

REVISÃO DE LITERATURA

UMA VISÃO SOBRE QUALIDADE DO SOLO⁽¹⁾

Fabiane Machado Vezzani⁽²⁾ & João Mielniczuk⁽³⁾

RESUMO

No início da década de 1990, a comunidade científica, consciente da importância do solo para a qualidade ambiental e para a sustentabilidade agrícola, iniciou a abordagem sobre Qualidade do Solo (QS). Este trabalho teve o objetivo de analisar o estado da arte em QS e fazer uma reflexão sobre as propostas de avaliação. A maior parte dos estudos concentra-se na identificação de um índice que seja capaz de servir como indicador de QS (IQS), para auxiliar na avaliação de terras em relação à degradação, fazer estimativas de necessidades de pesquisa e de financiamentos e julgar práticas de manejo utilizadas. Alguns autores propõem os critérios para definição de um IQS. Das abordagens sobre QS, percebe-se que existem três linhas de pensamento: busca por atributos do solo como IQS; matéria orgânica do solo como IQS; e QS como resultado de processos no sistema solo-planta. Conclui-se que o grande avanço nessa área é a abordagem sistêmica do solo, razão pela qual é mais importante identificar como obter QS, do que identificar atributos para medi-la. Sob essa análise, o sistema solo só atinge qualidade quando integrado às plantas e à biota edáfica, e a avaliação do seu funcionamento, que é a própria QS, deve ter como base os princípios da termodinâmica do não-equilíbrio, ciência que rege os sistemas abertos. Os sistemas agrícolas que favorecem a QS são aqueles que cultivam plantas intensamente, de preferência de espécies diferentes, sem o revolvimento do solo.

Termos de indexação: abordagem sistêmica, termodinâmica do não equilíbrio, fluxo de energia, estados de ordem.

SUMMARY: AN OVERVIEW OF SOIL QUALITY

Soil quality (SQ) has become a major research issue among soil scientists since the early 1990's, following the recognition of the role soils play in terms of agricultural sustainability and environmental quality. This review aims to discuss the state of the art concerning soil quality and look into the proposed indicators for its evaluation. Most part of the research work in the literature is focused on the identification of a soil attribute that would serve as a SQ

⁽¹⁾ Recebido para publicação em julho de 2008 e aprovado em abril de 2009.

⁽²⁾ Professora Adjunta do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola, Universidade Federal do Paraná – UFPR. Rua dos Funcionários 1540, CEP 80035-050 Curitiba (PR). E-mail: vezzani@ufpr.br

⁽³⁾ Professor Titular Colaborador do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Av. Bento Gonçalves 7712, CEP 91540-000 Porto Alegre (RS). Bolsista do CNPq. E-mail: joao.mielniczuk@ufrgs.br

indicator (SQI) underlying the evaluation of soil degradation and the estimation of research needs and funding, as well as a critical evaluation of soil management practices. Some authors have proposed criteria for the definition of a SQI. In this literature review three major approaches were clearly identified: search for soil attributes to be used as SQI; organic matter as SQI; and SQ as a result of processes in the soil-plant system. It was concluded that the understanding of the soil as a system represents the most significant advance and that therefore the identification of soil management practices to achieve SQ are more important than the effort to obtain a SQ indicator. From this point of view, soil should be treated as an open system where the non-equilibrium thermodynamics theory is applicable and the SQ emerges from the interactions of the soil-plant-biota system. The agricultural systems that enhance SQ are those where the soil is intensively cultivated with plants preferably of different species, and without tilling.

Index terms: systemic approach, non-equilibrium thermodynamics, energy flow, order states.

CONCEITO DE QUALIDADE DO SOLO

A discussão sobre Qualidade do Solo (QS) intensificou-se no início dos anos 1990, quando a comunidade científica, consciente da importância do solo para a qualidade ambiental, começou a abordar, nas publicações, a preocupação com a degradação dos recursos naturais, a sustentabilidade agrícola e a função do solo nesse contexto. Lal & Pierce (1991) foram precursores em alertar sobre a relação do manejo do solo e a sustentabilidade da agricultura. Os números alarmantes de áreas degradadas física e quimicamente, contaminadas por agroquímicos, e as perspectivas catastróficas fizeram Lal & Pierce (1991) instigar a comunidade científica a buscar sistemas de manejo inovadores, capazes de balancear o requerimento do solo e das culturas. “A ênfase não está em maximizar a produção, mas sim em otimizar o uso do recurso e sustentar produtividade por um longo período”, alertaram eles.

Nessa época, a filosofia de trabalho do Instituto Rodale, nos Estados Unidos, tornou-se mais divulgada, a qual se fundamenta em que a saúde das pessoas está intimamente relacionada à *saúde do solo*. Harberern (1992), presidente do Instituto, encorajou pesquisadores e estudantes a divulgar essa ideia, ressaltando que as soluções para os problemas da saúde humana estão na agricultura, em produzir alimentos de forma regenerativa, garantindo a saúde do homem, a partir da saúde do solo. Em 1992, o *Jornal Americano de Agricultura Alternativa* dedicou dois números à QS. Os trabalhos relacionaram sustentabilidade agrícola e QS, divulgando os primeiros conceitos sobre a natureza e a importância do tema (Youngberg, 1992).

Dando continuidade a essa reflexão, Doran & Parkin (1994) propuseram o seguinte conceito à QS, que mais tarde foi reformulado por Doran (1997), sendo ainda utilizado nos dias atuais: “*Qualidade do solo é a capacidade de um solo funcionar dentro dos limites de um ecossistema natural ou manejado, para sustentar a produtividade de plantas e animais, manter ou aumentar a qualidade do ar e da água e*

promover a saúde das plantas, dos animais e dos homens”. Em outras palavras, é a capacidade de o solo exercer suas funções na natureza (Doran, 1997), que são: funcionar como meio para o crescimento das plantas; regular e compartimentalizar o fluxo de água no ambiente; estocar e promover a ciclagem de elementos na biosfera; e servir como tampão ambiental na formação, atenuação e degradação de compostos prejudiciais ao ambiente (Larson & Pierce, 1994; Karlen et al., 1997). Portanto, QS está relacionada com as funções que capacitam o solo a aceitar, estocar e reciclar água, nutrientes e energia (Carter, 2001). Nesse contexto, QS é a integração das propriedades biológicas, físicas e químicas do solo, que o habilita a exercer suas funções na plenitude.

