento variável, podem atingir 185 cm de profundidade (Coale & Grove, 1986). Apesar de atingirem camadas profundas, 85 a 90% do peso seco (Coale & Grove, 1986) e do número (Torres *et al.*, 1993) de raízes de soja concentram-se nos primeiros 15 a 20 cm do solo. Por causa dessa grande concentração superficial e pelo efeito que o aprofundamento do sistema radicular tem sobre o aumento da quantidade de água disponível durante a estação de cultivo, as raízes da soja necessitam ser bem distribuídas nos 25 cm iniciais do perfil do solo, para que tenham condições de suportar os períodos de estresse hídrico que ocorrerem durante o seu ciclo.

A extensão e a quantidade de raízes desenvolvidas em cada condição de ambiente depende das características físicas do solo, do controle exercido por fatores genéticos e do balanço da relação entre a parte aérea e as raízes (Reicosky & Heatherly, 1990). As práticas culturais como época de semeadura, espaçamento e população de plantas, também afetam a distribuição das raízes de soja no solo. A época de semeadura, por causa da variação da temperatura, da umidade e do fotoperíodo. A temperatura ideal para o desenvolvimento da soja é em torno de 30º C. Pouca umidade superficial do solo pode estimular o crescimento das raízes para camadas mais profundas e úmidas, enquanto que os dias mais curtos tendem a diminuir a taxa de elongação das raízes (Coale & Grove, 1986). Já a redução do espaçamento entre fileiras tende a diminuir o desenvolvimento lateral das raízes e o aumento da população de plantas, a quantidade de raízes por planta.

O caminho natural do crescimento do sistema radicular da maioria das espécies no solo é através dos macroporos ou espaços vazios, que ocorrem entre os agregados do solo. Nos solos que não apresentam problemas de compactação, esses macroporos quase sempre são interligados entre si. As raízes finas podem também, desenvolverem-se dentro de agregados, principalmente nos do tipo

grumoso. Os solos melhor estruturados normalmente favorecem mais o desenvolvimento radicular. Essa condição foi confirmada por Vepraskas (1994), ao estudar, em diferentes solos, o efeito da profundidade de preparo sobre o desenvolvimento radicular; observou que os solos que tinham na camada adensada maior número de agregados com diâmetro superior a 2 mm, apresentavam abaixo delas, 30% a mais de raízes de milho, em relação às camadas formadas por agregados menores do que 2mm. Esse melhor desenvolvimento radicular foi atribuído à maior quantidade de macroporos e fendas encontrados nos solos com melhor estado de agregação. Através desse raciocínio, pode-se inferir que o tipo de agregação pode interferir no desenvolvimento das raízes, já que existe variação no tamanho e na forma de distribuição dos agregados no solo.

2.3. Importância da Porosidade do Solo

Normalmente os solos arenosos apresentam alta macroporosidade e, dependendo da preservação dos teores de matéria orgânica e da atividade biológica, tendem a proporcionar condições satisfatórias ao crescimento das raízes. Nos solos argilosos, a situação é mais complexa. Em condições naturais, esses solos possuem boa macroporosidade, em torno de 15 a 25%, porém, em condições de cultivo, a macroporosidade pode diminuir drasticamente. O cultivo e o manejo do solo afetam a estabilidade e a continuidade desses espaços, incluindo as fendas, as estruturas mais frágeis e os bioporos.

O aparecimento de fendas e de estruturas mais frágeis se deve aos fenômenos de contração e dilatação decorrentes do secamento e umedecimento do solo. Também podem ser responsáveis os fatores de elasticidade (capacidade do solo em se deformar em caráter reversível ou não) e compressibilidade (resistência do solo contrária ao decréscimo de volume provocado por esforço mecânico) dos solos. Por outro lado, os bioporos denominados canalículos são

abertos pelo povoamento seguido da decomposição de raízes ou pela atividade da fauna que povoa o solo como minhocas, formigas e besouros, entre outros. Essas fendas e canais entre os agregados ou estruturas maiores, fazem com que as raízes sigam predominantemente esses caminhos, principalmente quando a compactação e a resistência do solo são elevadas. A quantidade de raízes que se desenvolvem através desses espaços depende da freqüência e do tamanho dos mesmos. Se os espaços forem suficientemente largos, podem servir como passagem para a raiz pivotante. Se forem menores, podem propiciar o desenvolvimento das raízes mais finas. Logo, as características do formato e da distribuição do sistema radicular dependem da facilidade das raízes crescerem no solo.

No sistema convencional, em razão das freqüentes mobilizações, observa-se menor atividade biológica e, consequentemente, menor quantidade de bioporos, o que faz com que o aumento da porosidade aconteça sempre por meios mecânicos, ou seja, através do revolvimento do solo por implementos. No entanto, conforme Russel (1981), no plantio direto, a presença das estruturas mais frágeis, das fendas e dos canais são importantes, não só por aumentarem a entrada de água e a aeração no solo, mas também, por facilitarem a penetração de raízes, mesmo em solos com alta densidade global (definição no item 4.2). Kooistra & Tovey (1994) constataram que a presença de espaços vazios, devido à atividade biológica proporcionada pela fauna do solo e pelas raízes, foi um pouco menor que 2 % (v/v) no sistema convencional, sendo que, no sistema direto, a quantidade desse volume foi o dobro. Segundo Ehlers *et al.* (1983), no sistema direto, os canais verticais contínuos na camada arável (horizonte Ap) servem como rotas, ligando a superfície do solo às camadas mais profundas, proporcionando, abaixo dos 15 cm, maior densidade de enraizamento. Esses canais, além de melhorarem a infiltração de água, permitem o carreamento de solo fértil das camadas superficiais para as mais profundas e facilitam as trocas de O_2 e CO_2 entre a atmosfera e o solo.

Em razão dessas informações, é errôneo imaginar que no plantio direto uma determinada camada adensada de solo é sempre homogênea e que a avaliação do sistema radicular deve ser feita somente com base no desenvolvimento vertical da raiz pivotante. As raizes podem seguir a orientação dos canais e das fendas, mesmo que esses não tenham a orientação vertical, para alcançarem camadas mais profundas do solo.

O aumento da diversidade biológica no plantio direto, especialmente da população e da atividade dos organismos que compõem a mesofauna do solo, pode ser conseguido com a melhoria da quantidade e qualidade dos resíduos orgânicos que serão deixados como cobertura sobre o solo. Para isso, é importante que sejam adotados sistemas de rotação de culturas com espécies, que além de produzirem grandes quantidades de massa, possuam um sistema radicular agressivo e profundo, capaz de povoar diferentes camadas no perfil do solo e que, ao se decomporem, sirvam como substratos a esses organismos.

Baseado nessas últimas considerações e nas características dos solos argilosos de serem adensados facilmente, pode-se inferir que nos latossolos roxos a capacidade do plantio direto proporcionar, por longos períodos de tempo, boa distribuição do sistema radicular das espécies cultivadas, depende muito da formação e da preservação dos bioporos. Essa condição pode ser conseguida com a adoção de práticas de cultivo que evitem a destruição dos bioporos já existentes no solo e com a utilização de sistemas de rotação de culturas com espécies com sistema radicular profundo, como *Crotalaria juncea*, *Crotalaria mucronata*, guandu, nabo, tremoço, aveia preta, entre outras. As raízes dessas espécies são abundantes e/ou agressivas, possibilitando a formação de novos canais em camadas mais profundas. Normalmente, a sucessão de culturas não possibilita que o solo, no plantio direto, proporcione uma boa distribuição do sistema radicular da soja. Por outro lado, a rotação de culturas tende a diminuir o problema. Na Fig. 2A, é mostrada a distribuição de raízes

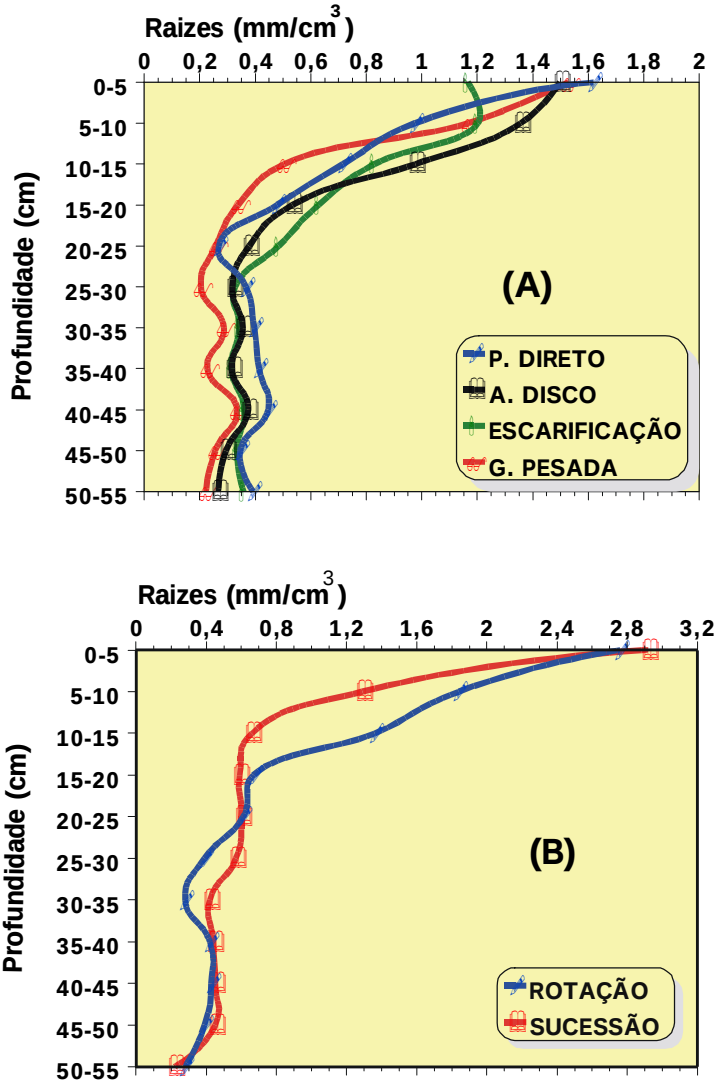

FIG. 2. Densidade de raízes de soja no perfil de um Latossolo Roxo distrófico submetido a quatro sistemas de preparo do solo, após 12 anos de sucessão soja/trigo (A) e no plantio direto em um Latossolo Roxo álico, após seis anos sob diferentes condições de rotação de culturas: Sucessão: soja/trigo e Rotação: tremoço/milho - aveia/soja - trigo/soja - trigo/soja (B). Embrapa Soja/COAMO, 1997.

no perfil do solo em diferentes condições de manejo, sob a sucessão trigo/soja, após 12 anos. Quando o plantio direto foi mantido em sucessão de culturas, a distribuição de raízes no plantio direto foi superficial e somente foi melhor do que o preparo com a grade pesada. A introdução do tremoço, da aveia preta e do milho no sistema de rotação de culturas proporcionou melhor distribuição do sistema radicular (Fig. 2B).

