



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

ISSN 1678-9644

Novembro, 2006

Documentos 197

Qualidade do Solo e Meio Ambiente

Nand Kumar Fageria
Luís Fernando Stone

Santo Antônio de Goiás, GO
2006

Exemplares desta publicação podem ser adquiridos na:

Embrapa Arroz e Feijão

Rod. GO 462, Km 12

Caixa Postal 179

Fone : (0xx62) 3533 2110

Fax : (0xx62) 3533 2100

sac@cnpaf.embrapa.br

www.cnpaf.embrapa.br

75375-000 Santo Antônio de Goiás , GO

Comitê de Publicações

Presidente: Carlos Agustin Rava

Secretário-Executivo: Pedro Luiz Oliveira Almeida Machado

Luiz Roberto Rocha da Silva

Supervisão Editorial: *Marina A. Souza de Oliveira*

Editoração Eletrônica: *Denise Xavier Lemes*

Normalização Bibliográfica: *Ana Lúcia Delalibera de Faria*

1ª edição

1ª impressão 2006: *500 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).

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Embrapa Arroz e Feijão

Nand Kumar Fageria.

Qualidade do solo e meio ambiente / Nand Kumar Fageria, Luís Fernando Stone - Santo Antônio de Goiás : Embrapa Arroz e Feijão, 2006.

35 p. - (Documentos / Embrapa Arroz e Feijão, ISSN 1678-9644 ; 197)

1. Solo. 2. Deterioração do Solo. 3. Meio Ambiente. I. Stone, Luís Fernando. II. Título. III. Embrapa Arroz e Feijão. IV. Série.

CDD 631.4 (21. ed.)

© Embrapa 2006

Autores

Nand Kumar Fageria

Engenheiro Agrônomo, Ph.D. em Fertilidade de Solos e
Nutrição de Plantas

Embrapa Arroz e Feijão

Rod. GO 462, Km 12

75375-000 Santo Antônio de Goiás-GO

fageria@cnpaf.embrapa.br

Luís Fernando Stone

Engenheiro Agrônomo, Doutor em Solos e Nutrição de
Plantas

Embrapa Arroz e Feijão

stone@cnpaf.embrapa.br

Apresentação

Numa sociedade moderna, o aumento da produção das culturas sem a degradação do solo é componente essencial para alimentar a população em nível nacional e internacional. O uso adequado e racional de fertilizantes, corretivos, fungicidas, inseticidas e herbicidas é um fator muito importante na melhoria da eficiência de produção e na manutenção da qualidade do solo e do meio ambiente. Nesse contexto, no século 21, a qualidade do solo é um dos tópicos mais importante na área agronômica, devido à sua importância na manutenção da sustentabilidade de agro-ecossistemas e na redução da poluição ambiental. Para manter a qualidade do solo, é importante adotar as tecnologias de produção agrícola que reduzem a degradação do solo. A degradação do solo é a redução da capacidade atual e/ou potencial do solo em produzir, quantitativa ou qualitativamente, bens ou serviços como resultado de um ou mais processos de degradação, naturais ou induzidas pelo homem. A degradação do solo inclui deteriorações físicas, químicas e biológicas, tais como declínio na fertilidade do solo e nas condições estruturais, erosão, salinidade, alcalinidade, acidez e efeitos de elementos tóxicos, poluentes ou inundação excessiva. Portanto, manter a qualidade do solo no nível desejável é fundamental para manter e/ou aumentar a produtividade agropecuária e, ao mesmo tempo, controlar a qualidade do meio ambiente como solo, água e ar.

O solo e água, dois recursos importantes na produção das culturas, devem ser preservados, sem degradar o ambiente, o que significa dizer que os sistemas agrícolas futuros devem ser economicamente viáveis, ecologicamente sustentáveis e social e politicamente aceitáveis.

Neste documento, os autores procuraram reunir e ordenar as informações importantes sobre a qualidade do solo que podem ajudar a comunidade agrícola a atingir as metas de uma produção eficiente e rentável, com um ambiente saudável. Ao divulgá-lo, a Embrapa Arroz e Feijão espera fornecer aos leitores um panorama geral dos problemas de qualidade do solo e dos meios de manter ou amenizar a degradação dos recursos naturais e do meio ambiente.

Beatriz da Silveira Pinheiro
Chefe-Geral da Embrapa Arroz e Feijão

Sumário

Introdução	9
Degradação do solo	10
Degradação física	11
Textura do solo	12
Estrutura do solo	13
Densidade do solo	13
Densidade de partículas	16
Degradação química	17
pH do solo	17
Capacidade de troca de cátions	19
Saturação por bases	20
Oxirredução	22
Fertilidade do solo	23
Salinidade	24
Degradação biológica	25

Erosão	25
Práticas de manejo na conservação da qualidade do solo.....	27
Conclusões.....	27
Referências bibliográficas	29

Qualidade do solo e meio ambiente

Nand Kumar Fageria

Luís Fernando Stone

Introdução

O solo é um material mineral ou orgânico não consolidado na superfície da terra, influenciado por fatores genéticos e ambientais, como material de origem, topografia, clima (temperatura e umidade) e microrganismos, que se encarregaram da sua formação no decorrer de um certo tempo, e é sempre diferente, nas suas propriedades e características físicas, químicas, biológicas e morfológicas, do material de origem (Fageria, 1989; Curi et al., 1993). A importância do solo na agricultura é indiscutível. O solo é um sistema bastante complexo. Um dado volume de solo é composto por material sólido, líquido e gasoso. A proporção aproximada dessas três fases é de 50% de sólidos, 25% de líquidos e 25% de gases (Fageria et al., 1999).

O solo é um recurso natural não renovável muito importante para a humanidade, e sua qualidade determina a produtividade e sustentabilidade dos sistemas agrícolas (Fageria et al., 1997). A qualidade do solo é definida de várias maneiras na literatura. De acordo com Soil Science Society of America (1997), a qualidade do solo é sua capacidade de funcionar dentro dos limites do ecossistema para sustentar a produtividade biológica, manter a qualidade do meio ambiente e promover a

sanidade das plantas e animais. Similarmente, Parr et al. (1992) definiram a qualidade do solo como sua capacidade de produzir culturas nutricionais de maneira sustentável a longo prazo e maximizar a saúde humana e animal, sem danificar o meio ambiente. A qualidade do solo não deve ser confundida com a saúde, a produtividade ou a fertilidade do solo. A saúde do solo é sua habilidade de produzir de acordo com sua potencialidade. As condições do solo ou sua saúde mudam com o tempo devido ao uso e manejo humanos ou a eventos naturais não usuais. A produtividade do solo é a sua capacidade de produzir certa quantidade de grãos ou de matéria seca sob determinadas condições de manejo. A fertilidade do solo refere-se à sua capacidade de fornecer os nutrientes essenciais, em quantidade e proporções adequadas, para o crescimento de plantas ou culturas específicas.

A boa qualidade do solo não somente aumenta a produtividade das culturas, mas também mantém a qualidade de meio ambiente e, conseqüentemente, a saúde das plantas, dos animais e dos homens. As propriedades físicas, químicas e biológicas do solo e os fatores ecológicos formam a qualidade do solo e determinam a produtividade do sistema agrícola (Karlen et al., 2003, 2006; Andrews et al., 2004). Esses fatores ou propriedades da qualidade do solo podem ser modificados ou melhorados, por meio da adaptação de práticas de manejo, embora algumas propriedades permanentes do solo, como profundidade, declividade, clima, textura e mineralogia, que contribuem significativamente para a sua qualidade, sejam muito pouco modificadas com o manejo.

Nesta revisão são discutidos a degradação do solo e os critérios de medição da qualidade do solo como meio, não apenas de garantir uma agricultura sustentada, mas melhorar o ambiente do solo para reduzir a poluição ambiental.