Para o Serviço de Conservação dos Recursos Naturais (NRCS) do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), QS é expressa como a capacidade do solo em desempenhar suas funções no momento atual e a preservação dessas funções para uso futuro (USDA-NRCS, 2008). Nesse sentido, é na percepção de tempo que reside a relação entre QS e sustentabilidade agrícola.

Sustentabilidade agrícola é conceituada como a capacidade de um sistema agrícola produzir alimentos e fibras sem comprometer as condições que viabilizam esse processo de produção (Gliessman, 2000). A sustentabilidade está fundamentada em cinco pilares: produtividade, segurança, proteção, viabilidade e aceitabilidade (Smyth & Dumanski, 1995). Portanto, a relação entre QS e sustentabilidade agrícola consiste na produção de alimentos e fibras em um solo capaz de cumprir suas funções, num processo de produção ambientalmente seguro, economicamente viável e socialmente aceito. QS é a base para o desenvolvimento da sustentabilidade agrícola (Wang & Gong, 1998; Doran & Zeiss, 2000), servindo como indicador para o manejo de terras (Herrick, 2000), do solo e de culturas (Hussain et al., 1999). A sustentabilidade agrícola depende da manutenção da QS no âmbito do ecossistema e da interação positiva com os ecossistemas vizinhos ao longo do tempo (Mello, 2006).

A maioria do pensamento em relação à QS está centrada na identificação de um índice capaz de servir como indicador, assim como existem indicadores para qualidade do ar e da água. Cientistas do solo, agricultores e instituições governamentais têm interesse em obter um indicador de qualidade do solo (IQS) para avaliar terras, em relação à degradação, estimar necessidades de pesquisa e de financiamentos e julgar práticas de manejo, a fim de monitorar mudanças nas propriedades e nos processos do solo, na sustentabilidade e na qualidade ambiental, que ocorram no tempo, em resposta ao uso da terra e às práticas de manejo (Granatstein & Bezdicek, 1992; Harberern, 1992; Parr et al., 1992; Doran & Parkin, 1994; Doran, 1997, Huffman et al., 1998; Karlen et al., 2001).

Um IQS deve identificar um conjunto de propriedades do solo, atendendo aos seguintes critérios: elucidar processos do ecossistema e relacionar aos processos-modelo; integrar propriedades biológicas, físicas e químicas do solo e os respectivos processos; ser acessível a muitos usuários e aplicável a condições de campo; ser sensível a variações de manejo e de clima ao longo do tempo; e, quando possível, ser componente de banco de dados já existente (Doran & Parkin, 1994). Além disso, os indicadores devem ser práticos para uso tanto por cientistas como por agricultores, extensionistas, ecologistas e instituições governamentais, numa ampla classe de situações ecológicas e socioeconômicas (Granatstein & Bezdicek, 1992; Sanders, 1992; Doran & Parkin, 1994; Sherwood & Uphoff, 2000). Devem ser fáceis de medir, e as medidas obtidas devem ser reprodutíveis (Gregorich et al., 1994; Seybold et al., 1998). O conceito adequado de um IQS deve ser sistêmico e não reducionista; dessa forma, os indicadores devem descrever a maioria dos processos ecológicos do solo (Doran, 1997). Um IQS adequado pode variar entre locais, dependendo do tipo ou uso do solo, de quais funções do solo são necessárias e dos fatores de formação deste (Arshad & Coen, 1992). Infiltração de água no solo, por exemplo, não seria um indicador apropriado para terras de várzeas, e sim para as demais áreas agrícolas (Seybold et al., 1998). A escolha de determinados atributos pode ser adequada para locais específicos, e a transferência dessa escolha deve ser restrita a pontos geográficos similares em características biológicas, físicas e químicas do solo (Liebig & Doran, 1999).

Desde o início da discussão sobre QS e sustentabilidade agrícola, praticamente todos os cientistas do solo refletem sobre o assunto. Linhas paralelas de pensamento surgiram. Uma linha procura identificar quais os melhores IQS, tanto de ordem biológica, física ou química. Outra linha posiciona-se em relação ao melhor IQS: matéria orgânica do solo. E uma linha alternativa deixa de lado a busca de atributos indicadores e analisa processos no sistema solo-planta. Desta última surge a abordagem sistêmica da QS.

ATRIBUTOS DO SOLO COMO INDICADORES DE SUA QUALIDADE

Na busca pelos melhores IQS, Doran & Parkin (1994) e Larson & Pierce (1994) foram os pioneiros. Doran & Parkin (1994) propuseram um conjunto básico de indicadores de ordem biológica, física e química: textura, profundidade de solo e de raízes, densidade do solo, infiltração de água no solo, capacidade de armazenamento e retenção de água, conteúdo de água no solo, temperatura do solo, teores de C e N orgânico total, pH, condutividade elétrica, teores de N mineral (NH_4^+ e NO_3^-), P, K, C e N da biomassa microbiana, N potencialmente mineralizável, respiração do solo, C na biomassa em relação ao C orgânico total e respiração microbiana em relação à biomassa. A proposta é de que esses indicadores sejam relacionados com cinco funções do solo: habilidade de regular e compartimentalizar o fluxo de água; habilidade de regular e compartimentalizar o fluxo de elementos químicos; promover e sustentar o desenvolvimento de raízes; manter um habitat biológico adequado; e responder ao manejo, resistindo à degradação. Os atributos recebem coeficientes de ponderação relativos a considerações geográficas e socioeconômicas e com base nos três componentes da QS apresentados pelos autores: produtividade, qualidade ambiental e saúde humana e animal. O índice obtido é comparado com as condições que maximizam a produção e o desempenho ambiental. Larson & Pierce (1994) propuseram a determinação de um Conjunto Mínimo de Dados (MDS) e Funções Pedotransfer (PTFs). O MDS consiste na disponibilidade de nutrientes, C orgânico total e lábil, textura, capacidade de água disponível para as plantas, estrutura, densidade ou resistência do solo à penetração de raízes, profundidade máxima de raízes, pH e condutividade elétrica. As PTFs são funções matemáticas, que relacionam características e propriedades do solo com atributos mensuráveis. Exemplos de PTFs são: capacidade de adsorção de P, que é relacionada com Al e Fe extraídos com oxalato, e condutividade hidráulica, que é relacionada com a textura do solo. A QS é quantificada pela determinação de todos esses atributos, fazendo uma avaliação comparativa a um padrão ou à dinâmica do MDS e das PTFs no tempo.