2.4. Raízes e o Impedimento Mecânico do Solo

As raízes da maioria das plantas, sejam monocotiledôneas ou dicotiledôneas, crescem pela divisão celular no meristema apical e, subseqüentemente, pela expansão dessas células, a uma pequena distância da região meristemática, em torno de 1 mm da ponta da raiz (Vepraskas, 1994). As raízes são órgãos flexíveis que desenvolve-se através do solo, seguindo, aparentemente, os caminhos de menor resistência. Elas absorvem água, nutrientes e, para facilitar o seu desenvolvimento no solo, secretam uma mucilagem que envolve a ponta das raízes. Essa mucilagem, formada por ácidos orgânicos e polissacarídeos, além de proteger as raízes da dessecação, lubrifica principalmente a sua ponta, região importante para a penetração através do solo, proporcionando diminuição do atrito das raízes, devido a alteração na superfície de tensão da água com o solo (Bennie, 1996; Vepraskas, 1994; Bengough & Mullins, 1990).

Quando a ponta da raiz encontra um obstáculo que resiste à sua penetração, torna-se menos pontiaguda e as células superficiais podem formar um tecido necrosado e fraco. O impedimento mecânico decresce a taxa de elongação radicular devido a redução da divisão celular meristemática e do crescimento radicular, além de provocar engrossamento das raízes devido aos danos causados no córtex, provocado pelo aumento de células por unidade de comprimento de raízes. Por essa razão, as raízes desenvolvidas em solos compactados tornam-se grossas, achatadas e apresentam uma orientação de

crescimento bastante irregular e recurvado. Essas características que são indicadoras de compactação do solo, devem ser consideradas nas avaliações do estado de compactação do solo.

As raízes da maioria das espécies têm dificuldade de penetrar em poros com diâmetro menor que o seu. Quando precisam exercer forças maiores que 0,2 bar, para alargar os poros, elas têm sua taxa de extensão reduzida. No caso de impedimento do crescimento axial da raiz, pode haver um enraizamento compensatório com as raízes laterais finas penetrando nos poros menores. Apesar dessa característica compensatória, o crescimento radicular será sempre maior nas camadas de solo que proporcionam um ambiente físico e químico mais favorável (Russel, 1981). Como a maioria das espécies de plantas tem potencial para emitir uma determinada quantidade de raízes no perfil do solo e, se ocorrer, por exemplo, o surgimento de uma camada de impedimento mecânico, proporcionalmente um maior número de raízes tende a ficar confinado na camada de solo que proporciona melhor ambiente. No entanto, a quantidade total de raízes no perfil do solo, algumas vezes, pode ser semelhante, independentemente das condições de solo verificadas nas diferentes profundidades, evidenciando assim a característica das raízes de compensar as restrições de impedimento mecânico, tentando suprir as necessidades fisiológicas da planta.

3 Resistência do Solo à Penetração: Raízes x Penetrômetros

3.1. Raízes

Os sistemas radiculares da maioria das espécies são formados por raízes de diferentes diâmetros e por isso têm maior ou menor facilidade em desenvolverem-se no solo. Ao deformarem-se

elasticamente, as raízes finas encontram menor resistência que as raízes grossas que aparentemente têm menor elasticidade e maior plasticidade. As raízes são flexíveis, suas pontas têm pequeno diâmetro e podem apresentar movimentos que facilitam o seu desenvolvimento (Vepraskas, 1994). Além de serem lubrificadas, podem alterar a direção, para ultrapassar obstáculos, como agregados ou estruturas mais adensadas, através de canais e fendas.

As características de desenvolvimento das raízes, somadas à heterogeneidade do solo, sugerem que as raízes possuem vantagens mecânicas em relação aos penetrômetros. Ao contrário das raízes (Fig. 3C), os penetrômetros (Figs. 3A e 3B) são instrumentos rígidos, construídos de metal que ao serem usados para avaliar a resistência do solo à penetração, são impulsionados linearmente, sem respeitar a orientação dos bioporos, sendo que, ao encontrarem obstáculos com diâmetro maior que a sua ponta, registram o efeito desta reação. As diferenças existentes entre os penetrômetros e as raízes, e o surgimento de grande quantidade de bioporos no plantio direto, demonstram que nesse sistema não é correto considerar somente as avaliações de penetrômetros, para concluir que o solo esta compactado. A presença e a freqüência de canais e o desenvolvimento neles de raízes, também são importantes parâmetros.

3.2. Penetrômetros

A maioria dos penetrômetros convencionais são constituídos de uma haste com um cone na extremidade inferior e um dinamômetro, na superior. À medida que o operador força o conjunto contra o solo, a resistência do solo à penetração é registrada no dinamômetro ou em gráficos, no caso dos penetrógrafos (Stolf *et al.*, 1983). Mais recentemente, esse mesmo autor desenvolveu o penetrômetro de impacto (Figs. 3A e 3B). Nesse modelo, o dinamômetro e o registrador foram substituídos por um peso de curso constante, para provocar a penetração da haste no solo através de impactos e retirar, em parte, o efeito do operador que vai ser discutido mais adiante.

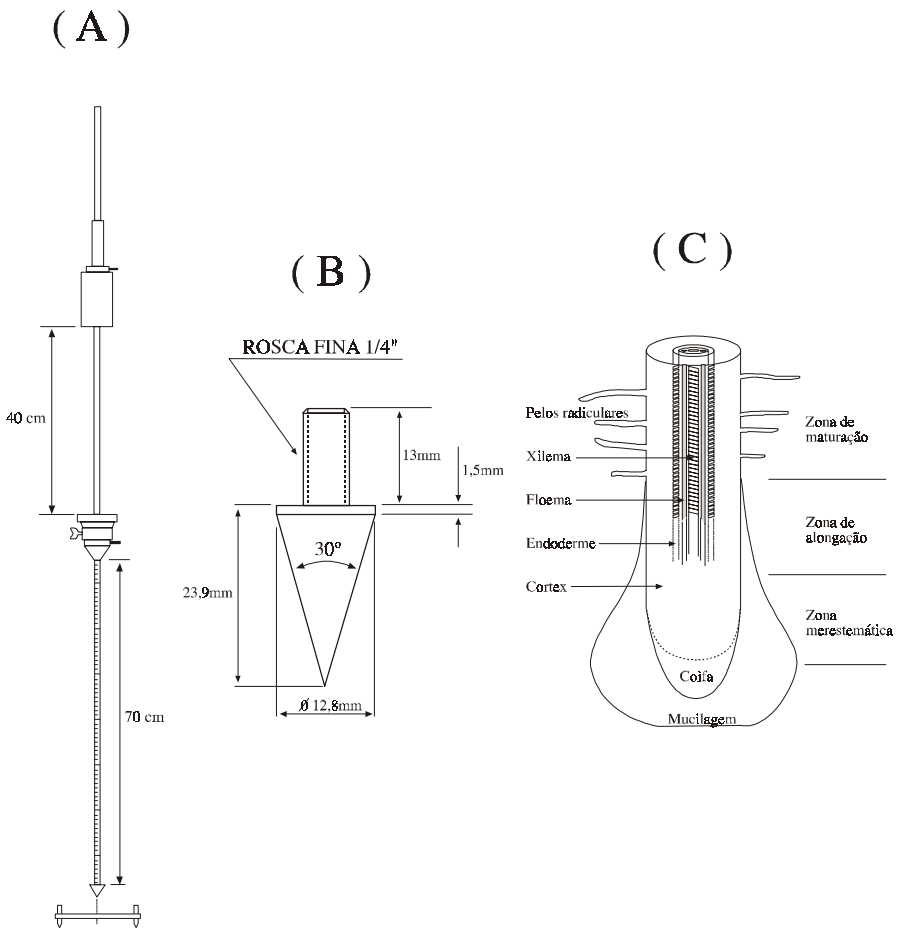

FIG. 3. Esquema de um penetrômetro de impacto (A), com as respectivas características de seu cone (B) (adaptado de Stolf *et al.*, 1983), e da ponta de uma raiz (C) (adaptado de Bengough & Mullins, 1990 e Vepraskas, 1994).

A resistência do solo ao penetrômetro é um índice integrado pela compactação do solo, conteúdo de umidade, textura, tipo de argila e dos outros minerais que constituem o solo. Portanto, é uma determinação muito relacionada com o estado de consistência e estrutura do solo. A quantidade de penetração por unidade de esforço

aplicado a um determinado solo varia, também, com a forma e o tipo do instrumento utilizado. Ao penetrar no solo, a ponta do penetrômetro encontra a resistência provocada pela compressão, esforço de corte e pela fricção com o solo, para então registrar a intensidade de resistência à penetração (Baver *et al.*, 1973).