Degradação do solo

De acordo com o Programa Ambiental das Nações Unidas (Oldeman et al., 1991), degradação do solo é um processo que descreve fenômenos causados pelo homem que diminuem a capacidade atual e futura do solo em sustentar a vida humana. Lal (1989) definiram degradação do solo como a diminuição da qualidade do solo e/ou redução em sua habilidade de ser um recurso de múltiplo propósito, devido a causas naturais ou induzidas pelo homem. A degradação do solo inclui deterioração física, química e biológica, tais como declínio na sua fertilidade, declínio na condição estrutural, erosão, salinidade, alcalinidade, acidez e efeito de elementos tóxicos,

poluentes ou inundação excessiva (Lal, 1989). A degradação do solo afeta cerca de 35% da superfície do planeta (Mabbutt, 1978). Tem sido sugerido que, historicamente, a quantidade de terra que tem sido colocada fora do processo produtivo devido à degradação do solo é maior que aquela em uso produtivo atualmente. Estima-se que 0,3% a 0,5% (4 milhões a 7 milhões de hectares) da terra produtiva do mundo está sendo retirada da produção a cada ano e que a taxa de degradação está se acelerando. Havia uma projeção que, pelo final do século passado, 10 milhões de hectares (0,7%) seriam perdidos a cada ano (FAO, 1983). Além disso, a produtividade do solo nos países em desenvolvimento pode ser reduzida de um quinto (Dudal, 1982). Se essas projeções estão próximas da realidade, a quantidade de terra produtiva perdida pode ser semelhante à quantidade de novas terras incorporadas ao processo de produção (Larson, 1986).

Degradação física

A deterioração da estrutura do solo é um dos mais importantes processos de degradação do solo, pois regula a emergência das plântulas, o desenvolvimento das raízes, a disponibilidade de nutrientes e água para as plantas, as reações químicas na rizosfera e, conseqüentemente, o crescimento e o desenvolvimento das plantas. A formação de crosta sobre a superfície do solo é um dos parâmetros de degradação estrutural. Para caracterizar o encrustamento superficial do solo, considerando o conteúdo de silte e argila, foi desenvolvido pela FAO (1978) o seguinte índice:

$$\text{Índice de encrustamento} = (\% \text{ silte fino} + \% \text{ silte grosso})/\% \text{ argila}$$

Quando esse índice excede a 2,5, os solos são propensos a intenso encrustamento. Apresenta-se, a seguir, um índice de encrustamento baseado no conteúdo de matéria orgânica do solo, que também foi desenvolvido pela FAO (1978):

$$\text{Índice de encrustamento} = [1,5 (\% \text{ silte fino}) + 0,75 (\% \text{ silte grosso})]/[\% \text{ argila} + 10 (\% \text{ matéria orgânica})]$$

Quando esse índice excede a 2, os solos são propensos a intenso encrustamento.

As propriedades físicas do solo são aquelas características, processos ou reações de um solo que são causados por forças físicas e que podem ser descritos ou ex-

pressos em termos físicos ou equações (Soil Science Society of America, 1997). Algumas vezes, as propriedades físicas são confundidas com as propriedades químicas, sendo difícil separá-las, daí o termo físico-químicas. São exemplos de propriedades físicas: a densidade, a textura, a estrutura, a porosidade e a distribuição do tamanho dos poros. As propriedades físicas são alguns dos atributos importantes do solo na produção eficiente das culturas. Se essas propriedades estão em uma faixa favorável, a produção, sob condições ideais de manejo, será mais alta. As propriedades físicas do solo influenciam principalmente as relações ar-água, a temperatura do solo e a resistência mecânica, que prejudica a emergência das plântulas ou o crescimento radicular e, conseqüentemente, afeta diretamente o crescimento das plantas. Uma breve discussão de importantes propriedades físicas do solo em relação à produção das culturas é apresentada nesta seção.

Textura do solo

As partículas do solo apresentam diferentes granulometrias, variando de grandes grãos de areia a partículas de argila muito finas, as quais formam a textura do solo. Para propósitos práticos, as partículas do solo são agrupadas em três frações do solo, cada uma incluindo partículas que pertencem a uma determinada faixa de tamanho: areia (2 mm a 0,02 mm de diâmetro), silte (0,02 mm a 0,002 mm) e argila (abaixo de 0,002 mm). Essa propriedade física do solo não é alterada por práticas culturais ou de manejo. A classe textural do solo é a interpretação da proporção (em g kg⁻¹ de solo) das partículas de diferentes granulometrias. O solo pode ter classe textural argilosa, média ou arenosa.

O grupo areia inclui todos os solos cujo teor de areia em massa é de 70% ou mais, dividido novamente nas classes areia e areia-franca. São freqüentemente referidos como solos de textura grosseira. O grupo argila inclui todos os solos que contêm 40% ou mais de argila, e é dividido em três classes: argilo-arenoso, argilo-siltoso e argiloso. São chamados solos de textura fina e, devido à sua plasticidade e pegajosidade, são difíceis de arar. O grau de plasticidade e pegajosidade aumenta de argilo-arenoso para argiloso. Franco é uma mistura equilibrada de partículas de areia, silte e argila. Os solos francos, ou de textura média, exibem propriedades leves e pesadas em proporções aproximadamente iguais. O grupo franco é subdividido em franco-arenoso, franco, franco-siltoso, franco-argiloso, franco-argilo-arenoso e franco-argilo-siltoso. Sua faixa de textura varia de moderadamente grosseiro a moderadamente fino. A textura do solo influencia a capacidade de retenção de água, as taxas de percolação e infiltração, a aeração e, conseqüentemente, o

crescimento das plantas. Por exemplo, os solos de textura grosseira têm baixa capacidade de retenção de água, são fáceis de arar, apresentam altas taxas de percolação e infiltração e são bem drenados e aerados, em comparação com os solos de textura fina. Um solo franco, tendo geralmente densidade do solo intermediária, boa agregação, boa taxa de infiltração e nenhum impedimento à drenagem, representa um solo com ótimas condições físicas, podendo-se esperar boas produções, se outros fatores da produção não forem limitantes (Letey, 1985). Nas condições brasileiras, Latossolos e Nitossolos argilosos também apresentam esses bons atributos físico-hídricos.

Estrutura do solo

O agrupamento das partículas do solo (areia, silte e argila) em agregados ou “peds” e seu arranjo em vários padrões é denominado estrutura do solo. Do ponto de vista da produção, a estrutura do solo afeta o crescimento das plantas pela sua influência sobre infiltração, percolação, retenção de água, aeração do solo e impedimento mecânico ao crescimento radicular. O papel da estrutura do solo pode ser avaliado quanto à distribuição das classes dos agregados do solo, à estabilidade dos agregados e à distribuição do tamanho dos poros. Essas características do solo mudam conforme as práticas de preparo do solo e os sistemas de cultivo.

Densidade do solo

A densidade do solo é uma propriedade física que pode ser usada como um índice simples da condição estrutural geral de um determinado solo. Pode ser definida como a massa do solo seco por unidade de volume, e é expressa em megagramas por metro cúbico ou quilogramas por decímetro cúbico. A massa refere-se ao solo seco a 105°C-110°C, e o volume, ao volume ocupado por sólidos e por vazios (espaço poroso). A densidade da camada superficial da maioria dos solos varia de 1 Mg/m³ a 1,6 Mg/m³. As rochas consolidadas têm uma densidade média de 2,65 Mg/m³. A densidade do solo ao redor de 1,3 Mg/m³ pode ser ideal para o crescimento da maioria das culturas (Letey, 1985). Os solos com teor muito alto de matéria orgânica, como os Organossolos, geralmente têm densidade menor que 1 Mg/m³. A baixa densidade do solo é atribuída à baixa massa da matéria orgânica, em comparação com o das partículas inorgânicas, e ao efeito de granulação da matéria orgânica, que aumenta a porosidade do solo. Os Organossolos, intensamente pretos, com matéria orgânica bem decomposta, têm valores extremamente baixos de densidade do solo, 0,2 Mg/m³ a 0,3 Mg/m³. Os solos com baixos valores de den-

sidade (menor que 1 Mg/m^3) têm volumes de espaço poroso que constituem mais de 50% do seu volume total. Esses solos altamente porosos permitem rápida infiltração e percolação da água, mas também exibem adequada retenção de água, devido ao seu alto teor de matéria orgânica. São altamente permeáveis, bem drenados e bem aerados. Um solo permeável permite a pronta penetração de ar, água e raízes das plantas e, conseqüentemente, melhores produtividades. A aeração do solo refere-se à troca de dióxido de carbono e oxigênio entre o espaço poroso do solo e a atmosfera. O oxigênio é consumido, e o CO_2 é produzido no solo através do processo respiratório das raízes das plantas e da atividade microbiana.