Várias propostas de indicadores, formas e fórmulas para avaliar a QS surgiram e, geralmente, estão relacionadas com a área de concentração dos pesquisadores (Doran & Jones, 1996). Alguns propõem a avaliação de atributos químicos e físicos (Arshad & Coen, 1992; Karlen & Stott, 1994; De Clerck et al., 2003; Dexter, 2004; Logsdon & Karlen, 2004; Chen et al., 2006); outros, de atributos biológicos (Stork & Eggleton, 1992; Bohlen & Edwards, 1994; Linden et al., 1994; Pankhurst, 1994; Parisi et al., 2005); e outros, de atributos microbiológicos (Visser & Parkinson, 1992; Dick, 1994; Fauci & Dick, 1994; Turco et al., 1994; Kennedy

& Papendick, 1995; Rice et al., 1996; Schloter et al., 2003; Bending et al., 2004; Monokrousos et al., 2006).

O movimento no Brasil não está diferente. Pesquisadores da ciência do solo estão buscando os indicadores mais adequados para avaliar QS nas condições brasileiras, e surgem propostas de indicadores físicos (D'Andréa et al., 2002; Costa et al., 2003; Alves et al., 2007; Fidalski & Tormena, 2007), químicos (Ribeiro et al., 2007), biológicos (Vargas & Scholles, 2000; Matsuoka et al., 2003; Schmitz, 2003; Baretta et al., 2005; Chaer & Tótola, 2007; Franchini et al., 2007; Ribeiro et al., 2007) e a integração destes (Araújo et al., 2007).

Nessa linha, a fim de compilar esses indicadores e facilitar a avaliação da QS em campo, Doran (1994) desenvolveu um kit de teste, o qual é constituído pela determinação de atributos biológicos, físicos e químicos. Esse kit, recomendado pelo USDA-NRCS, mede, entre outros atributos, densidade do solo, taxa de infiltração de água no solo, capacidade de armazenamento de água, respiração do solo, condutividade elétrica, pH do solo e teor de nitrato. A avaliação da QS é feita comparando os atributos medidos entre os tratamentos estudados. Foi utilizado e adaptado em mais de 50 locais nos Estados Unidos e em vários outros países (Sarrantonio et al., 1996). No Brasil, Amado et al. (2007) utilizaram o kit em dois experimentos de longa duração localizados no Rio Grande do Sul, comparando-o com os métodos tradicionais empregados na ciência do solo, e o kit se mostrou eficiente na avaliação da QS.

Também há propostas para avaliar QS que consideram a integração dos atributos do solo com a paisagem, obtendo índices normatizados conforme as funções consideradas relevantes para o local e o objetivo do solo (Karlen & Stott, 1994; Karlen et al., 1994a,b; Huffman et al., 1998; McQuaid & Olson, 1998; Hussain et al., 1999), e, ainda, com a possibilidade de gerar mapas (Smith et al., 1994). O avanço dessas propostas foi o desenvolvimento de softwares de modelagens para avaliação da QS (Droogers & Bouma, 1997; Bouma & Droogers, 1998; Wang & Gong, 1998). Sanchez et al. (2003) propuseram uma avaliação baseada em atributos quantitativos da paisagem e na classificação dos solos.

Nessa mesma linha de pensamento, que busca a determinação de um IQS, alguns autores acreditam que a produtividade é a expressão final da qualidade de um solo, pois a alta produtividade das culturas ocorre quando atributos biológicos, físicos e químicos estão em boas condições. Lapen et al. (2004) afirmaram que bons níveis de variáveis relacionadas com alta produtividade significam que essas variáveis são boas para determinar QS. Por sua vez, o Instituto de Qualidade do Solo do USDA-NRCS afirma que a QS não pode ser determinada pela medida somente da produtividade das culturas, qualidade da água ou qualquer outro atributo isolado (USDA-NRCS, 2008).

A avaliação qualitativa da QS por meio da percepção pessoal, principalmente dos agricultores, é considerada por alguns pesquisadores a aproximação ideal como IQS (Harris & Bezdicek, 1994; Garyland et al., 1994; Romig et al., 1995, 1996; Andrews et al., 2003; Sanchez et al., 2003; Barrios et al., 2006); inclusive, o Instituto de Qualidade do Solo do USDA-NRCS possui uma metodologia específica para desenvolver esse tipo de avaliação localmente (USDA-NRCS, 2008). Um grupo de pesquisadores da América do Sul e da África do Sul também trabalhou em um guia metodológico com a finalidade de incentivar as comunidades a desenvolverem o monitoramento da QS no local, além de uma ferramenta auxiliar na tomada de decisão quanto às práticas de manejo do solo. A proposta é identificar e classificar indicadores qualitativos locais de QS e relacioná-los com padrões técnicos do solo e, assim, desenvolver uma linguagem comum entre agricultores, extensionistas e cientistas (Barrios et al., 2006).

Uma linha paralela à avaliação da QS por indicadores é a avaliação da sustentabilidade das terras. Da mesma forma, pesquisadores buscam indicadores que devem seguir critérios similares aos propostos para os IQS (Zinck & Farshad, 1995; Huffman et al., 1998). Um procedimento para avaliação da sustentabilidade das terras, que requer indicadores físicos e biológicos do solo, econômicos e sociais, foi desenvolvido pela Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação (FAO) e pelo Conselho Internacional para Pesquisa e Manejo (IBSRAM) (Smyth & Dumanski, 1995). Alguns testes desse procedimento foram feitos e enfatizaram a facilidade e a simplicidade do método (Gomez et al., 1996). Além disso, indicaram que características individuais dos produtores, em relação à tomada de decisão, são componentes importantes na sustentabilidade das terras (Gameda & Dumanski, 1995).

Relacionando a avaliação da QS com a sustentabilidade, há a preocupação de determinar a QS ao longo do tempo. Nesse sentido, Larson & Pierce (1994) sugerem que há duas maneiras para avaliar a sustentabilidade de um sistema de manejo agrícola: avaliação comparativa e avaliação dinâmica. Na primeira, o desempenho de um sistema é avaliado em relação a alternativas em um dado tempo somente. Na avaliação dinâmica, o desempenho de um sistema é avaliado em relação a alternativas através do tempo. Monitorar mudanças nos IQS-chave no tempo pode determinar se a qualidade de um solo sob um dado tipo de uso e sistema de manejo está melhorando, estável ou declinando (Shukla et al., 2006). O monitoramento temporal da QS pode ser feito por métodos clássicos de estatística. O método geoestatístico de krigagem fornece uma análise da estrutura espacial e uma visão das mudanças nas propriedades do solo entre amostragens no tempo e nos modelos de uso da terra (Sun et al., 2003).