As medidas para avaliar o impedimento mecânico no solo são assumidas como sendo a quantidade de pressão que os penetrômetros exercem ao penetrarem através do solo. As avaliações com penetrômetros são de fácil realização e, por isso, esses instrumentos são largamente utilizados na agricultura. Os resultados normalmente são expressos em kgf/cm^2, MPa, Atm, dentre outras, que quando mostrados em gráficos oferecem idéia da intensidade da resistência do solo nas diferentes profundidades, ajudando a identificar camadas de solo revolvidas ou compactadas pelos diferentes sistemas de manejo do solo e de cultivo. Essas informações podem auxiliar no planejamento das tecnologias de manejo do solo e de cultivo nas propriedades agrícolas, envolvendo, principalmente, a seleção dos implementos de preparo, a definição da profundidade de trabalho, a escolha das espécies para comporem os sistemas de rotação e a forma de manejo dessas espécies.

Algumas dificuldades tem sido observadas no uso dos penetrômetros. A principal delas é quando se quer definir um nível crítico de resistência à penetração do solo, a partir do qual ocorrem danos ao desenvolvimento radicular ou à produtividade das culturas, ou seja, definir, em termos absolutos, se um determinado solo está ou não compactado. Isso ocorre, porque as leituras com penetrômetros variam muito com a variação dos teores de umidade do solo e por causa da complexidade das interações envolvidas na definição do nível crítico de um parâmetro físico do solo. Outra dificuldade observada é quando se quer comparar diferentes áreas de solo que, ao serem avaliadas, apresentam teores diferentes de umidade no solo, também, devido a variação das leituras com a umidade do solo. Os penetrômetros ainda podem apresentar problemas de repetibilidade

dos dados em função do desenho, do dimensionamento de seus componentes e, do material usado na construção que causam diferentes intensidades de fricção da haste com o solo. No caso dos penetrógrafos e de alguns modelos de penetrômetros, o operador involuntariamente, pode variar a força aplicada sobre o aparelho e, com isso, alterar a velocidade de inserção da haste no solo e, por conseqüência, os resultados. Quanto maior for a velocidade de inserção, menor será a resistência registrada. Esse problema tende a se agravar quando o solo torna-se mais seco e o operador tem dificuldade em fazer todas as medições com a velocidade constante. Os penetrógrafos de velocidade constante e os penetrômetros de impacto tendem a contornar esse problema. Outro fato que pode alterar a leitura e dificultar a comparação de dados, é baseado no conceito do confinamento dos penetrômetros, proposto por Misra & Li (1996). Segundo os autores, dois solos com altas densidades e semelhantes, um apresenta continuidade lateral homogênea e o outro, heterogênea (apresenta bioporos, fendas e é formado por materiais de menor coesão), podem gerar medidas comparativas diferentes, porque quanto mais homogêneo for o solo próximo da zona de penetração do penetrômetro, maior será a resistência medida. Essa última consideração seria favorável aos penetrômetros, principalmente em se tratando de plantio direto, porque, de certa forma, contemplaria a presença dos bioporos, fendas, etc. Porém, não se sabe exatamente como seriam as leituras em função do diâmetro e da orientação dos canais e fendas no solo.

Tanto a haste quanto o cone dos penetrômetros varia entre os diferentes modelos. Para a maioria deles, o diâmetro das hastes variam de 0,1 mm, nos modelos de pequeno porte, até a mais de 10 mm, nos maiores. O cone (ponta) que também é uma fonte de variação, dependendo do modelo, apresenta área basal e ângulos de tamanhos diferentes. Em razão dessa maior rusticidade, fica sempre a preocupação que o diâmetro dos cones dos penetrômetros, usados no campo, quase sempre são maiores do que o das raízes

das plantas anuais cultivadas na agricultura, sendo mais similares ao diâmetro das raízes de algumas árvores. A maioria dos penetrômetros não podem detectar mudanças em solos que apresentam espaços vazios de tamanho muito menor que a dimensão de sua ponta, porém, que permitem o desenvolvimento de raízes através deles.

3.3. Comparação entre Raízes e Penetrômetros

O ideal seria que as medidas, para quantificar a resistência do solo, fossem feitas por métodos diretos, ou seja, através do próprio sistema radicular. Porém esses métodos são de difícil aplicação prática. Mesmo assim, os penetrômetros, apesar das limitações, ainda são um meio importante para avaliar a resistência do solo. Todavia, as diferenças já discutidas entre os penetrômetros e o sistema radicular dificultam o estabelecimento de uma boa correlação entre a pressão exercida pelas raízes e a resistência à penetração medida no mesmo local com o penetrômetro. No entanto, sabe-se que os penetrômetros requerem mais força para penetrarem no solo, comparativamente às raízes. Segundo Bengough & Mullins (1990), para uma mesma condição de solo, considera-se, genericamente, que as raízes, dependendo da espécie, são afetadas negativamente quando necessitam exercer pressões maiores que 0,5 a 1,50 MPa. Esta situação, ao ser avaliada por penetrômetro, pode mostrar valores de 2 até 8 vezes mais elevados. As diferenças entre a pressão das raízes e a resistência ao penetrômetro são menores nos solos arenosos e menos coesivos e maiores nos solos argilosos de alta coesão. Bennie (1996) comenta que os métodos (axial e radial) utilizados para medir a pressão exercida pelo sistema radicular não mudaram muito com o passar dos anos, sendo que a pressão axial, que restringe o desenvolvimento radicular, varia de 0,24 e 1,45 MPa e a pressão radial, entre 0,41 e 0,90 MPa, para a maioria da espécies. Para Misra *et al.* (1986), a máxima pressão axial que as raízes podem exercer varia entre 0,9 e 1,3 MPa.

Nos trabalhos em que foi estudado o efeito do impedimento mecânico do solo, avaliado com penetrômetros, mostrou-se que o desenvolvimento máximo do sistema radicular ocorreu quando as resistências do solo eram em torno de 0,5 a 1,0 MPa. O aumento da resistência, a partir desses valores, provocou a redução do crescimento das raízes, que dependendo da espécie, praticamente cessou de crescer entre valores de 2,5 a 6,5 MPa (Bengough & Mullins, 1990; Vepraskas, 1994; Bennie, 1996). O efeito negativo da resistência do solo sobre o desenvolvimento radicular está associado ao potencial de água do solo. Para uma mesma resistência à penetração, quanto mais negativo for o potencial de água no solo, menor será o crescimento radicular relativo (Dexter, 1987). Desta maneira, na prática, o efeito da compactação tende a ser mais drástico ao crescimento radicular nas condições de solo seco. As dicotiledôneas são mais sensíveis ao impedimento mecânico do que as monocotiledôneas (Brussaard & Van Faassen, 1994). O algodão, dentre as espécies cultivadas, é uma das mais sensíveis.

Para a soja, decorrente da experiência de trabalhos na Embrapa Soja, considera-se para os latossolos roxos, valores de resistência em torno de 2,5 MPa (solo na consistência friável) como baixos para serem restritivos ao crescimento radicular. Resistências em torno de 3,5 a 6,5 MPa, aparentemente, são as mais corretas para considerar que um solo está com possíveis problemas de impedimento mecânico. Deve-se considerar as resistências em torno de 3,5 MPa como um indicativo baixo de compactação e 6,5 MPa, como alto.

3.4. Bioporos: Crescimento Radicular e Penetrômetros

A presença de bioporos, fendas, canalículos, e outros tipos de espaços vazios, mesmo em solos que apresentam camadas de impedimento mecânico, possibilita que as plantas possam se desenvolver em solos com maior resistência aos penetrômetros. Ehlers *et al.* (1983) trabalhando com aveia, constataram que o

crescimento radicular decresceu linearmente com o aumento da resistência à penetração; porém, a resposta foi diferente entre os sistemas de manejo avaliados, em função da presença de bioporos. O limite da resistência à penetração (taxa de desenvolvimento relativo do crescimento das raízes = 0), para as raízes desenvolverem-se no horizonte Ap, foi de 3,6 MPa, nos solos preparados convencionalmente, e de 4,6 MPa, nos solos mantidos em plantio direto. Para os autores, os diferentes valores de limite de resistência do solo ao desenvolvimento radicular, entre as duas condições de manejo, são explicadas pela presença de poros contínuos feitos por minhocas e outros organismos de solo e pela decomposição das raízes das culturas anteriores, que ocorreram no plantio direto. Esses bioporos, que ocuparam menos de 1% do volume do solo no plantio direto, provavelmente foram utilizados como passagem pelas raízes das culturas subseqüentes.

Como pode ser visto, existem controvérsias a respeito dos valores da relação entre a pressão exercida pelas raízes e a resistência do solo ao penetrômetro. As justificativas prováveis para a baixa consistência entre os resultados, entre outros motivos, são devidas aos diferentes modelos de penetrômetro, às variações provocadas pelo operador e às diferenças físicas entre as trajetórias percorridas pelos penetrômetros e pelas raízes, ao tipo de solo e às espécies utilizadas na realização dos trabalhos. Provavelmente, esses trabalhos, envolvendo a resistência à penetração, a densidade global do solo, o desenvolvimento radicular e a produtividade das culturas, serão aprimorados num futuro próximo, possibilitando conhecimentos mais precisos sobre o assunto.

4 Propriedades Físicas do Solo e Produção das Culturas

4.1. Efeitos Diretos e Indiretos sobre o Desenvolvimento das Plantas

Considerando os fatores físicos do solo que afetam o desenvolvimento das culturas, enfatizando principalmente a produtividade, é importante separar aqueles que afetam diretamente, daqueles que afetam indiretamente. Para Letey (1985), os fatores que afetam diretamente o desenvolvimento das plantas são: a água, o oxigênio, a temperatura e a resistência mecânica à penetração, os quais, somados à disponibilidades químicas do solo determinam o potencial produtivo das culturas. Esses fatores diretos são influenciados pelos indiretos, como a textura, a densidade global, o estado de agregação e a distribuição da porosidade no solo. Em razão de estar relacionada com a densidade global, a resistência mecânica se confunde com um fator indireto. Na prática, os fatores indiretos são importantes, em virtude de serem os mais utilizados para caracterizar os efeitos dos diferentes sistemas de manejo do solo sobre produtividade das culturas.