Os regimes hídricos e a percolação têm efeito significativo sobre a elongação radicular. As condições de sequeiro favorecem maior crescimento radicular em profundidade que as condições de inundação. Em solos inundados, a boa percolação estimula o crescimento radicular mais profundo. O crescimento radicular mais profundo, sob condições de sequeiro e sob condições de inundação, com boa drenagem, é atribuído ao maior suprimento de oxigênio para as raízes do arroz. Assim, mesmo para o arroz, um suprimento externo de oxigênio parece ser importante para a elongação radicular (International Rice Research Institute, 1978).

A compactação do solo reduz o volume do espaço poroso para uma dada quantidade de solo, aumentando, assim, a sua densidade. Os subsolos compactados apresentam valores de densidade iguais ou maiores que $1,8 \text{ Mg/m}^3$. Altos valores de densidade do solo (maiores que $1,6 \text{ Mg/m}^3$) indicam limitada aeração, movimento de água muito lento, drenagem pobre e ocorrência de impedimento ao crescimento radicular. À medida que a densidade do solo aumenta e/ou ocorre uma estrutura pobre, a faixa de água não-limitante torna-se mais estreita. A determinação dessa faixa de água não-limitante a diferentes profundidades foi proposta como o método mais útil para caracterizar as propriedades físicas de um solo quando a produção está sendo considerada (Letey, 1985).

A densidade do solo geralmente diminui com o incremento do teor de matéria orgânica, e a magnitude da mudança é maior em solos arenosos e mínima em solos de textura média (Bauer & Black, 1992). O preparo profundo, a cerca de 30 cm, é uma prática de manejo do solo largamente aceita para melhorar a produtividade das culturas, pois propicia mudanças benéficas nas propriedades físicas do solo, tais como redução da densidade e da resistência do solo, aumento do volume de macroporos, o que promove aeração e drenagem interna e aumento da condutividade hidráulica saturada (Cassel & Nelson, 1985).

Entretanto, na região do cerrado, essa prática pode promover a aceleração da dinâmica da matéria orgânica e da atividade biológica, destruindo a naturalmente frágil condição estrutural dos solos tropicais e afetando seu comportamento e processos aí presentes, tendo como consequência a pulverização excessiva da camada arável, o encrostamento superficial e a formação de camadas coesas ou compactadas denominadas pé-de-arado, a 20-30 cm. Como forma de proteger o ambiente e dar sustentabilidade à exploração agrícola, os agricultores têm adotado o sistema plantio direto (SPD). Baseado na ausência de movimentação do solo e na manutenção de resíduos orgânicos na sua superfície, esse sistema provoca alterações na dinâmica da matéria orgânica e da atividade biológica, modificando, principalmente, os processos intrínsecos do solo, provocando alterações na estrutura e na dinâmica físico-hídrica do solo.

Apesar dos benefícios oriundos do SPD e sua ampla difusão na região sul do Brasil e rápido avanço para as regiões do cerrado brasileiro (Hernani & Salton, 1998), há trabalhos que indicam um aumento do estado de compactação dos solos submetidos a esse sistema (Secco, 2003; Silva, 2003). A compactação do solo é um processo inerente ao SPD e, portanto, sempre será observada com maior ou menor intensidade. Entretanto, esse sistema possui características que podem ser maximizadas com vistas a reduzir o processo de compactação e suas consequências. Entre essas, destaca-se a contínua adição superficial de resíduos vegetais pelas plantas de cobertura, que formam uma cobertura morta e enriquecem as camadas superficiais com matéria orgânica. A demarcação de rotas para o trator para as diversas operações na lavoura também pode contribuir para reduzir a compactação.

A matéria orgânica tem grande influência sobre o comportamento físico do solo, quando submetido a tráfego; ela diminui a densidade e o grau de compactação; por outro lado, aumenta a porosidade e, em algum grau, o espaço aéreo do solo quando o mesmo é submetido à compactação pelo trânsito de máquinas (Arvidsson, 1998). Como consequência, para um mesmo nível de tráfego, a produtividade é maior nos solos com maiores teores de matéria orgânica. Assim, com o passar dos anos, a densidade do solo sob plantio direto pode diminuir, devido, em parte, ao aumento do teor de matéria orgânica na camada superficial, melhorando a estrutura do solo (Voorhees & Lindstrom, 1984; Reeves, 1995).

A densidade do solo, quase que invariavelmente, aumenta com a sua profundidade. Isto pode ser parcialmente atribuído ao teor mais alto de matéria orgânica na camada superficial e às práticas de preparo do solo, que causam a ocorrência de uma estrutura relativamente frouxa na camada superficial e compactação no subsolo (Manrique & Jones, 1991).

As diferenças de densidade entre os solos são atribuídas primariamente às diferenças na distribuição do tamanho das partículas. Vários procedimentos têm sido desenvolvidos para estimar a densidade do solo com base em seus componentes texturais. Wambeke (1974) estimou a densidade do solo para Oxissolos com base no tamanho das partículas de areia. Shaffer (1988) considerou a densidade do solo como uma função do conteúdo de argila para solos de Minnesota (Estados Unidos). Scott & Wood (1989) estimaram a densidade do solo para Ultissolos e Alfissolos com base no conteúdo de carbono orgânico. Manrique & Jones (1991) fizeram o mesmo para Inceptissolos e Espodossolos; para Ultissolos, Alfissolos, Vertissolos, Oxissolos e Inceptissolos obtiveram valores de R^2 variando de 0,53 a 0,74, a partir de análises de regressão entre a densidade do solo e os conteúdos de carbono orgânico e argila, conteúdo de água a -1.500 kPa e relação entre conteúdo de água a -1.500 kPa e conteúdo de argila.

Densidade de partículas

A densidade de partículas é a massa do solo seco por unidade de volume dos sólidos do solo, expresso em megagramas por metro cúbico, ou quilogramas por decímetro cúbico. Junto com a densidade do solo, a densidade de partículas é mais comumente usada na determinação da porosidade total dos solos. A densidade de partículas da maioria dos solos minerais geralmente varia dentro da estreita faixa de 2,6 Mg/m³ a 2,75 Mg/m³. Na ausência de dados atuais, a densidade de partículas dos solos é freqüentemente assumida como igual a 2,65 Mg/m³ (Biielders et al., 1990). Os solos com alto teor de matéria orgânica têm densidade de partículas menor que 2,65 Mg/m³, devido à baixa massa dos materiais orgânicos. A porosidade do solo pode ser calculada pela seguinte equação:

$$\text{Porosidade (\%)} = 100 - (\text{Densidade do solo} \times 100 / \text{Densidade de partículas})$$

A porosidade total varia conforme o teor de matéria orgânica, a profundidade do solo, o preparo do solo, o sistema de cultivo e a textura do solo.