No final dos anos 1990, a comunidade científica começou a questionar-se sobre a utilização de IQS, no sentido de que, havendo um índice disponível, o que deve ser feito a partir de então. Doran & Zeiss (2000) afirmaram que IQS é meramente “*um meio para atingir o fim*”, e este fim, segundo os autores, é o manejo dos sistemas agrícolas com base nos princípios da sustentabilidade. Sojka & Upchurch (1999, 2003) foram enfaticamente contra a definição de atributos para compor um IQS. Estes autores julgaram que a simples indexação da diversidade das funções do solo é prematura para a tomada de decisão (em relação ao manejo empregado) nas infinitas condições em que o solo se encontra. Acreditam que as práticas de manejo são mais impactantes sobre a habilidade de o solo funcionar que as propriedades intrínsecas do solo. Por isso, profissionais e cientistas do solo devem buscar “*qualidade do manejo do solo antes que o manejo da Qualidade do Solo*”. Nesse sentido, Fliebbach et al. (2007) defenderam que nenhuma prática isolada de manejo aumentará a QS, e sim estratégias integradas.

Em meados dos anos 2000, os pesquisadores que seguem esta linha pela busca de IQS ainda procuram atributos, justificando sua adequação em relação à sensibilidade diante das diferentes práticas de manejo num curto espaço de tempo de adoção destas. Trabalhos de validação de indicadores são realizados em vários locais (diferentes condições de solo e clima), comparando diferentes sistemas de manejo e culturas.

Observa-se que os IQS nem sempre são acessíveis e fáceis de usar em condições de campo e por diversas pessoas, como sugerem os critérios para sua obtenção. Pelos métodos propostos, a maioria das determinações exige equipamentos sofisticados, disponíveis apenas em instituições de pesquisa. No entanto, o grande mérito dos primeiros pensadores em QS – os quais praticamente se enquadram nesta linha da busca pelo melhor indicador – está centrado em como eles conseguiram valorizar e atrair a atenção do meio científico e da sociedade em geral para a QS. A condição cultural e o estilo de vida da sociedade no final do século XX colaboraram para que a preocupação com a QS recebesse valorização especial. Talvez por esse motivo, atualmente a comunidade científica como um todo se volta de uma forma ou de outra para a QS e para a influência desta na sustentabilidade agrícola. As linhas de pensamento seguintes são frutos desse pensamento inicial.

MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO COMO INDICADOR DE QUALIDADE DO SOLO

Os Pesquisadores que consideram a matéria orgânica do solo (MOS) como o indicador ideal para avaliar QS, estão fundamentados no fato de as várias funções e processos biológicos, físicos e químicos que ocorrem no solo estarem relacionados diretamente com

a presença de matéria orgânica (Karlen et al., 1992; Carter & Stewart, 1996; Lal, 1997; Reeves, 1997; Herrick & Wander, 1998; Monreal et al., 1998; Seybold et al., 1998; Pulleman et al., 2000; Carter, 2001; Franzluebbers, 2002; Shukla et al., 2006). Além disso, a matéria orgânica é eficiente na monitorização de mudanças da QS no tempo (Shukla et al., 2006).

Trabalhos vêm sendo realizados para identificar qual componente da MOS melhor representa os critérios exigidos para constituir um IQS. Carbono total, C e N na matéria orgânica particulada (MOP) e C na biomassa microbiana foram sugeridas por Bolinder et al. (1999) para os solos do leste canadense, pois foram os componentes da MOS mais úteis e de mais fácil medição para constituir um conjunto mínimo de dados para avaliar QS. Avaliações de C e N totais, C na fração leve e na MOP, C e N mineralizáveis, C na biomassa microbiana, carboidratos e enzimas do solo foram sugeridas por Gregorich et al. (1994), com a ressalva de que essas avaliações devem ser caracterizadas no tempo e no espaço e interpretadas considerando as características dos sistemas agrícolas estudados. Carbono mineralizado e carbono da MOP foram os indicadores de manejo mais sensíveis quando Elliot et al. (1994) avaliaram agroecossistemas no Cinturão do Milho e nas Grandes Planícies dos Estados Unidos. Estudos mostram que a MOP é o indicador mais sensível para diferenciar QS, tanto em culturas anuais (Liebig et al., 2004) como em culturas perenes (Koutika et al., 2005). No Brasil, autores também pesquisaram sobre qual componente da MOS é o melhor indicador para as diferentes condições ambientais do País e concluíram que carbono da fração leve e carbono lábil (Leite et al., 2003), C e N da fração < 53 µm (Conceição et al., 2005) e C e N da biomassa microbiana e da fração leve (Xavier et al., 2006) são os mais indicados.

A relação dos compartimentos de carbono e nitrogênio na matéria orgânica total e particulada, na biomassa microbiana e na mineralização potencial, determinados em amostras de solo coletadas na superfície e na subsuperfície do solo, foi proposta como IQS por Franzluebbers (2002). Relações >2 indicam que a QS pode estar melhorando, pois as alterações nos atributos do solo resultantes das práticas de manejo ocorrem, principalmente, na camada superficial. Segundo esse autor, este IQS serve para comparar sistemas em condições diversificadas de solo.

Com base na literatura, Blair et al. (1997) verificaram que o carbono lábil tanto declina como se recupera mais rápido que o carbono não lábil ou carbono total, conduzindo à evidência de que o C lábil é o indicador mais sensível que a dinâmica do carbono total do sistema. Em razão disso, propuseram o Índice de Manejo do Carbono (IMC), que mede a quantidade de carbono lábil em relação ao carbono total, comparando um sistema testado com um sistema-referência. Alertaram que não há valores para este índice que possam ser considerados bons ou ruins. O

IMC fornece uma medida da taxa de mudança do sistema estudado, relativa a uma área comparativamente mais estável.

Para as condições brasileiras, autores utilizaram o IMC proposto por Blair et al. (1997). Leite et al. (2003), por meio do IMC, avaliaram sistemas de cultivo de milho com adubação orgânica e mineral. Salton (2005) avaliou sistemas de manejo de produção agropecuária na região Centro-Oeste do Brasil, considerando o C orgânico total, a MOP e a matéria orgânica associada aos minerais. Dieckow et al. (2005) compararam sistemas de produção agrícola no Sul do País com diferentes aportes de matéria seca, porém determinando a labilidade da MOS por meio do fracionamento físico, cujo método, conforme enfatizado por Vieira et al. (2007), revelou ser sensível para comparar a QS em diferentes sistemas de manejo.