No entanto, a tentativa de definição de limites críticos, baseado em valores fixos, a partir dos quais ocorrem danos no desenvolvimento das culturas, seja do estado de agregação, da macroporosidade ou, principalmente, da densidade global, é uma condição difícil de ser conseguida, principalmente, se o objetivo for usá-los como parâmetro único para definir se um solo está compactado ou não. Qualquer decisão, supostamente baseada na definição desses valores, é temerária. Isso porque, mesmo que se mantenha um solo nas mesmas condições físicas (densidade global, estado de agregação e porosidade) por vários anos, a disponibilidade dos fatores essenciais (temperatura, água, oxigênio e impedimento mecânico) para o desenvolvimento das plantas é dependente do que acontece

com as condições climáticas nos diferentes anos, especialmente com o regime hídrico e com as variações térmicas. Assim, mantendo-se um solo com uma mesma densidade por longos períodos, quando o ano for seco, o solo poderá ter maior resistência à penetração, menor disponibilidade de água e maior disponibilidade de oxigênio. Já, se o ano for úmido, a resistência poderá ser menor e a disponibilidade de água, maior, porém, a concentração de oxigênio poderá ser deficiente. Em razão disso, uma densidade pode ser crítica num ano e no outro ano, não.

Resumidamente, os conteúdos ótimos e a forma de interação dos fatores considerados como de efeito direto para o desenvolvimento das plantas, ou seja, o oxigênio, a temperatura e a umidade do solo, são conhecidos, porém, a maneira com que eles se manifestam nas condições de agricultura extensiva é de difícil previsão, porque, além do manejo do solo, são influenciados pelas variações do clima.

Mesmo assim, considera-se que as avaliações da densidade global e da resistência do solo à penetração ainda são ferramentas importantes e podem ser úteis no diagnóstico da compactação do solo. Para isso, é importante que numa freqüência representativa de anos, se conheçam os valores de resistência do solo e densidade global, acima dos quais podem ocorrer efeitos negativos à produtividade de cada cultura. Após isso, é necessário monitorar o solo e, sempre que se atingir valores de densidade global e resistência à penetração, próximos dos considerados inadequados, deve-se coletar informações adicionais que contemplem o histórico de produtividade, abertura de trincheira para avaliação do sistema radicular, dentre outras, para poder concluir se o solo deve ou não ser descompactado. Os detalhes da descompactação do solo serão discutidos mais adiante.

A resistência do solo à penetração é um parâmetro relativamente fácil de ser obtido e, de certa forma, de ser correlacionado com a densidade global e com a macroporosidade. Para um mesmo solo, quanto maior for a densidade do solo, maior será a resistência

e menor será a macroporosidade, que é o principal espaço para o crescimento das raízes. Deve ser levado em conta, no entanto, que a resistência do solo é mais afetada pela variação dos teores de umidade do solo no momento das amostragens do que a densidade global. Por essa razão, muitos dos trabalhos que objetivam caracterizar o efeito da compactação sobre o desenvolvimento radicular e produtividade da culturas, utilizam a densidade global como parâmetro de referência.

4.2. Avaliação da Compactação do Solo Através da Densidade Global

A densidade global do solo pode ser definida como sendo a relação entre a massa de um solo seco a 105°C e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros finos (volume ocupado pela massa de solo). A massa do solo contempla as partículas sólidas e os espaços vazios decorrentes do processo de arranjamento estrutural do solo. Por isso, a densidade global depende do peso, da forma e da distribuição das partículas no solo (Kiehl, 1979). O peso específico ou densidade real (relação existente entre a massa de uma amostra de solo e o volume ocupado pelas partículas sólidas) das partículas primárias e secundárias, o tamanho, o arranjamento das mesmas no processo de estruturação do solo e o efeito das práticas de manejo podem alterar a densidade. Por exemplo, o aumento da quantidade de partículas com alto peso específico como magnetita e hematita, podem fazer com que um solo apresente maior densidade global do que outro, mesmo que eles tenham volumes de espaços porosos iguais. Já, o aumento dos teores de matéria orgânica tendem a diminuir a densidade global, por causa de seu baixo peso específico (0,90 g/cm^3 a 1,00 g/cm^3). A matéria orgânica ainda pode alterar a densidade global do solo, através do seu efeito como agente cimentante, conferindo estabilidade aos agregados em água (Baver *et al.*,1973). Maiores informações sobre a densidade global do solo e sobre o peso específico do solo, incluindo

as de alguns componentes minerais do solo poderão ser obtidas na publicação de Kiehl (1979).

Os problemas de compactação e, consequentemente, dos aumentos da densidade, são mais sérios nos solos argilosos, porque esses normalmente são formados por partículas pequenas, que possuem superfície de contato elevada. As partículas pequenas, principalmente se forem de diferentes tamanhos, são mais facilmente arranjadas durante o processo de compactação, em razão de poderem ser encaixadas nos espaços formados entre as partículas maiores, provocando, com isso, drástica redução da macroporosidade do solo. Nos Latossolos Roxos do Norte do Paraná, quando se encontram compactados devido as práticas de manejo inadequadas, a macroporosidade chega a ser inferior a 5%. Esta situação contrasta com solos arenosos que são formados por partículas maiores (menor superfície de contato) e que, em termos absolutos, muitas vezes, podem apresentar maiores valores de densidade global, comparativamente aos solos argilosos. No entanto, os solos arenosos tendem a manter maior macroporosidade e, dependendo da continuidade desses poros, ser menos restritivos ao desenvolvimento do sistema radicular.

Em função, principalmente, de suas características mineralógicas, cada solo apresenta uma amplitude de densidade global, com valores máximos e mínimos diferentes. Em condições de campo, as amplitudes de variação da densidade global para os solos argilosos (60 a 75%), vão desde 1,00 g/cm^3, sob condições naturais e ricos em matéria orgânica, a até 1,45 g/cm^3, nos solos mal manejados e compactados. Para os solos arenosos, a densidade varia, em média, de 1,25 g/cm^3 a 1,70 g/cm^3. Essas diferenças de densidades e de suas amplitudes entre os solos propiciam que outros parâmetros, obtidos indiretamente a partir da densidade global, possam ser utilizados para se tentar quantificar melhor o efeito da compactação sobre a produtividade das culturas. Recentemente tem sido usado o parâmetro denominado de compactação relativa que é menos influenciado pelas características dos minerais presentes no solo. A

compactação relativa é o resultado da divisão da densidade global, que é obtida por amostragem no campo, pela densidade máxima que o solo pode atingir, obtida pelo método de Proctor (Lindstrom & Voorhees, 1994). A densidade máxima também é variável entre os solos e as condições de manejo, como é a densidade global. Os resultados de compactação relativa são expressos em base de porcentagem, sendo que valores acima de 86%, na maioria dos anos, são considerados elevados e prejudiciais ao desenvolvimento das culturas, devido aos aumentos de densidade global, redução de macroporosidade e mudanças em outras propriedades do solo como condutividade hidráulica, permeabilidade e resistência à penetração. Na revisão que Lindstrom & Voorhees (1994) fazem sobre o assunto, os autores relatam que baixos valores de compactação relativa (< 80 %) também podem afetar negativamente a produtividade de alguns cereais, entre eles, o trigo e a cevada, devido à redução da capacidade de armazenamento de água, causada pelo aumento excessivo da quantidade de macroporos e, consequentemente, diminuição do movimento capilar de água no solo. Situações semelhantes de decréscimo de produtividade do trigo, causadas pelo aumento da macroporosidade e redução do armazenamento de água, proporcionadas pelo preparo, já foram observadas no norte do Paraná, principalmente, nos anos mais secos. O tipo de solo, de clima e a sensibilidade de cada espécie à compactação do solo, podem fazer com que os valores de compactação relativa, prejudiciais ao desempenho das culturas, sejam um pouco diferentes em cada situação de ambiente.

Esses conceitos podem ser utilizados na discussão e interpretação dos resultados de um trabalho realizado, por vários anos, no norte de Paraná, em um Latossolo Roxo eutrófico, onde se estudou o efeito de cinco níveis de densidade global (1,21, 1,27, 1,33, 1,37 e 1,41 g/cm^3), na profundidade de 8 a 16 cm, sobre a produtividade da soja (Fig. 4). Verificou-se que a compactação do solo afetou negativamente a produtividade da soja, porém, o seu efeito variou entre os anos. Em 1984/85, ano de boa distribuição de chuvas,

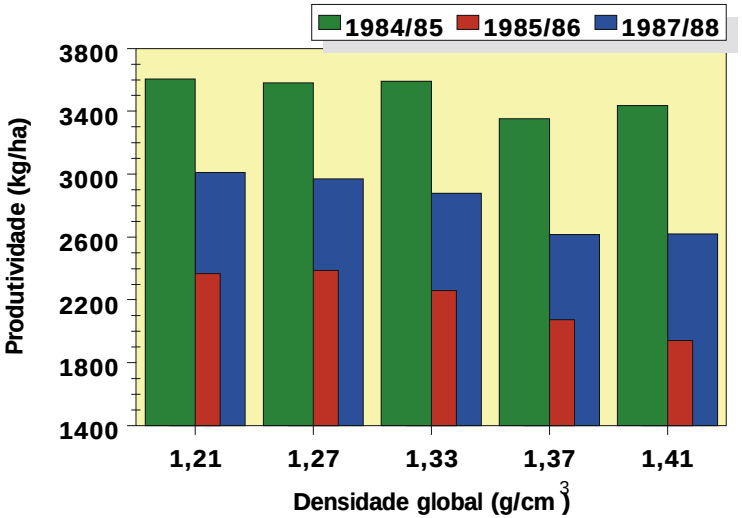

FIG. 4. Produtividade da soja (kg/ha) observada em cinco níveis de densidade global do solo, na profundidade de 8 a 16 cm de um Latossolo Roxo eutrófico. Adaptado de Torres *et al.* (1993).

foi obtida a maior produtividade em valores absolutos e, também, as menores diferenças entre os tratamentos de compactação, em relação aos anos de 1985/86 e 1987/88, os quais foram os de pior distribuição de chuvas. No ano de 1985/86 o rendimento de grãos, tendeu a diminuir a partir da densidade de 1,27 g/cm^3. Já no ano de 1987/88, os rendimentos decresceram a partir da densidade de 1,33 g/cm^3. Através desses dados observa-se que o efeito da compactação foi variável entre os anos, associando, desta maneira, a relação do efeito da compactação com o regime hídrico do solo. Nos anos de melhor distribuição de chuvas, praticamente não ocorreu efeito da compactação sobre a produtividade da soja. No entanto, nos anos mais secos, nos quais a compactação afetou negativamente a produtividade da soja, os valores prejudiciais de densidade global variaram de 1,27 a 1,33 g/cm^3.