Degradação química

A degradação química é a mudança nas propriedades químicas do solo do estado favorável para o desfavorável, o que resulta no decréscimo da produtividade do solo. As propriedades químicas importantes do solo são pH, fertilidade, capacidade de troca de cátions (CTC), saturação por bases, oxirredução e teor de matéria orgânica. O processo de degradação pode ocorrer devido à fertilização inadequada, lixiviação, inundação, prática da monocultura por longo tempo na mesma área, erosão, uso de água salina para irrigação em regiões áridas ou semi-áridas e à calagem excessiva de solos ácidos. As propriedades químicas do solo mencionadas anteriormente são discutidas em relação à degradação e à produtividade das culturas.

pH do solo

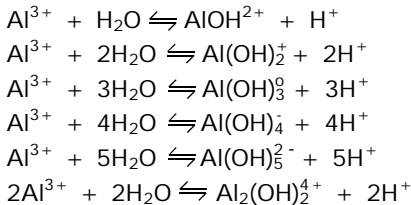
O pH é freqüentemente citado como a mais importante propriedade química do solo e pode ser definido como o logaritmo negativo da concentração de íons hidrogênio. Na realidade, a atividade do íon hidrogênio (a_{H^+}) é que é medida através de métodos potenciométricos, em vez da concentração de hidrogênio. Assim, o pH é mais corretamente definido pela seguinte equação (Peech, 1965):

$$pH = - \log a_{H^+}$$

O significado prático da relação logarítmica é que cada mudança de unidade no pH do solo corresponde a uma mudança dez vezes maior na acidez ou na alcalinidade. Isso significa que um solo com pH igual a 6,0 tem dez vezes mais H^+ ativo que um outro com pH igual a 7,0, e que a necessidade de calagem cresce rapidamente à medida que diminui o pH.

O pH indica a acidez ou a alcalinidade relativa de um substrato. A escala de pH cobre uma faixa de zero a 14, em que 7,0 indica pH neutro, valores abaixo de 7,0, acidez, e acima de 7,0, alcalinidade. A maioria dos solos agrícolas tem uma faixa de pH de 4,0 a 9,0. Embora o pH seja usado para identificar um solo que necessita de calagem, freqüentemente a quantidade de calcário é altamente variável, devido à natureza dinâmica de vários processos do solo e às interações desses processos com as plantas e os microrganismos (Adams, 1981).

A medida do pH na solução do solo representa a acidez ativa do solo. Os íons hidrogênio e alumínio absorvidos pelo solo, bem como outros constituintes do solo que geram íons hidrogênio, constituem a acidez reserva. Os íons alumínio geram íons hidrogênio através de uma série de reações de hidrólise (Lindsay, 1979):



Para simplificar, esses tipos de hidrólise são geralmente escritos sem a água de hidratação, mesmo a água estando presente. Vários óxidos e hidróxidos de alumínio podem existir no solo. A atividade do Al^{3+} em equilíbrio com quaisquer desses minerais é dependente do pH, decrescendo mil vezes para cada unidade de aumento no pH (Lindsay, 1979). As sucessivas reações de hidrólise estão associadas com soluções de pH sucessivamente mais alto, pois o dreno para íons hidrogênio aumenta com o aumento do pH. A distribuição das espécies de alumínio conforme o pH é: íon $\text{Al}(\text{OH})_2^+$, de menor importância e existente somente em uma faixa estreita de pH; íon $\text{Al}(\text{OH})_5$, que ocorre somente em valores de pH acima daqueles dos solos agrícolas; íon Al^{3+} , predominante em valores de pH abaixo de 4,7; $\text{Al}(\text{OH})_2$, em pH entre 4,7 e 6,5; $\text{Al}(\text{OH})_3$, em pH entre 6,5 e 8,8; $\text{Al}(\text{OH})_4$, em pH acima de 8,0 (Marion et al., 1976). Existe considerável controvérsia sobre a hidrólise de Al^{3+} e as constantes de estabilidade para várias espécies monômeras e polímeras (Lindsay, 1979), havendo necessidade de investigações adicionais.

As medições de pH do solo podem ser utilizadas como base inicial para a previsão do comportamento químico dos solos, em especial quanto à disponibilidade de nutrientes e à presença de elementos tóxicos. Fageria et al. (1999) relataram que o limite superior de pH para a maioria das culturas anuais está ao redor de 6,0, tanto em solos de cerrado como em solos de várzeas.

Fageria et al. (1999) relataram que a absorção da maioria dos macronutrientes aumenta com a elevação do pH na faixa de 6,1 a 6,7. A absorção dos micronutrientes, entretanto, diminui significativamente com o aumento do pH do

solo; isto é, quando se faz a calagem de solos ácidos, devem ser tomados cuidados especiais para evitar a deficiência de micronutrientes. Um dos efeitos significativos do pH do solo ocorre sobre a absorção de fósforo, pois há redução da taxa de suprimento de H_2PO_4 para as raízes, devido à mudança na forma do fosfato, à medida que o pH aumenta. No caso de pH acima de 5,7, para um aumento no pH, ocorre gradualmente um decréscimo da proporção de H_2PO_4 e um aumento da proporção de HPO_4 . A forma H_2PO_4 é absorvida pelas raízes cerca de dez vezes mais rapidamente que a forma HPO_4 (Chen & Barber, 1990).

Um pH com alcalinidade ligeira a moderada é característico de solos calcários, onde os íons fosfato são também fixados como fosfato de cálcio, e as deficiências de zinco, ferro e manganês são muito comuns. Um pH extremamente alcalino indica a presença de excesso de sódio no solo, o qual é muito danoso às plantas. Isto significa que tanto pH baixo como alto têm efeitos adversos sobre o crescimento das plantas, sendo esperadas baixas produtividades sob esses valores desfavoráveis.

Capacidade de troca de cátions

A capacidade de troca de cátions (CTC) é definida como a soma dos cátions trocáveis retidos pelo solo e expressa em miliequivalentes por 100 g ou em cmol de cátions por kg de solo. Os principais cátions trocáveis encontrados em solos ligeiramente ácidos são cálcio, magnésio, hidrogênio, potássio e sódio. Os principais fatores que afetam a CTC do solo são textura, quantidade e tipo de argila e teor de matéria orgânica. As magnitudes relativas da CTC de vários colóides do solo mostram que: os óxidos e a caulinita têm baixa CTC; a illita tem CTC moderada; a vermiculita e a montmorilonita têm CTC muito alta; e a matéria orgânica tem a CTC mais alta. A capacidade de troca de cátions pode ser classificada como baixa (< 10 cmol/kg), moderadamente baixa (10 cmol/kg a 20 cmol/kg), moderadamente alta (20 cmol/kg a 30 cmol/kg), alta (30 cmol/kg a 50 cmol/kg) e muito alta (> 50 cmol/kg) (Fageria et al., 1999). Essa é uma classificação aproximada, que pode ser considerada como um ponto de referência. A magnitude da CTC do solo indica sua capacidade relativa de reter formas de cátions adicionados por fertilizantes, tais como NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e K^+ . Os solos com alta CTC têm normalmente alta capacidade de retenção de água, o que é de significância especial na produção das culturas. A CTC normalmente é determinada a pH 7,0 ou 8,2, dependendo do método. A determinação da CTC do solo em seu pH natural é chamada de CTC efetiva,

que reflete mais acuradamente as condições encontradas pelas raízes das plantas que a CTC determinada a um dado pH padrão, tal como 7,0 ou 8,2 (Foth & Ellis, 1988). A valência é o principal fator que afeta a probabilidade de que um cátion seja adsorvido na superfície dos colóides. Um cátion trivalente, como Al^{3+} , é mais fortemente adsorvido que Ca^{2+} , que é mais fortemente adsorvido que K^+ . Os cátions divalentes são retidos com cerca de duas vezes mais energia que os monovalentes. No caso de cátions de valência similar, quanto menor for o cátion, maior será a densidade de carga por unidade de volume e, portanto, maior será a atração de moléculas de água. Essas moléculas de água atraídas fazem com que o raio hidratado de um cátion menor seja maior que o raio hidratado de um cátion maior. Por esta razão, Ca^{2+} é mais fortemente adsorvido que Mg^{2+} , enquanto K^+ é mais fortemente adsorvido que Na^+ (Foth & Ellis, 1988). A capacidade de troca de cátions pode ser aumentada pela adição de matéria orgânica e pela calagem de solos ácidos.