Além da busca pela fração da MOS que melhor representa um IQS, a grande discussão da ciência do solo, que relaciona QS e MOS, é quanto à capacidade dos solos de sequestrar CO₂ da atmosfera (Lal et al., 1995; Carter & Stewart, 1996; Lal, 1997; Lal et al., 1998a; Reicosky & Forcella, 1998; Soil and Tillage Research, 1998; Corazza et al., 1999; Bayer et al., 2000a,b; Amado et al., 2001; Mielniczuk et al., 2003, Lal, 2004, Zanatta et al., 2007). A quantidade de C no solo representa duas vezes a quantidade de C na atmosfera (Lal et al., 1998b). Práticas de manejo que favorecem a oxidação da MOS pelos microrganismos e a consequente liberação de CO₂ podem elevar ainda mais a quantidade de C na atmosfera. Contudo, o processo também pode ser inverso: o solo pode contribuir para retirar CO₂ da atmosfera e retardar seu retorno, quando práticas conservacionistas de manejo são utilizadas. Estas práticas, como sistema plantio direto e rotação de culturas, conduzem ao aumento da MOS, garantindo a QS e contribuindo para diminuir a emissão de CO₂ do solo para a atmosfera (Bayer et al., 2000b)

O avanço das reflexões sobre QS conduziu ao pensamento atual da comunidade científica, que o USDA-NRCS divulga em sua homepage: “*A maneira mais prática para aumentar QS é promover o melhor manejo da MOS*”. Manejar o solo para aumentar a MOS pode melhorar a produtividade e qualidade ambiental e pode reduzir a severidade e os custos financeiros de fenômenos naturais, como seca, alagamento e doenças. Além disso, aumentar os teores de MOS pode reduzir as concentrações de CO₂ atmosférico, o que contribui para a mudança climática (USDA-NRCS, 2008).

Atualmente, as reflexões em relação à QS parecem conduzir a indicadores biológicos, inclusive no Brasil. As recomendações de manejo direcionam para práticas que favoreçam a biologia do solo, pois são os organismos os responsáveis pelas grandes transformações físicas e químicas no solo, que o habilitam exercer suas funções na natureza. Os indicadores (micro)biológicos refletem os processos e as transformações que estão

intimamente relacionados às funções que o solo necessita exercer para ser considerado de qualidade (Barrios et al., 2006; Monokrousos et al., 2006), além de serem indicadores sensíveis e preditores precoces de mudanças nos processos de dinâmica da MOS (Marinari et al., 2006). Govaerts et al. (2006) acreditam que a inclusão de propriedades biológicas em um IQS, como organismos do solo, provavelmente melhoraria o entendimento do sistema solo.

QUALIDADE DO SOLO COMO RESULTADO DOS PROCESSOS NO SISTEMA SOLO-PLANTA

A busca pelo entendimento de como o sistema solo funciona caracteriza a linha de pensamento que analisa os processos que ocorrem no sistema solo-planta para avaliar a QS. Essa linha é direcionada por Addiscott (1995), que considera o solo, termodinamicamente, um sistema aberto e que, como tal, tende para um estado estável, caracterizado pela mínima produção de entropia. O princípio da Mínima Produção de Entropia diz que a realização de trabalho termodinâmico contínuo no sistema solo-planta, a partir da energia solar, conduz à auto-organização deste sistema. Em adição aos processos de ordenação, há também processos dissipativos, que produzem entropia, dissipando energia calorífica ao acaso. Por esse princípio, a QS depende da manutenção do balanço adequado entre ordem e dissipação dos processos biológicos, físicos e químicos, que ocorrem no sistema solo-planta. A fotossíntese e seus processos associados referem-se à ordenação, na teoria de Addiscott (1995), pois a partir de moléculas pequenas, como CO₂, NH₃ e H₂O, formam estruturas de grande peso molecular, complexas e ordenadas, diminuindo a entropia do sistema. No sentido contrário estão a respiração e a decomposição do material orgânico, processos dissipativos que, a partir de estruturas ordenadas, com grande peso molecular, produzem pequenas moléculas, como CO₂, CH₄, N₂O e NO₃⁻, todas indesejáveis ambientalmente, quando em excesso. Essa análise propõe a busca de sistemas agrícolas que permitam o estabelecimento do estado estável, em que a produção de entropia é mínima. A avaliação da QS deve ser feita pela determinação da quantidade de pequenas moléculas existentes no sistema solo-planta, como CO₂, CH₄, N₂, NO₃⁻, NH₄⁺, H₂PO₄⁻ e HPO₄²⁻. Contudo, atualmente, sabe-se, por meio da termodinâmica do não equilíbrio, ramo da ciência proposto por Prigogine (Prigogine, 1996, 2002; Prigogine & Stengers, 1992, 1997), que a entropia produzida nos processos dissipativos é a fonte de ordem do sistema, como será visto no próximo item. Os sistemas abertos são chamados de estruturas dissipativas por Prigogine, nas quais a dissipação de energia, resultante do fluxo de energia e matéria, é

fonte de energia ordenadora do sistema. Portanto, existe uma estreita e paradoxal associação: estrutura e ordem de um lado, dissipação de energia de outro.

Coleman et al. (1998), com base em Adiscott (1995), afirmaram que “*a chave para a avaliação da QS é a medição de processos essenciais que ocorrem no solo*”. Esses autores propuseram a relação fotossíntese/respiração (F/R) para avaliar o estado de qualidade de um solo. A relação F/R determina a produção líquida de C no sistema solo-planta, medida pela quantidade de C fixado e pela quantidade de C respirado num determinado período de tempo. A relação indica o balanço entre ordem e dissipação de um sistema: quando a relação F/R é maior que 1, o sistema solo-planta é considerado com qualidade; relação F/R igual a 1, o sistema está no seu estado estável; e relação F/R menor que 1, o sistema está em considerável perturbação.

Nessa linha de pensamento entram os conceitos de resiliência e resistência do solo. Resiliência é a capacidade de um solo recuperar sua integridade funcional e estrutural após um distúrbio. E resistência é a capacidade de o solo resistir a mudanças causadas por um distúrbio (Seybold et al., 1999), o que Lal (1993) conceitua por estabilidade do solo, referindo-se, no sentido contrário, à suscetibilidade do solo a mudanças. Resiliência está relacionada à QS em termos de recuperação das funções do solo (Seybold et al., 1999), já que solo com qualidade tem propriedades autorreguladoras para manter seu estado atual (Coleman et al., 1998). E a relação de resiliência com sustentabilidade está baseada na manutenção das funções do solo ou QS no tempo (Seybold et al., 1999). Para Addiscott (1994), se um solo em seu estado estável é perturbado, seus mecanismos de regulação agirão para contrapor a perturbação e restaurar o estado estável. Assim, a resiliência depende do balanço entre os processos de degradação e de restauração do solo (Lal, 1994).