Esses mesmos resultados possibilitam transformar as densidades globais, que afetaram negativamente a produtividade da soja, em compactação relativa. Considerando-se que a densidade máxima do solo estudado situa-se em torno de 1,52 g/cm^3 e que as densidades que afetaram negativamente a produtividade foram de 1,27 e 1,33 g/cm^3, obtêm-se os valores de compactação relativa de 84% e 87%, respectivamente para as duas densidades. Portanto, bastante semelhantes aos valores considerados por Lindstron & Voorhees (1994), como prejudiciais à produtividade das culturas.

4.3. Relação entre Densidade Global e a Resistência à Penetração do Solo

Nos trabalhos em que se avalia o efeito da compactação do solo sobre a produtividade das culturas, o método mais utilizado para caracterizar a compactação do solo é o da densidade global. Todavia, o método do penetrômetro exige apenas que se faça investimento na aquisição de instrumentos adequados para as medições e é mais prático, possibilitando a obtenção dos resultados no próprio campo. A maior desvantagem do método, no entanto, é que a variação da umidade, ao longo do perfil do solo, pode interferir fortemente nos resultados. Desta maneira, para um mesma condição de manejo do solo, pode-se ter leituras com valores distintos de resistência. A inobservância deste fator pode levar a erros de interpretação e, principalmente, dificultar a avaliação da resistência do solo à penetração. Abaixo dos 20 a 30 cm, no perfil do solo, a amplitude de variação da umidade é menor e compromete menos os resultados (Stolf *et al.*, 1983).

A densidade global do solo expressa melhor os resultados de compactação, pois, em relação a resistência do solo, é menos afetada pela variação da umidade do solo. No entanto, dependendo do método de determinação da densidade, é necessário o uso de amostradores (cilindros) de boa qualidade para a retirada das amos-

tras no campo e pessoas bem treinadas para a coleta das amostras, que é uma etapa bastante trabalhosa. Mesmo utilizando-se outros métodos, que são igualmente trabalhosos, após a amostragem a campo é necessário a realização de trabalhos complementares em laboratório, para a obtenção dos resultados finais.

4.4. Experiência em um Latossolo Roxo: Resistência do Solo à Penetração x Densidade Global do Solo

Em razão das poucas informações existentes nos Latossolos Roxo do norte do Paraná, desenvolveu-se um trabalho com o objetivo de avaliar a relação entre a densidade global e a resistência do solo à penetração, obtida com penetrômetro, em diferentes teores de umidade. Com isso, pretende-se oferecer subsídios aos técnicos por ocasião da interpretação de dados de resistência à penetração e confecção de diagnóstico visando o manejo da compactação dos solos. A resistência à penetração foi avaliada através do método do penetrômetro de impacto, modelo IAA/Planalsucar-Stolf, conforme as especificações das Figs. 3A e 3B, e metodologia descrita por Stolf *et. al.* (1983) e Stolf (1991). A densidade global, pelo método do cilindro, e a umidade do solo, pelo método gravimétrico, foram avaliadas nas profundidades de 9 e 15 cm, conforme metodologia descritas no Manual de Métodos de Análises do Solo (EMBRAPA, 1979), em um solo submetido a diferentes condições de intensidade de tráfego e de manejo proporcionando os seguintes tratamentos, representados pela densidade global: 1,33, 1,30, 1,30, e 1,13 g/ cm^3 e 1,31, 1,29, 1,28 e 1,22 g/cm^3, nas profundidades de 9 e 15 cm, respectivamente.

Valores de densidade global acima de 1,28 g/cm^3, como já foi visto anteriormente, podem afetar a produtividade da soja. A resistência à penetração do solo foi relacionada com a densidade global e a umidade, nas profundidades amostradas de 9 e 15 cm (Fig. 5). Para todas a condições de densidade global, a resistência à

penetração aumentou com a redução dos teores de umidade do solo e essa tendência foi mais acentuada nas densidades maiores. O efeito da variação da umidade do solo sobre o da resistência do solo foi bastante acentuado. Na densidade de 1,33 g /cm^3, a resistência à penetração foi de 1,5 MPa quando a umidade do solo estava em torno de 37% e de 16 MPa, quando a umidade estava em torno de 21%, evidenciando a grande variação da resistência com a mudança dos teores de umidade. Esse fato pode induzir a erros de interpretação, principalmente se forem consideradas resistências acima de 3,5 a 6,0 MPa como sendo as que podem prejudicar o desenvolvimento das culturas. Outro fato importante é que, quando o solo se encontrava com a consistência dentro do intervalo plástico, o que se verificou logo após uma chuva, os valores de resistência à penetração obtidos com penetrômetro foram semelhantes e não caracterizaram as diferenças de adensamento existentes entre os tratamentos. As avaliações feitas no solo dentro da consistência friável, umidade em torno de 27 a 29 %, foram as mais adequadas para caracterizar as diferenças entre as densidades estudadas.

Comparando as avaliações de resistência à penetração entre as profundidades de 9 e 15 cm (Fig. 5), constatou-se que as diferenças não foram marcantes e as tendências de elevação da resistência do solo, com a redução da umidade, foram semelhantes. No entanto, observou-se entre as duas profundidades, que a resistência do solo tendeu a ser mais elevada na densidade de 1,28 g/cm^3, na profundidade de 15 cm, comparada à condição de maior densidade (1,30 g/cm^3), na de 9 cm, quando a umidade era maior do que 27%. Provavelmente essa tendência ocorreu em virtude do cone do penetrômetro ter sofrido maior confinamento na profundidade de 15 cm.

Considerando os resultados apresentados anteriormente, quando a resistência foi avaliada com o solo muito úmido, na faixa de consistência plástica (Fig. 5), mesmo nas altas densidades (> 1,28 g/cm^3), a resistência foi inferior aos limites de 3,5 a 6,5 MPa, considerados elevados para o desenvolvimento da maioria das espécies.

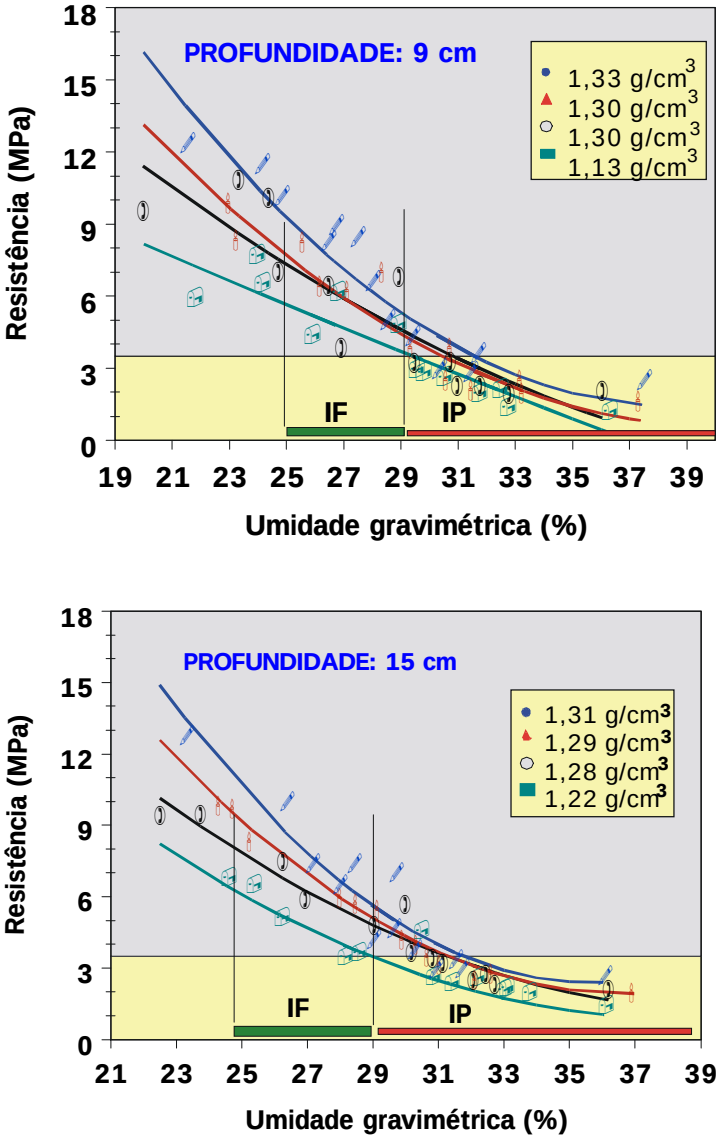

FIG. 5. Resistência do solo à penetração em função dos teores de umidade, em diferentes condições de densidade global e índices de friabilidade (IF) e de plasticidade (IP), nas profundidades de 9 a 15 cm, em um Latossolo Roxo distrófico. Embrapa Soja, 1997.