O método de NH_4OAc 1M, para determinar bases trocáveis (sódio, potássio, magnésio e cálcio), e o de KCl 1M, para determinar a acidez trocável e o teor de alumínio, são provavelmente os métodos mais usados (Thomas, 1982). O método de NH_4OAc 1M utiliza sal tamponado (reação de troca tamponada a pH 7,0), enquanto o de KCl 1M utiliza sal não-tamponado para medir a acidez trocável e o teor de alumínio, pois o pH durante a reação de troca é controlado pelo solo e não pelo sal do extrator. Algumas comparações de métodos de determinação da CTC (Gillman et al., 1983) têm mostrado que, se os solos analisados têm cargas dependentes do pH, os métodos com sal tamponado oferecem valores mais altos de CTC que aqueles que usam sal não-tamponado.

Saturação por bases

A saturação por bases, outra propriedade química do solo importante para a produção das culturas, pode ser definida como a proporção da capacidade de troca de cátions ocupada por bases trocáveis, que são potássio, cálcio, magnésio e sódio. A partir dos dados da análise química do solo, calcula-se a porcentagem de saturação por bases pela seguinte fórmula:

$$\text{Saturação por bases (\%)} = [((\text{Ca} + \text{Mg} + \text{K} + \text{Na})/\text{CTC})] \times 100$$

Se a metade da CTC estiver ocupada por bases trocáveis, a saturação por bases será de 50%. Os outros 50% são ocupados por hidrogênio e alumínio

trocáveis. A baixa saturação de bases é uma característica dos solos ácidos, enquanto a alta saturação por bases é uma característica de solos levemente ácidos a alcalinos. Uma classificação arbitrária de saturação por bases, para a produção das culturas, é a seguinte: muito baixa < 25%, baixa 25 a 50%, média 50 a 75% e alta > 75% (Fageria et al., 1999).

Esses são valores aproximados, uma vez que os valores reais variam entre as espécies e mesmo entre as cultivares de uma mesma espécie. Os valores adequados para cada cultura devem ser determinados experimentalmente em cada região agroclimática. Quando a saturação por bases é baixa, há uma predominância de hidrogênio e alumínio adsorvidos no complexo de troca e probabilidade de ocorrer deficiência de cálcio, magnésio e potássio. Além disso, para se obter uma ótima produção, deve haver um balanço apropriado entre os diferentes cátions básicos. Os valores relatados na literatura são de 65% de cálcio, 10% de magnésio, 5% de potássio e 20% de hidrogênio (Bear et al., 1945). Graham (1959) alterou esse conceito e assegurou que o crescimento da cultura e a produtividade seriam pouco afetados pela saturação por bases dentro das faixas de 65% a 85% de cálcio, 6% a 12% de magnésio e 2% a 5% de potássio, com os íons hidrogênio ocupando os sítios remanescentes. Adams & Henderson (1962) consideraram o solo como deficiente em magnésio se menos de 4% dos sítios trocáveis estivessem ocupados por esse elemento.

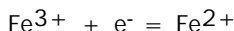
Em solos ácidos, a saturação por bases pode ser aumentada pela calagem. A relação entre calagem e saturação por bases em um Oxissolo do Brasil Central pode ser observada na Tabela 1. Originalmente, a saturação por bases do solo sob investigação era de cerca de 20%, mas aumentou linearmente com o incremento das doses de calcário. Para atingir a saturação de bases de cerca de 60%, considerada adequada para a maioria das culturas alimentares, foram necessárias 6 t de calcário dolomítico/ha (Fageria, 2001; Fageria & Stone, 2004). Os Oxissolos dos trópicos contêm predominantemente óxidos e caulinita e têm, caracteristicamente, CTC baixa a moderadamente baixa e, também, alta capacidade de tamponamento. A capacidade tampão refere-se à resistência da solução do solo a mudanças no pH. Isso é devido à ocorrência de concentrações muito maiores de hidrogênio e alumínio adsorvidos ou à acidez reserva do solo, que continua fornecendo íons hidrogênio para a solução do solo.

Tabela 1. Influência de calagem na saturação por bases em solo de cerrado. Os valores são média de dois anos após a colheita de soja.

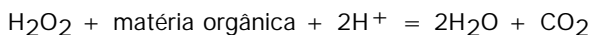
Dose de calcário (Mg ha ⁻¹)	Saturação por bases (%)
0	17,0
3	45,7
6	62,5
12	76,7
18	87,2

Oxirredução

Oxirredução é a reação química na qual os elétrons são transferidos de um doador para um receptor (Ponnamperuma, 1972). O doador perde elétrons e aumenta seu número de oxidação ou é oxidado; o receptor ganha elétrons e diminui seu número de oxidação ou é reduzido. O Fe²⁺ é um doador de elétrons ou um agente redutor quando se oxida para Fe³⁺. A redução do Fe³⁺ em solução ácida é:



O peróxido de hidrogênio (H₂O₂) é um agente oxidante quando aceita elétrons da matéria orgânica e oxida-a para CO₂ (Bohn et al., 1979).



A principal fonte de elétrons para a redução biológica é a matéria orgânica. Em solos bem drenados, o potencial de oxirredução varia de +0,4 a +0,6 V, enquanto em solos saturados ou inundados, na presença de substâncias orgânicas, o processo de redução pode fazer o potencial decrescer para +0,2 V ou menos (Orlov, 1979). Os principais fatores que controlam o nível do potencial são a aeração e a ocorrência de processos biológicos.

A oxirredução muda as concentrações dos nutrientes e, assim, a sua disponibilidade para as plantas. Mudanças importantes ocorrem nas concentrações dos nutrientes, algumas das quais são resumidas a seguir: aumento do pH em solos ácidos e decréscimo em solos calcários e sódicos, o que provoca mudanças na disponibilidade dos nutrientes; redução de Fe³⁺ para Fe²⁺ e de Mn⁴⁺ para

Mn^{2+} , aumentando, portanto, a disponibilidade desses nutrientes; redução de NO_3^- e NO_2^- para N_2 e N_2O , aumentando, portanto, as perdas de nitrogênio em solos inundados; e redução de SO_4 para S^{2-} , podendo causar toxicidade às plantas e reduzir a disponibilidade de nutrientes.

A redução aumenta a disponibilidade de fósforo, silício e molibdênio e decresce as concentrações de zinco e cobre solúveis em água.

Fertilidade do solo

O principal desafio na agricultura moderna é manter e/ou aumentar a fertilidade do solo. Os níveis de nutrientes no solo são diminuídos pela absorção direta pelas culturas, lixiviação, desnitrificação e erosão. Em alguns solos altamente intemperizados, a fixação de fósforo é também um problema sério. Há necessidade contínua de reposição dos nutrientes e de restauração da fertilidade e do potencial produtivo dos solos. Adicionalmente, as cultivares com alta capacidade produtiva usam intensivamente os nutrientes e, sem a adequada fertilidade do solo, apresentam produtividades inferiores às das cultivares tradicionais. É consenso geral que as cultivares com alta capacidade produtiva foram o estímulo para a Revolução Verde mas, sem fertilizantes, essa revolução não teria ocorrido (International Fertilizer Development Center, 1990). Um estudo do Instituto Internacional de Pesquisa de Arroz (IRRI) mostrou que os fertilizantes são responsáveis por, pelo menos, 50% do aumento de produtividade alcançado durante a Revolução Verde. Similarmente, em 1990 a FAO estimou que 47% do aumento potencial na produção global para o ano 2000 deveria vir dos fertilizantes (International Fertilizer Development Center, 1990).