ABORDAGEM SISTÊMICA DA QUALIDADE DO SOLO

Tendo como concepção a abordagem sistêmica da QS iniciada por Addiscott (1995), Vezzani (2001) analisou a QS baseada no funcionamento do sistema solo. Como sistema aberto, o funcionamento do solo é fundamentado na termodinâmica do não equilíbrio, cujos princípios dizem que os sistemas abertos operam afastados do seu equilíbrio termodinâmico, devido ao fluxo contínuo de energia e matéria, que passa por eles. À medida que existe um fluxo, ocorrem flutuações no comportamento das partículas, em função da corrente de correlações formada entre elas, o que gera aumento na atividade intrínseca do sistema. Assim, o sistema torna-se mais sensível a si mesmo e às flutuações de sua própria atividade. Nessa situação, a entropia do sistema é alta e positiva e ele se auto-

organiza por meio da corrente de correlações, pois, quando o sistema está altamente ativo e sensível, podem emergir espontaneamente regimes estáveis de comportamento, caracterizados por novas estruturas e funções. A auto-organização do sistema é possível porque os elementos que o compõem são interligados por múltiplos laços de realimentação, descritos por equações não lineares. A configuração do sistema é uma rede de relações não lineares, que possuem vínculo de causa. O fluxo gera a auto-organização do sistema em estados de ordem com determinado nível de complexidade e quantidade de energia e matéria retida, em função da magnitude e da velocidade do fluxo contínuo que passa pelo sistema, ao longo do tempo.

O sistema solo na produção agrícola, conforme Vezzani (2001), é o resultado de uma rede de relações não lineares entre os minerais, as plantas e os organismos edáficos conectados com o ambiente. Os fluxos que passam pelo sistema solo são dirigidos pelo fluxo de compostos orgânicos, constituído pela matéria vegetal adicionada pelas culturas e transformada pela biota edáfica, resultando na produção de uma sequência de compostos orgânicos intermediários, com tempo variável de permanência no solo, e liberação de parte da matéria na forma de CO₂, caracterizando o fluxo de energia e matéria no sistema solo. Os compostos orgânicos que entram no sistema interagem com os demais componentes e promovem a formação dos agregados do solo, seguindo uma sequência de eventos no tempo, que resulta na formação de estruturas numa hierarquia de tamanho e complexidade, caracterizando os diferentes níveis de ordem do sistema.

Quando o sistema de produção agrícola possibilita que o fluxo seja alto, ou seja, grande quantidade de compostos orgânicos entra por meio do cultivo de plantas, o sistema solo tem condições de se auto-organizar em macroagregados (estruturas complexas e diversificadas) e com grande capacidade de reter a energia e matéria adicionada na forma de C. As propriedades emergentes, nessa condição, destacam-se por: resistência à erosão hídrica e eólica; infiltração e retenção de água no solo; sequestro de C; capacidade de retenção de cátions; aumento do estoque de nutrientes; adsorção e complexação de compostos orgânicos e inorgânicos; favorecimento da biota do solo; promoção da ciclagem dos elementos químicos; e resistência a perturbações e resiliência. Assim, o sistema solo tem capacidade de cumprir suas funções e atingir qualidade.

Por outro lado, quando a magnitude do fluxo é baixa, o sistema solo se auto-organiza em estados de ordem, porém as estruturas formadas são menores e mais simples (microagregados), pois a quantidade de energia e matéria adicionada pelo cultivo de plantas não é suficiente para conduzir o sistema a formar estruturas complexas. Dessa forma, a interação entre os componentes do sistema não é favorecida, reduzindo a capacidade de reter a energia e a matéria adicionadas

pelas plantas. As propriedades emergentes, nessa condição, são: deterioração da estrutura; erosão hídrica e eólica; lixiviação de nutrientes e compostos orgânicos e inorgânicos; contaminação de águas superficiais e subterrâneas; liberação de CO₂ para atmosfera; diminuição da biota do solo; diminuição da diversidade do sistema solo; e redução da resistência a perturbações e da resiliência. Nessa situação, o solo não tem capacidade para exercer suas funções e não atinge qualidade.

A partir do entendimento do solo proposto por Vezzani (2001), Mello (2006) afirmou que a QS extrapola os limites do sistema solo, pois o solo interfere no ambiente que o engloba. Com base na teoria dos sistemas de Uyemov e da ontologia, Mello (2006) propôs que sistemas de manejo de solo com alta funcionalidade são organizados e se autoproduzem e que, nesse estado, eles possuem maior capacidade de reter energia e matéria, não acarretando impacto negativo no seu entorno, garantindo, assim, a QS, a qualidade ambiental e a sustentabilidade.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Analisando as três linhas de pensamento do meio científico em relação à QS, percebe-se que a ciência volta-se para a identificação de atributos, fórmulas ou procedimentos para avaliar QS adaptados para cada região, considerando as condições dos recursos naturais e as necessidades socioeconômicas locais. Além disso, percebe-se também que nas propostas de medição de atributos ideais está implícita a ideia de buscar determinações que representem a interação de todos os componentes do sistema agrícola, com a finalidade de elas refletirem o adequado funcionamento do solo como um todo, que é a própria QS, como é mais explícito na terceira linha de pensamento, que analisa os processos no sistema solo-planta.

Dessa reflexão, conclui-se que o grande avanço da ciência com a discussão de QS é a abordagem sistêmica do solo. O ponto-chave é o solo ser considerado um sistema aberto, conforme as teorias de Addiscott (1995) e Vezzani (2001), e a QS enfocada como sustentabilidade do sistema solo-planta. O solo por si só não atinge qualidade, e sim o sistema solo-planta e, naturalmente, o sistema organismos do solo integrados e adaptados ao seu local no ambiente. Associando à ideia de Doran (1997), de que a QS é resultado do funcionamento adequado do solo, somente integrado às plantas e à biota edáfica o solo é capaz de funcionar e, assim, atingir qualidade.