Porém, quando o solo tornou-se friável (limite superior), as leituras na profundidade de 9 cm evidenciaram resistências de 4,5 e 5,5 MPa para as densidades de 1,30 e 1,33 g/cm^3, respectivamente. Ainda nessas duas densidades, à medida que o teor de umidade do solo reduziu gradativamente dentro da faixa de friabilidade, as diferenças de resistência aumentaram e na umidade média de 28%, foram de 5,3 e 6,5 MPa, respectivamente. Com a umidade de 28%, na densidade 1,13 g/cm^3, que é considerada baixa por proporcionar uma boa relação entre macro e microporos no solo, a resistência foi de 4,5 MPa e, aparentemente, superestimada em relação àquela verificada na densidade de 1,22 g/cm^3, na profundidade de 15 cm. Ainda na densidade de 1,13 g/cm^3, com a perda de umidade do solo, as resistências aumentaram, atingindo valores considerados muito elevados. O mesmo aconteceu dentro das demais densidades.

Por esses resultados e, principalmente, em razão da grande variação que o teor de umidade causa nas determinações da resistência do solo à penetração, considera-se que é um pouco temerário utilizar somente as avaliações feitas com penetrômetro e, em termos absolutos, definir se um solo está ou não compactado. O penetrômetro é um instrumento importante na avaliação da compactação do solo, porém os resultados obtidos através dele devem ser inseridos em um contexto maior de avaliação da compactação, contemplando, além do uso correto do equipamento (numa mesma condição de umidade, dentro da consistência friável), o histórico de produtividade da propriedade em diferentes glebas e abertura de trincheiras para a verificação do sistema radicular.

5 Avaliação e Monitoramento da Compactação do Solo

Atualmente, a compactação do solo é um assunto bastante debatido, principalmente, quando se trata de plantio direto nos solos originados do basalto que, na maioria, compreendem os latossolos roxos e as terras roxas. Porém, deve ficar claro que a compactação do solo não inviabiliza o plantio direto nesses solos, mas exige melhor acompanhamento, para que se tenha um diagnóstico e o dimensionamento de sua real importância.

Primeiramente, deve-se organizar um histórico de produtividade da propriedade, que contemple o maior número de anos que se conseguir e, se possível, por glebas. Após análise das tendências de produtividade e tendo sido caracterizado o decréscimo de produtividade, verificar se o mesmo não foi causado por problemas climáticos, pragas e/ou doenças, deficiências de nutrientes, acidez do solo, exigências termo-fotoperiódicas das cultivares, além de outras. Excluídas essas possibilidades, a melhor maneira de se verificar o efeito da compactação sobre o desenvolvimento da soja é através de um diagnóstico que deve ser relacionado aos dados de resistência do solo (profundidade, intensidade e umidade), obtidos com auxílio de um penetrômetro. Considerar, quando o solo estiver na umidade friável, valores de resistências à penetração acima de 3,5 MPa como um indicativo baixo de compactação. Os valores acima de 5,0 MPa são elevados e, se constatada queda de produtividade, sugerem que o diagnóstico deve ser complementado com a abertura de trincheira para a avaliação da estrutura do solo e da distribuição do sistema radicular.

Para o monitoramento da compactação do solo, é importante que a propriedade seja dividida em glebas, determinadas pelo histórico do manejo da área e morfologia do solo. As leituras com penetrômetros

serão importantes para definir as glebas com maiores problemas. Para isso, apesar do número de amostras não estar bem definido, deve-se procurar fazer o maior número possível. Aconselha-se que o número mínimo seja em torno de 10 a 15 subamostras por gleba. As avaliações, preferencialmente, devem ser feitas quando o solo estiver no estado de consistência friável. Para efeito de comparação entre as glebas, ou caso se tenha informações sobre a relação da resistência à penetração e densidade global, em função da umidade do solo, e se queira ter idéia indiretamente da densidade global, através da resistência solo, é importante que se determine a umidade durante as avaliações. A umidade do solo pode ser avaliada pelo método gravimétrico, com os resultados sendo expressos em porcentagem (%).

É importante que se isole a influência do operador durante as medições com os penetrômetros ou penetrógrafos, principalmente aquela relacionada com a velocidade de inserção do cone no solo que deve ser constante em todas as medidas. A fricção da haste com o solo é outro fator que pode alterar os resultados. Para que isso seja evitado é importante que as hastes sejam limpas depois de cada avaliação, se o tipo de solo e as condições de umidade provocarem muita aderência. A aderência do solo ao penetrômetro é maior quando o mesmo se encontra na consistência plástica. Na condição de consistência friável, diminui a aderência entre a haste e o solo. A presença de ferrugem na haste do penetrômetro também pode aumentar a fricção. Para isso não acontecer, após o uso, os penetrômetros devem ser limpos e secos, antes de serem guardados. Deixar de observar detalhes simples como esses podem levar a um aumento da variabilidade dos resultados.

A distribuição de raízes deverá ser avaliada através da abertura de uma trincheira, verificando-se a concentração de raízes nas diferentes camadas, se possível, até a profundidade de 40 cm. Deve-se avaliar também as características das estruturas como tamanho, formas e resistências. Normalmente, as estruturas compactadas apresentam pouca quantidade de raízes no seu interior, baixa

atividade biológica e ausência quase que completa de orifícios e porosidade. Além disso, as estruturas compactadas, ao serem quebradas, evidenciam faces de rupturas lisas (Fig. 6), ao contrário das não compactadas que apresentam superfície rugosa, com os torrões apresentando distribuição de agregados arredondados que possibilitam visualização de porosidade e fissuras (Fig. 7), e o desenvolvimento radicular bastante ramificado e em forma não achatada (Tavares Filho *et. al.*, 1999). As informações sobre o modo de organização da estrutura no perfil do solo poderão ser aprimoradas com leitura do trabalho de Tavares Filho *et al.* (1999). É importante verificar também, principalmente, na camada de 8 a 20 cm no perfil, a intensidade da presença de canalículos (Fig. 8), e a ocorrência neles de eluviação de solo e o crescimento de raízes em direção às camadas mais profundas, bem como a intensidade de ramificação das raízes secundárias nas diferentes camadas. Isso deve ser feito, primeiramente, porque o aparecimento de fendas e canais e a presença neles

FIG. 6. Característica de uma estrutura de solo compactada, com face de ruptura laminar devido à pressão mecânica e sistema radicular desenvolvendo-se horizontalmente.

FIG. 7. Característica de estrutura de solo não compactada, apresentando agregados arredondados e grumosos, fissuras, raízes ramificadas, porosidade visível e indícios de grande atividade biológica.

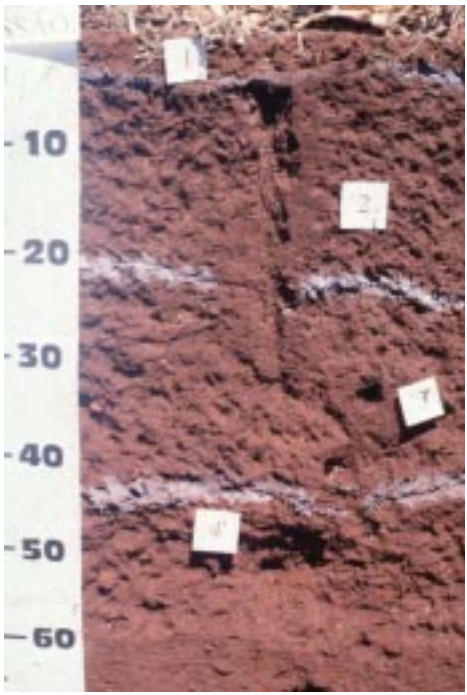

FIG. 8. Canalículos e orifícios causados por insetos. Foto: Jorge Luiz Picinin.

de vestígios de atividade biológica é um indicador de evolução e tendência de equilíbrio do plantio direto. E também porque, em solos com resistências ao penetrômetro elevadas, mais que 4,5 MPa, as fendas e os canais passam a ter papel importante na distribuição do sistema radicular, fazendo com que a camada de impedimento mecânico exerça menor controle no desenvolvimento dos sistema radicular.

O formato e orientação das raízes também são muito importantes. Raízes grossas e achatadas, se desenvolvendo de modo recurvado e com orientação vertical prejudicada, podem indicar que o solo está compactado. É importante, ainda, considerar que no preparo convencional a concentração superficial de raízes quase sempre está relacionada com a queda de produtividade. No plantio direto, isso nem sempre é verdade. Nesse sistema, em algumas situações, pode ocorrer concentração de raízes nas camadas superficiais, porém, algumas conseguem desenvolver-se através de fendas e canalículos, alcançando camadas mais profundas do solo e auxiliar no suprimento de água e nutrientes às plantas. Além do mais, as raízes superficiais podem localizar-se numa camada rica em matéria orgânica e nutrientes, características do plantio direto, que se mantêm úmida em função da cobertura morta do solo, podendo proporcionar condições satisfatórias para o desenvolvimento da soja.