Quando a fertilidade do solo é baixa, a produtividade das culturas é incrementada à medida que aumenta o uso de fertilizantes, até que seja alcançado um máximo, após o qual a produtividade permanece estável ou decresce. As relações entre os níveis de fertilizantes e a produtividade das culturas podem ser expressas utilizando-se modelos estatísticos, os quais são conhecidos como curvas de resposta, ou funções de produção. Entre os muitos modelos matemáticos que podem ser usados para expressar a relação entre o uso de fertilizantes e a produtividade, os mais populares são o quadrático, o logaritmico e o da raiz quadrada. Um modelo quadrático pode ser representado da seguinte maneira (Martinez, 1990):

$$\text{Produtividade} = a + b_1 (F) - b_2 (F)^2$$

em que: a = interseção ou produtividade na dose zero do fertilizante; b_1 = coeficiente de regressão linear; b_2 = coeficiente de regressão quadrática; e F = quantidade de aplicação do fertilizante.

O desmatamento, a desertificação, a salinização e a erosão do solo representam sérios problemas para o ambiente em muitos países. O aumento no uso de fertilizantes orgânicos e inorgânicos, em conjunção com outros insumos complementares, pode ajudar a reduzir os problemas ambientais pela elevação da produtividade das terras cultivadas e, assim, reduzir a pressão sobre as terras marginais, que são suscetíveis à desertificação e à erosão. O fornecimento de nutrição balanceada para obtenção de altas produtividades nas áreas cultivadas pode ajudar a proteger as florestas, pois a necessidade de desmatamento de novas áreas para cultivo será reduzida. É reconhecido que o desenvolvimento da produção sustentada de alimentos, para atingir a necessidade de alimentos projetada dos países em desenvolvimento, será criticamente dependente do uso de fertilizantes inorgânicos para construir ou manter a fertilidade do solo (International Fertilizer Development Center, 1990). Assim, torna-se claro que os fertilizantes exercem um papel muito importante na agricultura sustentada e aumentam a renda dos agricultores. Os fatores que impedem os agricultores de usarem as quantidades adequadas de insumos na produção das culturas, incluindo fertilizantes, podem ser os relacionados a seguir: carência de fertilizantes na época e no lugar corretos; falta de infra-estrutura suficiente para transporte e distribuição; falta de facilidades de crédito; preço dos fertilizantes muito alto em comparação com o preço do produto agrícola; falta de informação sobre níveis ótimos de fertilizantes a serem aplicados nas diferentes culturas, devido à falta de dados de testes de calibração dos solos; falta de um serviço de extensão efetivo; carência de sementes de cultivares melhoradas, que podem responder a níveis mais altos de fertilizantes com maiores produtividades e, conseqüentemente, proporcionar maiores lucros; ocorrência de período de estiagem durante a estação chuvosa, o que pode trazer maiores riscos aos agricultores se eles usarem doses mais altas de fertilizantes; e altas infestações de doenças, insetos e plantas daninhas, que reduzem a eficiência de uso do fertilizante.

Salinidade

A salinidade tem sido reconhecida como um dos principais problemas da agricultura em regiões áridas e semi-áridas, onde a chuva é insuficiente para lixiviar os sais para

fora da rizosfera. Além disso, em regiões áridas, a irrigação é necessária para uma agricultura de sucesso, e a água de irrigação geralmente contém centenas e, em casos extremos, milhares de miligramas de sais solúveis por litro, comparada à água da chuva, com cerca de 10 mg/L (Pessarakli, 1991). Desde o início do século XX, várias pesquisas sobre o efeito dos sais no crescimento das plantas têm sido conduzidas, cobrindo uma gama de aspectos, desde a resposta das plantas à salinidade até o comportamento dos sais no solo (Hasegawa et al., 1986; George et al., 1988).

Degradação Biológica

A degradação biológica refere-se à perda de matéria orgânica, redução do carbono da biomassa e declínio da atividade biótica da fauna do solo (Lal, 1989). Os fatores climáticos responsáveis pela degradação biológica são o déficit de água e as altas temperaturas. Em algumas regiões tropicais, a queima das florestas é uma prática comum na limpeza da área. Isso pode reduzir seriamente a atividade biótica benéfica da terra queimada, pois a taxa de decomposição da matéria orgânica do solo dobra a cada 10°C de aumento na temperatura média. Para avaliar a degradação biológica, a FAO, segundo Lal (1989), usa o seguinte índice climático:

$$K = (1/12) S_{12}^1 e^{0,1065t} \cdot (P/ETP) \text{ (com } P < ETP)$$

em que: K = taxa de declínio do húmus (%/ano); P = precipitação; ETP = evapotranspiração potencial; e t = temperatura média do ar durante o mês.

Se $P > ETP$, $P/ETP = 1$ e se $t < 0$, então, $t = 0$. Isto significa que o teor de matéria orgânica do solo é um dos mais importantes fatores biológicos que afetam a produção das culturas.

Erosão

A erosão do solo causa a sua degradação física, química e biológica.

A erosão do solo pela água e pelo vento é um problema sério em várias partes do mundo. O processo de erosão carrega terras produtivas, assoreia canais e reservatórios de água e aumenta o risco de inundação de grandes áreas. Conseqüentemente, o dano econômico causado pela erosão é alto. A erosão do solo pela água consiste de eventos seqüenciais de separação da partícula,

arrastamento, transporte e deposição. À medida que a água umedece a superfície do solo, as forças coesivas entre as partículas do solo são reduzidas e o impacto das gotas de água quebra os agregados do solo (Agassi et al., 1985). A desintegração dos agregados libera pequenas partículas de solo, que podem ser transportadas pela água de escoamento e pelo salpico. Esse é o passo inicial na erosão (Baver et al., 1972). A erosão pelo vento é especialmente importante em regiões secas.

O problema de erosão começou com o avanço da agricultura. O homem perturbou o equilíbrio natural entre clima, vegetação e solo pela aração de pradarias e pela derrubada de florestas para o plantio de culturas. Os fatores que contribuem para as perdas por erosão são clima, solo, topografia, cultivo e falta de práticas conservacionistas.

A erosão acelerada do solo causada pelas atividades humanas é prejudicial no que refere à redução da produtividade agrícola e aos impactos no ambiente, como a poluição. Os efeitos da erosão sobre a produtividade das culturas são de preocupação global, porque os recursos do solo são finitos e são necessárias estimativas acuradas da produtividade do solo para o planejamento nacional (Williams et al., 1981). Em um encontro de cientistas nos Estados Unidos, para estabelecer prioridades de pesquisa para os recursos solo e água, foi dada a mais alta prioridade à pesquisa sobre a relação entre erosão do solo e produtividade. Um ponto de vista é que a erosão do solo ameaça a produção de alimentos, mas outro sustenta que é difícil estabelecer a extensão na qual a erosão ameaça a produtividade do solo (Brink et al., 1977; Brown & Wolf, 1984). A erosão é também preocupante na Europa, Ásia e África (Fageria, 1992). Em um artigo de revisão, Spiers & Frost (1987) relataram que a erosão acelerada em terras aráveis na Grã-Bretanha estava mais generalizada que se pensava. Em escala nacional, a incidência de erosão é ainda baixa, mas existem algumas regiões aráveis com alta proporção de solos suscetíveis, principalmente siltosos e franco-arenosos. Localmente e em algumas fazendas individuais, é comum que a erosão periódica do solo seja um grande problema.

A maioria dos nutrientes imóveis, como o fósforo e, em certo grau, o potássio, concentra-se, geralmente, na camada arável do solo. Com a erosão dessa camada, o efeito nesses nutrientes é mais pronunciado, se comparado com outros nutrientes essenciais.

Está claro que a erosão do solo é um fator limitante para a produção das culturas. Para reduzir este problema, devem ser adotadas as medidas de controle necessárias, as quais variam conforme a região e dependem da magnitude do problema. Relacionam-se, a seguir, alguns métodos de manejo e uso da terra que podem ser combinados para reduzir a erosão: cultivo em contorno; cultivo em faixa; plantio direto; terraços e curvas de nível são as medidas de conservação do solo mais populares em terras agrícolas declivosas; rotação de culturas; melhoria da fertilidade do solo e uso de plantas de cobertura para formação de palha, que é o meio mais efetivo para combater a erosão.

Algumas pesquisas têm mostrado que a porcentagem de cobertura do dossel é um dos principais fatores que determinam o grau de proteção dado ao solo pela cultura (Estados Unidos, 1988). A taxa de movimentação do solo pelo salpico decresce exponencialmente com o aumento da cobertura (Fageria et al., 1997).

Práticas de manejo na conservação da qualidade do solo

Conservar ou manter a qualidade do solo no nível desejável é importante não só para a produção agrícola mas também para manter a qualidade do meio ambiente e reduzir a poluição. Esse assunto é muito complexo devido ao envolvimento do clima, solo, planta e fator humano e às interações entre esses fatores. Porém, com a adoção de algumas práticas de manejo de solo e planta é possível reduzir a degradação do solo e manter a sua qualidade em nível desejável. Essas práticas são a manutenção do teor de matéria orgânica no solo, uso de adubação em níveis adequados, uso de calagem adequada em solos ácidos, aumento da eficiência de uso da água e fertilizantes, uso de material genético mais tolerante às condições adversas do solo e clima, rotação de culturas, uso de culturas de cobertura, controle de doenças, pragas e planta daninhas e controle da erosão do solo. Discussão detalhada dessas práticas é dada por Fageria et al. (1999, 2005), Alcântara & Camargo (2001), Karlen et al. (2004, 2006).

Conclusões

A população mundial é de mais de 6 bilhões pessoas, e a projeção é de aumentar para mais de 8 bilhões até 2025. Portanto, a grande questão é sustentar os avanços na agricultura para satisfazer as demandas e aspirações das gerações do

presente e do futuro. O solo e a água, dois recursos importantes na produção das culturas, devem ser preservados, sem degradar o ambiente, o que significa dizer que os sistemas agrícolas futuros devem ser economicamente viáveis, ecologicamente sustentáveis e social e politicamente aceitáveis. Portanto, no futuro, a agricultura, em todas as suas formas, deve funcionar dentro das restrições impostas pelo ambiente. Isso, naturalmente, será extremamente difícil, mas não impossível, e, se alcançado, será extremamente compensador. A identificação de fatores limitantes à produtividade permite o desenvolvimento de um sistema que otimize os níveis dos fatores controláveis requeridos para alcançar a mais alta produtividade possível em determinado solo e clima.

Nesse artigo são discutidas a qualidade do solo, sua degradação e práticas de manejo para manter a qualidade do solo a longo prazo, condições que podem ajudar a comunidade agrícola a atingir as metas de uma produção eficiente e rentável, com um ambiente aceitável. As previsões são otimistas quanto ao crescimento populacional, ao equilíbrio do suprimento de alimentos e à manutenção de um ambiente aceitável. Entretanto, para atingir esses objetivos, existem grandes desafios e, ao mesmo tempo, excelentes oportunidades para que os cientistas agrícolas redirecionem e intensifiquem as pesquisas que julgarem mais necessárias para resolver os problemas de produção, bem como para a preservação do meio ambiente. Nesse sentido, seguem algumas recomendações:

- Desmatamento, desertificação, salinização e erosão do solo representam sérios problemas ao ambiente em muitas partes do mundo. O aumento do uso criterioso de fertilizantes orgânicos e inorgânicos, em conjunto com outros insumos complementares, pode auxiliar na redução dos problemas ambientais, pelo aumento da produtividade das terras cultivadas, e também na redução das pressões sobre as terras marginais que são suscetíveis à desertificação e à erosão do solo.
- Deve-se fazer maior uso produtivo do potencial biológico e genético de espécies de plantas, ou de cultivares dentro de uma espécie, para reduzir o custo dos insumos e reduzir a contaminação do ambiente.
- A formação de um pacote viável de manejo para o controle de pragas, que integre práticas biológicas, químicas e culturais, requer uma análise dos agroecossistemas em seus aspectos ecológico, sociológico e ambiental.
- É preciso desenvolver mais pesquisas para determinar os limites para erosão do solo, controle de pragas, práticas de preparo do solo, déficit hídrico,

contaminação da água e outras conseqüências ambientais das práticas agrícolas.

- Na maioria dos países, os fundos para pesquisas agrícolas são inadequados. É preciso aumentá-los; caso contrário, é irreal esperar progresso mais rápido no desenvolvimento e na transferência de novas tecnologias efetivas para aumentar a produtividade e manter o ambiente em equilíbrio.

Referências Bibliográficas

ADAMS, F. Alleviating chemical toxicities: liming acid soils. In: ARKIN, G. F.; TAYLOR, H. M. (Ed.). **Modifying the root environment to reduce crop stress**. St. Joseph: American Society of Agriculture Engineering, 1981. p. 269-301. (ASAE. Monograph, 4).

ADAMS, F.; HENDERSON, J. B. Magnesium availability as affected by deficient and adequate levels of potassium and lime. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 26, n. 1, p. 65-68, Jan./Feb. 1962.

AGASSI, M.; MORIN, J.; SHAINBERG, I. Effect of raindrop impact energy and water salinity on infiltration rates of sodic soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 1, p. 186-190, Jan./Feb.1985.

ALCÂNTARA, M. A. K.; CAMARGO, O. A. Fator de retardamento e coeficiente de dispersão-difusão para o crômio (III) em solos muito intemperizados, influenciado pelo pH, textura e matéria orgânica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 25, n. 1, p. 209-216, jan./mar. 2001.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The soil management assessment framework: A quantative soil quality evaluation method. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 6, p. 1945-1962, Nov./Dec. 2004.

ARVIDSSON, J. Influence of soil texture and organic matter content on bulk density, air content, compression index and crop yield in field and laboratory experiments. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 49, n. 1/2, p. 159-170, Nov. 1998.

BAUER, A.; BLACK, A. L. Organic carbon effects on available water capacity of three soil textural groups. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 56, n. 1, p. 248-254, Jan./Feb. 1992.

BAVER, L. D.; GARDNER, W. H.; GARDNER, W. R. **Soil physics**. New York: J. Wiley, 1972. 498 p.

BEAR, F. E.; PRINCE, A. L.; MALCOLM, J. C. **The potassium needs of New Jersey soils**. New Brunswick: Rutgers University, 1945. (New Jersey Experimental Station. Bulletin, 721).

BIELDERS, C. L.; DEBACKER, L. W.; DELVAUX, B. Particle density of volcanic soils as measured with a gas pycnometer. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 3, p. 822-826, May/June 1990.

BOHN, H. L.; McNEAL, B.; O'CONNOR, G. A. **Soil chemistry**. New York: J. Wiley, 1979. 329 p.

BRINK, R. A.; DENSMORE, J. W.; HILL, G. A. Soil deterioration and the growing world demand for food. **Science**, Washington, v. 197, n. 4304, p. 625-630, Aug. 1977.

BROWN, L. R.; WOLF, E. C. **Soil erosion: quiet crisis in the world economy**. Washington: World Watch Institute, 1984. 49 p. (World Watch Institute. Paper, 60).

CASSEL, D. K.; NELSON, L. A. Spatial and temporal variability of soil physical properties of Norfolk loamy sand as affected by tillage. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 5, n. 1, p. 5-17, 1985.

CHEN, J. H.; BARBER, S. A. Soil pH and phosphorus and potassium uptake by maize evaluated with an uptake model. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 4, p.1032-1036, July/Aug. 1990.

CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A. C.; FONTES, L. E. F. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1993. 90 p.

DUDAL, R. Land degradation in a world perspective. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 37, n. 5, p. 245-249, 1982.

ESTADOS UNIDOS. Department of Agriculture. **A national program for soil and water conservation: the 1988-97 update**. Washington, 1988.

FAGERIA, N. K. Efeito da calagem na produção de arroz, feijão, milho e soja em solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, n. 11, p. 1419-1424, nov. 2001.

FAGERIA, N. K. **Maximizing crop yields**. New York: Marcel Dekker, 1992. 274 p.