6 *Manejo da Compactação do Solo no Plantio Direto*

Se forem constatados problemas de compactação, mesmo que o agricultor tenha iniciado corretamente no plantio direto, há alternativas para corrigi-la. A primeira e mais importante ação é a implantação de rotação de culturas. Esta prática tende a atenuar o problema, principalmente se os cultivos posteriores forem realizados

com veículos e equipamentos que exerçam baixa pressão sobre o solo. Rodas mais largas e os veículos de tração trafegando quando o solo estiver na consistência friável, auxiliam na prevenção da compactação. Sistemas de rotação de culturas envolvendo espécies com sistema radicular vigoroso e profundo, como o do guandu, das crotalárias, da aveia preta, do tremoço, do nabo forrageiro, do milho e do milheto, auxiliam na redução da compactação do solo. Na Fig. 9 é mostrado o efeito da rotação de culturas sobre a densidade global do solo no plantio direto e em outros sistemas de preparo. Nela fica evidenciado que a rotação de culturas, num sistema de quatro anos (tremoço/milho, aveia preta/soja, trigo/soja e trigo/soja), diminuiu a densidade global no plantio direto. Na Fig. 10 são apresentados os resultados de um outro trabalho envolvendo o plantio direto e as mesmas combinações de seqüências de cultivo da figura anterior,

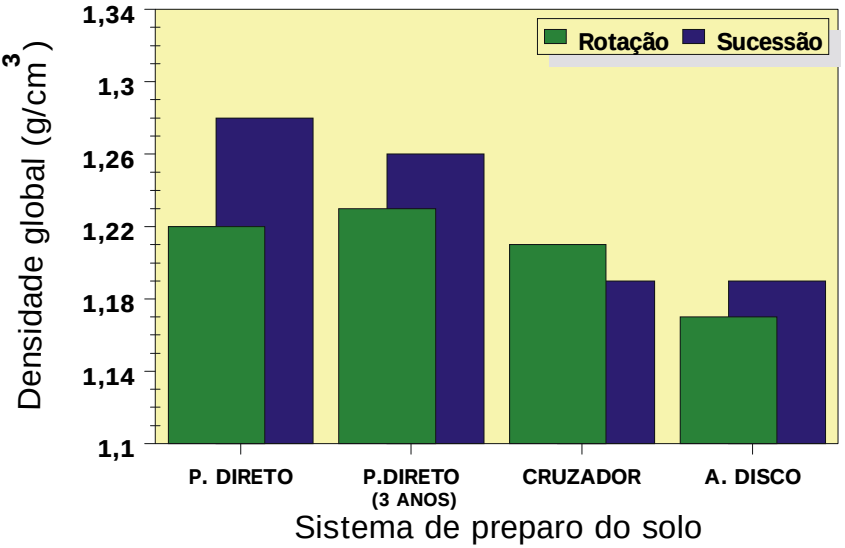

FIG. 9. Densidade global do solo observada em diferentes sistemas de manejo nas condições de rotação de culturas (tremoço/milho - aveia/soja - trigo/soja - trigo/soja) e de sucessão de culturas (trigo/soja), na profundidade de 8 a 13 cm de um Latossolo Roxo distrófico. Embrapa Soja. 1997.

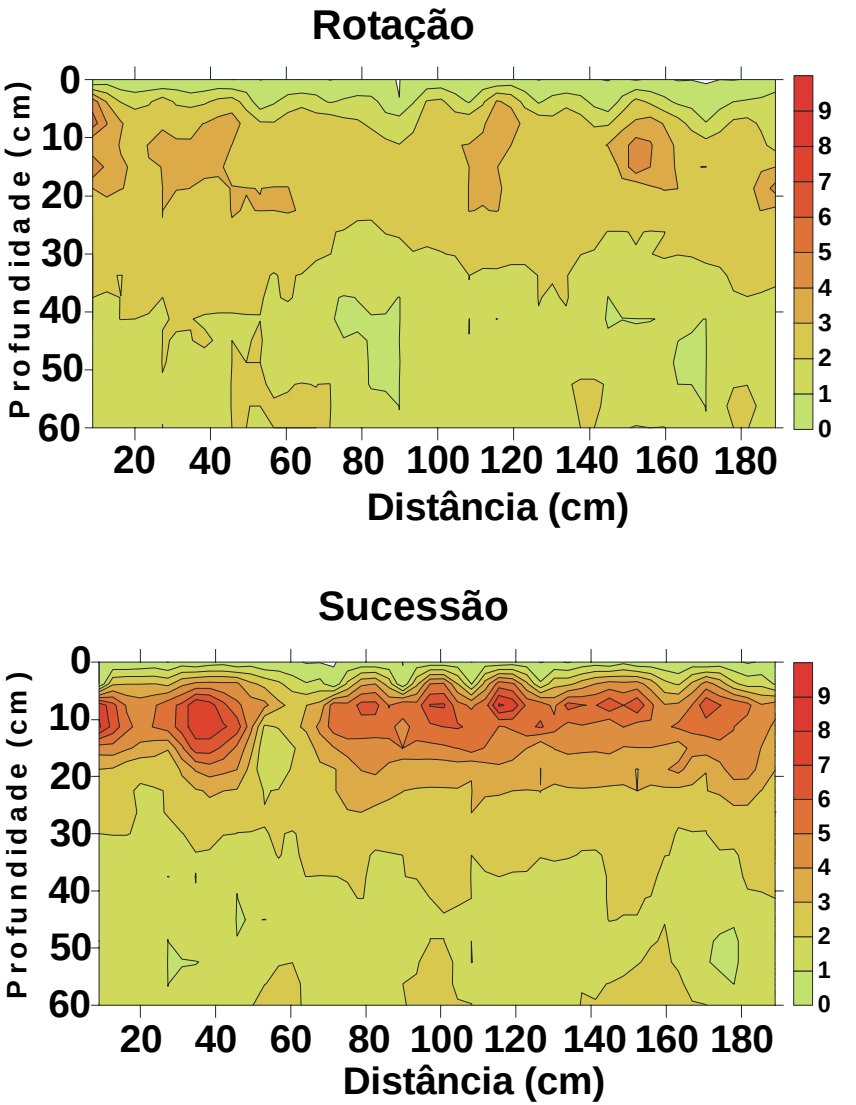

FIG. 10. Diagrama da resistência em um Latossolo Roxo (escala a direita da figura representa valores de resistência do solo em unidades de MPa) observado no plantio direto após doze anos de diferentes seqüências de cultivo (Sucessão = soja/trigo e Rotação = tremoço/milho - aveia/soja - trigo/soja - trigo/soja). Embrapa Soja. 1998.

porém os resultados do penetrômetro são mostrados na forma de superfície de resposta. Neste diagrama pode-se observar a mesma tendência anterior, ou seja, da rotação de culturas diminuir a compactação do solo no plantio direto. O método evidenciou também, que a camada de solo que apresentava maior resistência não foi uniforme em toda a sua extensão, mesmo quando se usou sucessão de culturas. A continuidade dessa camada foi interrompida, apresentando estruturas de solo menos adensadas, as quais podem proporcionar, através delas, melhor desenvolvimento do sistema radicular. Esse efeito positivo da rotação de culturas, em diminuir a resistência do solo, também foi verificado por Henklain *et al.* (1996), em solos do norte do Paraná e por Tormena & Roloff (1996), na região de Ponta Grossa, sul do Paraná, ao trabalharem com aveia.

Através desses resultados, constata-se que os problemas de compactação no plantio direto podem ser minimizados pela rotação de culturas, possibilitando também, que a transição do plantio direto, principalmente, nos solos argilosos degradados, seja feito sem o impacto preocupante que acontece nos primeiros anos, devido a compactação. Essa tecnologia de descompactação, pelo uso de agentes biológicos, pode ser aprimorada com o uso de guandu e crotalárias. Nesses sistemas, o guandu ou as crotalárias não substituem as espécies com fim econômico na safra de verão, elas são cultivadas em consórcio com o milho e todas as operações de cultivo são mecânicas, conforme seqüência de cultivo mostrada nas Figs. 11, 12, 13, 14, 15 e 16. Maiores detalhes sobre essa tecnologia de cultivo e sobre outras combinações de rotação de culturas envolvendo a soja e diferentes espécies poderão ser obtidas nas Recomendações Técnicas para a Cultura da Soja, editadas pela Embrapa Soja (EMBRAPA, 1999).

Caso a rotação de culturas não resolva o problema, existem outras duas alternativas mecânicas. A primeira é a utilização de semeadoras dotadas de facões próximos aos discos de corte, que fazem a descompactação do solo na linha de semeadura ou cortam a camada compactada, permitindo a passagem das raízes. Deve-se

FIG. 11. Sistema radicular pivotante do guandu.

FIG. 12. Semeadura de duas fileiras de guandu entre fileiras de milho, 25 a 30 dias após a sua emergência. Foto: Celso de A. Gaudêncio.

FIG. 13. Emergência do guandu entre fileiras de milho: Foto. Celso de A. Gaudêncio.

FIG. 14. Desenvolvimento do guandu entre fileiras de milho em início de maturação. Foto: Celso de A. Gaudêncio.

FIG. 15. Aspecto do guandu logo após a colheita mecânica do milho. Foto: Celso de A. Gaudêncio.

FIG. 16. Recuperação do desenvolvimento do guandu após a colheita e sem a competição do milho: Foto: Celso de A. Gaudêncio.

garantir, no entanto, que as operações de semeadura e de descompactação do solo proporcionem que as sementes sejam distribuídas na quantidade e profundidade adequadas, sob o risco de se ter problemas de emergência e de uniformidade de plantas nas lavouras. Para isso, o formato e as características dos facões são muito importantes. Facões mais largos mobilizam mais a superficie do solo, retiram os restos de cultivo da linha de plantio e podem prejudicar a operação de plantio ou semeadura (Figs. 17, 18, 19 e 20), em relação aos facões mais estreitos e com ângulo de ataque mais adequado (Figs. 21, 22 e 23). Em razão da semeadura da maioria das culturas ser feita com o solo úmido, o trabalho de descompactação com facão ficará restrito apenas à linha de semeadura, podendo além disso, provocar o aparecimento de uma superfície espelhada nas paredes do sulco de semeadura, que poderá prejudicar a passagem de raízes. Cabe lembrar que a maioria dos modelos de facões possibilitam o corte do solo à profundidades que não ultrapassam os 12-15 cm. O trabalho em maior profundidade exige facões mais robustos e um grande esforço de tração por linha de plantio.

FIG. 17. Semeadora com facão com face de corte larga que mobiliza excessivamente o solo.

FIG. 18. Excessiva mobilização do relevo superficial do solo e dos restos de cultivo provocada pelo facão mostrado na Fig. 17.

FIG. 19. Característica do desenvolvimento do milho e da mobilização dos restos de cultivo provocadas pelo facão mostrado na Fig. 17.

FIG. 20. Problemas de implantação do milho provocados pelo embuchamento do facão, mostrado na Fig. 17, com o restos de cultivo.

FIG. 21. Facão mais fino e que provoca menos mobilização superficial do solo cultivado.

FIG. 22. Aspectos da implantação do milho com o facão da figura 21, resultando em menor mobilização do solo e maior preservação dos restos de cultivo próximo às linhas de plantio.