FAGERIA, N. K. **Solos tropicais e aspectos fisiológicos das culturas**. Brasília, DF: EMBRAPA-DPU, 1989. 425 p. (EMBRAPA-CNPAF. Documentos, 18).

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F. Produtividade de feijão no sistema plantio direto com aplicação de calcário e zinco. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, n. 1, p. 73-78, jan. 2004.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; BAILEY, B. A. Role of cover crops in improving soil and row crop productivity. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 36, n. 19/20, p. 2733-2757, 2005.

FAGERIA, N. K.; BALIGAR, V. C.; JONES, C. A. **Growth and mineral nutrition of field crops**. 2. ed. New York: Marcel Dekker, 1997. 624 p.

FAGERIA, N. K.; STONE, L. F.; SANTOS, A. B. dos. **Maximização da eficiência de produção das culturas**. Brasília, DF: Embrapa Comunicação para Transferência de Tecnologia; Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 1999. 294 p.

FAO. **Guidelines for the control of soil degradation**. Rome, 1983. 38 p.

FAO. **A provisional methodology for soil degradation assessment**. Rome, 1978. 84 p.

FOTH, H. D.; ELLIS, B. G. **Soil fertility**. New York: J. Wiley, 1988. 212 p.

GEORGE, T.; SINGLETON, P. W.; BENBOHLOOL, B. Yield, soil nitrogen uptake, and nitrogen fixation by soybean from maturity groups grown at three elevations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, n. 4, p. 563-567, July/Aug. 1988.

GILLMAN, G. P.; BRUCE, R. C.; DAVEY, B. G.; KIMBLE, J. M.; SEARLE, P. L.; SKJEMSTAD, J. O. A comparison of methods used for determination of cation-exchange capacity. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 14, n. 11, p. 1005-1014, 1983.

GRAHAM, E. R. **An explanation of theory and methods of soil testing**. St. Louis: Missouri Agriculture Experimental Station, 1959. Não paginado. (Bulletin, 734).

HASEGAWA, P. M.; BRESSAN, R. A.; HANDA, A. K. Cellular mechanisms of salinity tolerance. **Horticultural Science**, Alexandria, v. 21, n. 6, p. 1317-1324, Dec. 1986.

HERNANI, L. C.; SALTON, J. C. O CPAO e o sistema plantio direto. **Revista do Plantio Direto**, Passo Fundo, n. 45, p. 27-28, maio/jun. 1998.

INTERNATIONAL FERTILIZER DEVELOPMENT CENTER. **Annual Report 1990**. Muscle Shoals, 1990. 52 p.

INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Annual Report for 1977**. Los Baños, 1978. 548 p.

KARLEN, D. L.; ANDREWS, S. S.; WIENHOLD, B. J. Soil quality, fertility, and health-historical context, status and perspectives. In: SCHJONNING, P.; ELMHOLT, S.; CHRISTENSEN, B. T. (Ed.). **Managing soil quality: challenges in modern agriculture**. Wallingford: CABI International, 2004. p. 17-33.

KARLEN, D. L.; ANDREWS, S. S.; WIENHOLD, B. J.; DORAN, J. W. Soil quality: Humankind's foundation for survival. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 58, n. 4, p. 171-179, Jul./Aug. 2003.

KARLEN, D. L.; HURLEY, E. G.; ANDREWS, S. S.; CAMBARDELLA, C. A.; MEEK, D. W.; DUFFY, M. D.; MALLARINO, A. P. Crop rotation effects on soil quality at three northern corn/soybean belt locations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, n. 3, p. 484-495, May/June 2006.

LAL, R. Soil degradation in relation to climate. In: INTERNATIONAL RICE RESEARCH INSTITUTE. **Climate and food security**. Los Baños, 1989. p. 257-276.

LARSON, W. E. The adequacy of world soil resources. **Agronomy Journal**, Madison, v. 78, n. 2, p. 221-225, Mar./Apr. 1986.

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

LINDSAY, W. L. **Chemical equilibria in soils**. New York: J. Wiley, 1979. 449 p.

MABBUTT, J. A. The impact of desertification as revealed by mapping. **Environmental Conservation**, Lausanne, v. 5, n. 1, p. 45-56, 1978.

MANRIQUE, L. A.; JONES, C. A. Bulk density of soils in relation to soil physical and chemical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, n. 2, p. 476-481, Mar./Apr. 1991.

MARION, G. M.; HENDRICKS, D. M.; DUTT, G. R.; FULLER, W. H. Aluminum and silica solubility in soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 121, n. 2, p. 76-85, 1976.

MARTINEZ, A. **Fertilizer use statistics and crop yields**. Muscle Shoals: International Fertilizer Development Center, 1990. 34 p. (IFDC. Technical Bulletin, T-37).

OLDEMAN, L. R.; HAKKELING, R. T. A.; SOMBROEK, W. G. **World map of the status of human-induced soil degradation**: an explanatory note. 2. ed. Wageningen: International Soil Reference and Information Centre, 1991. 34 p.

ORLOV, D. S. Physical chemistry. In: FAIRBRIDGE, R. W.; FINKL JUNIOR, C. W. (Ed.). **The encyclopedia of soil science**. Strondsburg: Dowden, Hutchinson and Ross, 1979. v. 1, p. 377-382.

PARR, J. F.; PAPENDICK, R. I.; HORNICK, S. B.; MEYER, R. E. Soil quality: attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. **American Journal of Alternate Agriculture**, Greenbelt, v. 7, n. 1/2, p. 5-11, 1992.

- PEECH, M. Hydrogen ion activity. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society of Agronomy, 1965. v. 2, p. 914-926.
- PESSARAKLI, M. Water utilization and soil salinity control in arid-zone agriculture. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 22, n. 17/18, p. 1787-1796, 1991.
- PONNAMPERUMA, F. N. The chemistry of submerged soils. **Advances in Agronomy**, New York, v. 24, p. 19-96, 1972.
- REEVES, D. W. Soil management under no-tillage: soil physical aspects. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 1., 1995, Passo Fundo. **Resumos...** Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1995. p. 127-130.
- SCOTT, H. D.; WOOD, L. S. Impact of crop production on the physical status of a typic Albaqualf. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n. 6, p. 1819-1825, Nov./Dec. 1989.
- SECCO, D. **Estados de compactação e suas implicações no comportamento mecânico e na produtividade de culturas em dois latossolos sob plantio direto**. 2003. 171 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- SHAFFER, M. J. Estimating confidence bands for soil-crop simulation models. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 52, n. 6, p. 1782-1789, Nov./Dec. 1988.
- SILVA, V. R. da. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. Santa Maria: UFSM, 2003. 171 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS.
- SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA. **A glossary of soil science terms**. Madison, 1997. 34 p.
- SPIERS, R. B.; FROST, C. A. Soil water erosion in arable land in the United Kingdom. **Research and Development in Agriculture**, Essex, v. 4, n. 1, p. 1-11, 1987.

THOMAS, G. W. Exchangeable cations. In: PAGE, A. L. (Ed.). **Methods of soil analysis**. 2. ed. Madison: American Society of Agronomy: Soil Science Society of America, 1982. p. 259-265. (ASA. Agronomic Monograph, 9).

VOORHEES, W. B.; LINDSTROM, M. J. Long-term effects of tillage method on soil tilth independent of wheel traffic compaction. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 48, n. 1, p. 152-156, 1984.

WAMBEKE, A. van. **Management of properties of ferralsols**. Rome: FAO, 1974. 111 p. (FAO. Soils Bulletin, 23).

WILLIAMS, J. R.; ALLMARAS, R. R.; BENARD, K. G.; LYLES, L.; MOLDENHAUER, W. C.; LANGDALE, G. W.; MEYER, L. G.; RAWIS, E. J.; DARBY, G.; DANIELS, R.; MAGLEBY, R. Soil erosion effects on soil productivity: a research perspective. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 36, n. 2, p. 82-90, 1981.