FIG. 23. Facão de lançamento recente pela indústria: face de corte mais fina e com ponteira trocável em função da cultura e solo. Foto: Danilo Estevão.

Apesar de algumas desvantagens, essa tecnologia vem sendo usada com sucesso, já há muitos anos, por grande número de produtores.

A outra alternativa viável é baseada na utilização de alguns tipos de escarificadores, cujo formato da hastes permite que a camada de solo compactada seja rompida, sem afetar muito o nivelamento do terreno (Figs. 24 e 25). Essa condição possibilita posteriormente, que a semeadura seja realizada sem a necessidade do uso de grade para o nivelamento do terreno (Figs. 26, 27, 28 e 29) ou, na pior das hipóteses, apenas com uma passagem de grade. Para essa tecnologia, a operação de descompactação deve ser feita após a colheita da soja e antes da semeadura do trigo ou da aveia, ou de outra espécie que apresente rusticidade para germinar. A observação e a adoção dessa seqüência de trabalhos de descompactação é importante porque: a) a cultura da soja produz uma quantidade relativamente pequena de restos de cultivo, que são de rápida decomposição. Quando bem fragmentados e distribuídos sobre o terreno, permitem que a operação de descompactação do solo seja

FIG. 24. Características da haste de um escarificador que mobiliza pouco o relevo superficial do solo e, dependendo da regulagem, preserva grande parte dos restos de cultivo sobre o solo. Foto: Danilo Estevão.

FIG. 25. Aspecto da cobertura do solo por restos de cultivo de soja: a esquerda em plantio direto e a direita em solo preparado com escarificador e não nivelado.

FIG. 26. Operação de semeadura do trigo em área escarificada e não nivelada. Foto: Celso de A. Gaudêncio

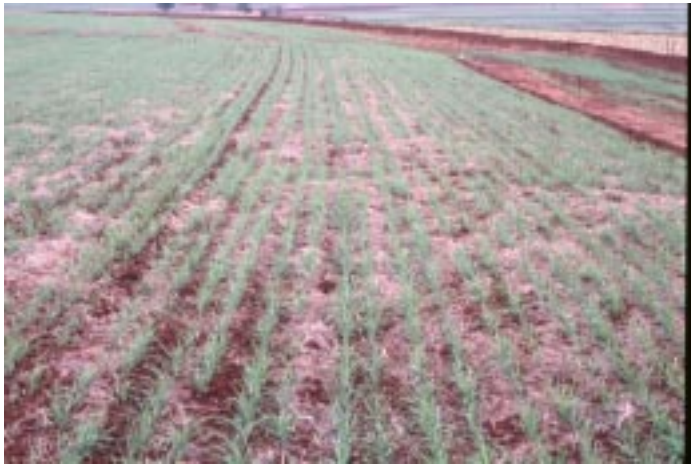

FIG. 27. Visualização da uniformidade de plantas de trigo em área de plantio direto (esquerda) e em área preparada com escarificador e implantada sem o nivelamento do terreno (direita).

FIG. 28. Semeadura do trigo em área extensiva preparada com escarificador e sem o nivelamento do terreno.

FIG. 29. Aspecto da emergência do trigo em área preparada com escarificador e semeada sem o nivelamento do terreno em contraste com área ainda não semeada.

feita com o mínimo de embuchamento do implemento; e, b) a maior rusticidade das culturas de trigo e de aveia garantem germinação satisfatória e um bom estabelecimento de lavoura, mesmo em terreno com pequenos problemas de nivelamento.

Para evitar o embuchamento da semeadora, devido a presença de palha na superfície do terreno e o solo estar ainda muito solto, recomenda-se esperar que ocorra uma ou duas chuvas, para que o solo assente, para depois se realizar a semeadura e nesse caso, com velocidade de operação reduzida. Como norma, preparar o solo no estado de consistência friável, para não levantar muitos torrões, mesmo que isso prejudique um pouco a eficiência da descompactação do solo.

A utilização, ou mesmo a adoção dessa tecnologia, se for desconhecida para o produtor, deve ser realizada em áreas pequenas, para efeito de treinamento e aquisição de experiência. É importante, também, que os produtores tenham acesso às informações sobre o

tipo de implemento mais adequado, se possível, com demonstração de uso em solos com características semelhantes aos da sua propriedade. A troca de experiência com outros produtores que já praticaram essa tecnologia, também, é aconselhável.

7 Referências Bibliograficas

BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. Estructura de los suelos: classificacion y genesis. In: BAVER, L.D.; GARDNER, W.H.; GARDNER, W.R. **Física de suelos.** Mexico: Centro Regional de Ayuda Técnica, 1973. p.138-165.

BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and growth responses. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.41, p.341-358, 1990.

BENNIE, A.T.P. Growth and mechanical impedance. In: ESHEL, Y.W.A.; KAFKAFI, U. **Plant roots the hidden half**. New York: M. Dekker, 1996. p.453-470.

BRUSSAARD, L.; VAN FAASSEN, H.G. Effects of compaction on soil biota and soil biological processes. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. London: Elsevier, 1994. p.215-235 (Developments in Agricultural Engineering, II).

COALE, F.J.; GROVE, J.H. Alteration in soybean root development due to cultural practices: a review. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, Athens, v.17, n.8, p.799-818, 1986.

DEXTER, A.R. Mechanics of root growth. **Plant and Soil**, Hague, v.98, p.303-312, 1987.

EHLERS, W.; KOPKE, F.; HESSE, F.; BOHM, W. Penetration resistance and root growth of oats in tilled and untilled loess soil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdan, v.3, p.261-275, 1983.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamentos e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Manual de métodos de análises de solo**. Rio de Janeiro, 1979. Não paginado.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Soja (Londrina, PR). **Recomendações técnicas para a cultura da soja no Paraná 1999/ 2000**. Londrina, 1999. 236p. (Embrapa Soja. Documentos, 131).

GANDOLFI, V.H.; BAN, A.D.; VILHORDO, B.W.; MULLER, L. Raiz. In: VERNETTI, F.J. Coord. **Soja**: planta, clima, pragas, moléstias e invasoras. Campinas: Fundação Cargil, 1983. p.26-38.

HENKLAIN, J.C.; VIEIRA, M.J.; OLIVEIRA, E.L. Resistência do solo pelo efeito dos métodos de preparo. In: CONGRESSO LATINO AMERICANO DE CIÊNCIA DO SOLO, 13., 1996, Águas de Lindóia. **Solo - Suelo**. Piracicaba: ESALQ, 1996. CD-ROM.

KIEHL, E.Y. **Manual de edafologia**: relações solo-planta. São Paulo: Ceres, 1979. 264p.

KOOISTRA, J.M.; TOVEY, N.K. Effects of compaction on soil microstructure. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. London: Elsevier, 1994. p.91-111 (Developments in Agricultural Engineering, II).

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

LINDSTRON, M.J.; VOORHEES, W.B. Response of temperate crops to soil compaction. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. London: Elsevier, 1994. p.265-286. (Developments in Agricultural Engineering, II).

MISRA, R.K.; DEXTER, A.R.; ALSTON, A.M. Maximum axial and radial growth pressures of plant roots. **Plant and Soil**, Hague, v.95, p.315-326, 1986.

MISRA, R.K.; LI, F.D. The effects of radial soil confinement and probe diameter on penetrometer resistance. **Soil and Tillage Research**, Amsterdan, v.38, p.59-69, 1996.

REICOSKY, D.C.; HEATHERLY, L.G. Soybean. In: STEWART, B.A.; NIELSEN, D.R. **Irrigation of agricultural crops**. Madison: ASA/ CSSA/SSSA, 1990. p.639-674. (Agronomy, 30).

RUSSEL, R.S. Plant root systems - their function and interaction with the soil. In: RUSSEL, R.S.; IGUE,K.; MEHTA, Y.R. **The soil/root system in relation to brazilian agriculture**. Londrina: IAPAR, 1981. p.3-19.

STOLF, R.; FERNANDES, J.; FURLANI NETO, V. Recomendação para o uso do penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar-Stolf. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.1, n.3, 1983.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Piracicaba, v.15, p.249-252, 1991.

TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUIMARÃES, M.F.; MEDINA, C.C.; BALBINO, L.C.; NEVES, C.S.V.J. Método do perfil cultural para avaliação do estado físico de solos em condições tropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.405-411, 1999.

TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Piracicaba, v.20, p.333-339, 1996.

TORRES, E.; SARAIVA, O.F.; GALERANI, P.R. **Manejo do solo para a cultura da soja**. Londrina: EMBRAPA-CNPSo, 1993. 71p. (EMBRAPA-CNPSo. Circular técnica, 12).

VEPRASKAS, M.J. Plant response mechanisms to soil compaction. In: WILKINSON, R.E. **Plant-environment interactions**. New York: M. Dekker, 1994. p.263-287.

8 *Agradecimentos*

Ao pessoal de laboratório, **Mariluci da Silva Pires** e **Donizete Aparecido Loni**, pela constante colaboração na determinação das análises físicas dos solo.

Ao pessoal de apoio, **Edilson José da Fonseca**, **João Ribeiro de Macedo** e **Paulo Volpato**, pelo auxílio e dedicação na condução dos trabalhos de campo.

Ao pesquisador **José Renato Bouças Farias**, pela contribuição no aprimoramento das metodologias de avaliação dos trabalhos de manejo do solo.

Ao pesquisador **Celso de A. Gaudêncio**, pela grande contribuição dedicada às pesquisas com rotação de culturas e pelas fotos utilizadas na ilustração deste trabalho.

Ao pessoal da área de comunicação empresarial, **Danilo Estevão**, **Helvio Borini Zemuner** e **Neide Makiko Furukawa Scarpelin**, pela realização da arte final do trabalho.

Ao técnico agrícola **Fernando Portugal**, pelo apoio nas atividades realizadas com máquinas agrícolas que facilitaram a realização deste trabalho.