Para avaliação, a determinação da quantidade de pequenas moléculas existentes no sistema solo-planta (Addiscott, 1995) seria uma alternativa, mas o entendimento de que a entropia deve ser mínima para o sistema ter qualidade está ultrapassado, pois o Princípio da Mínima Produção de Entropia é para sistemas próximos ao equilíbrio e não para sistemas

em condição de não equilíbrio (Prigogine & Kondepudi, 1999), como é o caso do solo. A medição de processos essenciais (Coleman et al., 1998) que ocorrem no sistema solo-planta parece refletir melhor o comportamento do solo quanto à sua qualidade. A avaliação da QS nos sistemas agrícolas, considerando o funcionamento do solo, poderia ser a quantidade de solo agregado em classes de tamanho maiores que 0,250 mm, classificados como macroagregados por Edwards & Bremner (1967), pois possuem estrutura complexa e diversificada, resultante da interação de diversos agentes agregantes (Tisdall & Oades, 1982), e a quantidade de C retido nesse solo, como proposto por Vezzani (2001). Contudo, julga-se que a simples medição de atributos não contribui para atingir QS. É mais importante identificar como obtê-la do que identificar atributos para medi-la.

Sob essa análise, os sistemas agrícolas que favorecem a QS são aqueles que cultivam plantas intensamente sem o revolvimento do solo. O não revolvimento do solo favorece a QS, em razão de não quebrar as estruturas físicas formadas nem favorecer a perda de elementos químicos e MOS. Em relação ao cultivo de plantas, estas são as responsáveis pela introdução de energia e matéria nos ecossistemas e determinam a magnitude da vida animal. A contribuição das plantas ocorre por meio das raízes e da parte aérea, durante e no final do ciclo vegetativo. Como as plantas são a base das cadeias tróficas terrestres, é a partir da biomassa vegetal que a biota edáfica tem fonte de alimento para desenvolver. E, nesse processo, ocorre a interação das plantas e organismos, resultando na construção da estrutura física do solo, que será tanto mais complexa quanto maior for a quantidade de biomassa vegetal aportada ao sistema e a diversidade desta biomassa (quantidade, qualidade e frequência de aporte).

A estrutura química do solo também é construída pela matéria vegetal e sua diversidade. Kathounian (2001) afirma que fertilidade é “a capacidade de gerar vida” e “é da matéria vegetal que se nutrem os complexos de vida”. Para esse autor, fertilidade “não está no solo, nem nas plantas, nem nos animais, mas no seu conjunto dinâmico, integrado e harmônico, que se reflete em boas propriedades do solo e boa produção vegetal e animal”. A diversidade de plantas estimula diferentes espécies da biota do solo, favorecendo as interações e o estímulo entre os componentes do sistema solo. O número e a frequência dos tipos de interações bióticas dependem da riqueza das espécies de plantas e de seus modelos de distribuição (Beare et al., 1995). Em razão disso, sistemas agrícolas que possuem cultivo de espécies diferentes no espaço e no tempo potencializam o sistema solo a se organizar em estruturas físicas e químicas com complexidade e diversidade crescente e alta quantidade de energia e matéria retida na forma de compostos orgânicos e biota edáfica, habilitando o solo a exercer suas funções na natureza e, assim, atingir qualidade.

O grande desafio em relação à QS não está na identificação de um indicador ou na sua avaliação, e sim no planejamento de agroecossistemas complexos que privilegiem o cultivo diversificado de plantas. A complexidade dos ecossistemas é o que faz a diferença para o desempenho eficiente das funções do sistema solo, determinando sua qualidade e a qualidade ambiental. Essa complexidade é alcançada pelo cultivo contínuo e diversificado de plantas. Os cientistas de solo devem se voltar para a construção da agricultura do complexo, que promova as relações mutualísticas entre as espécies, pois só assim o sistema solo terá qualidade ao longo do tempo e desenvolverá a sustentabilidade do agroecossistema.

LITERATURA CITADA

- ADDISCOTT, T.M. Entropy and sustainability. *Eur. J. Soil Sci.*, 46:161-168, 1995.
- ADDISCOTT, T.M. Simulation, prediction, foretelling or prophecy? Some thoughts on pedogenetic modeling. In: BRYANT, R.B. & ARNOLD, R.W., eds. Quantitative modeling of soil forming processes. Madison, SSSA, 1994. p.1-15. (Special, 39)
- ALVES, M.C.; SUZUKI, L.G.A.S. & SUZUKI, L.E.A.S. Densidade do solo e infiltração de água como indicadores da qualidade física de um Latossolo Vermelho distrófico em recuperação. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:617-625, 2007.
- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L. & BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. *R. Bras. Ci. Solo*, 25:189-197, 2001.
- AMADO, T.J.C.; CONCEIÇÃO, P.C.; BAYER, C. & ELTZ, F.L.F. Qualidade do solo avaliada pelo "Soil Quality Kit" em dois experimentos de longa duração no Rio Grande do Sul. *R. Bras. Ci. Solo*, 31: 109-121, 2007.
- ANDREWS, S.S.; FLROA, C.B.; MITCHELL, J.P. & KARLEN, D.L. Growers' perceptions and acceptance of soil quality indices. *Geoderma*, 114:187-213, 2003.
- ARAÚJO, R.; GOEDERT, W.J. & LACERDA, M.P.C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob cerrado nativo. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:1099-1108, 2007.
- ARSHAD, M.A. & COEN, G.M. Characterization of soil quality: Physical and chemical criteria. *Am. J. Altern. Agric.*, 7:25-32, 1992.
- BARETTA, D.; SANTOS, J.C.P.; FIGUEIREDO, S.R. & KLAUBERG-FILHO, O. Efeito do monocultivo de pinus e da queima do campo nativo em atributos biológicos do solo no planalto sul catarinense. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:715-724, 2005.
- BARRIOS, E.; DELVE, R.J.; BEKUNDA, M.; MOWO, J.; AGUNDA, J.; RAMISCH, J.; TREJO, M.T. & THOMAS, R.J. Indicators of soil quality: A South-South development of a methodological guide for linking local and technical knowledge. *Geoderma*, 135:248-259, 2006.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. & MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. *R. Bras. Ci. Solo*, 24:599-607, 2000b.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L. & FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 54:101-109, 2000a.
- BEARE, M.H.; COLEMAN, D.C.; CROSSLEY Jr., D.A.; HENDRIX, P.F. & ODUM, E.P. A hierarchical approach to evaluating the significance of soil biodiversity to biogeochemical cycling. *Plant Soil*, 170:5-22, 1995.
- BENDING, G.D.; TURNER, M.K.; RAYNS, F.; MARX, M.C. & WOOD, M. Microbial and biochemical soil quality indicators and their potential for differentiating areas under contrasting agricultural management regimes. *Soil Biol. Biochem.*, 36:1785-1792, 2004.
- BLAIR, G.J.; LEFROY, R.D.B.; SINGH, B.P. & TILL, A.R. Development and use of carbon management index to monitor changes in soil C pool size and turnover. In: CADISH, G. & GILLER, K.E., eds. Driven by nature: Plant litter quality and decomposition. London, CAB International, 1997. p.273-281.
- BOHLEN, P.J. & EDWARDS, C.A. The response of nematode trophic groups to organic and inorganic nutrient inputs in agroecosystems. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, SSSA, 1994. p.235-244. (Special, 35)
- BOLINDER, M.A.; ANGERS, D.A.; GREGORICH, E.G. & CARTER, M.R. The response of soil quality indicators to conservation management. *Can. J. Soil Sci.*, 79:37-45, 1999.
- BOUMA, J. & DROOGERS, P. A procedure to derive land quality indicators for sustainable agricultural production. *Geoderma*, 85:103-110, 1998.
- CARTER, M.R. Organic matter and sustainability. In: REES, B.C.; BALL, B.C.; CAMPBELL, C.D. & WATSON, C.A., eds. Sustainable management of soil organic. Wallingford, CAB International, 2001. p.9-22.
- CARTER, M.R. & STEWART, B.A. Structure and organic matter storage in agricultural soils. Boca Raton, CRC Press, 1996. 472p.
- CHAER, G.M. & TÓTOLA, M.R. Impacto do manejo de resíduos orgânicos durante a reforma de plantios de eucalipto sobre indicadores de qualidade do solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:1381-1396, 2007.
- CHEN, J.; YU, Z.; OUYANG, J. & van MENSVOORT, M.E.F. Factors affecting soil quality changes in the North China Plain: A case study of Quzhou County. *Agric. Syst.*, 91:171-188, 2006.
- COLEMAN, D.C.; HENDRIX, P.F. & ODUM, E.P. Ecosystem health: An overview. In: HUANG, P.M., ed. Soil chemistry and ecosystem health. Madison, SSSA, 1998. p.1-20. (Special, 52)

- CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J. & SAPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. *R. Bras. Ci. Solo*, 29:777-788, 2005.
- CORAZZA, E.J.; SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S. & GOMES, A.C. Comportamento de diferentes sistemas de manejo como fonte ou depósito de carbono em relação à vegetação de cerrado. *R. Bras. Ci. Solo*, 23:425-432, 1999.
- COSTA, F.S.; ALBUQUERQUE, J.A.; BAYER, C.; FONTOURA, S.M.V. & WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:527-535, 2003.
- D'ANDRÉA, A.F.; SILVA, M.L.N.; CURI, N. & FERREIRA, M.M. Atributos de agregação indicadores de qualidade do solo em sistemas de manejo na região dos Cerrados no sul do Estado de Goiás. *R. Bras. Ci. Solo*, 26:1047-1054, 2002.
- DE CLERCK, F.; SINGER, M.J. & LINDERT, P. A 60-year history of California soil quality using paired samples. *Geoderma*, 114:215-230, 2003.
- DEXTER, A.R. Soil physical quality. Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, 120:201-214, 2004.
- DICK, R.P. Soil enzyme activities as indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, SSSA, 1994. p.107-124. (Special, 35)
- DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D.P. & KÖGEL-KNABNER, I. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilization. *Plant Soil*, 268:319-328, 2005.
- DORAN, J.W. Soil quality and sustainability. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., Rio de Janeiro, 1997. Anais. Rio de Janeiro, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. CD-ROM.
- DORAN, J.W. & JONES, A.J. Methods for assessing soil quality. Madison, SSSA, 1996. 410p. (Special, 49)
- DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, SSSA, 1994. p.1-20. (Special, 35)
- DORAN, J.W. & ZEISS, M.R. Soil health and sustainability: Managing the biotic component of soil quality. *Appl. Soil Ecol.*, 15:3-11, 2000.
- DROOGERS, P. & BOUMA, J. Soil survey in exploratory modeling of sustainable soil management practices. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:1704-1710, 1997.
- EDWARDS, A.P. & BREMNER, J.M. Microaggregates in soils. *J. Soil Sci.*, 18:64-73, 1967.
- ELLIOT, E.T.; BURKE, I.C.; MONZ, C.A.; FREY, S.D.; PAUSTIAN, K.H.; COLLINS, H.P.; PAUL, E.A.; COLE, C.V.; BLEVINS, R.L.; FRYE, W.W.; LYON, D.J.; HALVORSON, A.D.; HUGGINS, D.R.; TURCO, R.F. & HICKMAN, M.V. Terrestrial carbon pools in grasslands and agricultural soils: Preliminary data from the Corn Belt and Great Plains regions. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, SSSA, 1994. p.179-191. (Special, 35)
- FAUCI, M.F. & DICK, R.P. Microbial biomass as an indicator of soil quality: Effects of long-term management and recent soil amendments. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, SSSA, 1994. p.229-234. (Special, 35)
- FIDALSKI, J. & TORMENA, C.A. Homogeneidade da qualidade física do solo nas entrelinhas de um pomar de laranja com sistemas de manejo da vegetação permanente. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:637-645, 2007.
- FLIEBBACH, A.; OBERHOLZER, H.-R.; GUNST, L. & MÄDER, P. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agric. Ecosys. Environ.*, 118:273-284, 2007.
- FRANCHINI, J.C.; CRISPINO, C.C.; SOUZA, R.A.; TORRES, E. & HUNGRIA, M. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. *Soil Till. Res.*, 92:18-29, 2007.
- FRANZLUEBBERS, A.J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.*, 66:95-106, 2002.
- GAMEDA, S. & DUMANSKI, J. Framework for evaluation of sustainable land management: A case study of two rain-fed cereal-livestock farming systems in the Black Chernozemic soil zone of southern Alberta, Canada. *Can. J. Soil Sci.*, 75:429-437, 1995.
- GARYLAND, M.J.; KARAKOV, A.V.; ROMIG, D.E. & HARRIS, R.F. Descriptive and analytical characterization of soil quality/health. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, SSSA, 1994. p.159-168. (Special, 35)
- GLIESSMAN, S.R. *Agroecologia: Processos ecológicos em agricultura sustentável*. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 653p.
- GOMEZ, A.A.; KELLY, D.E.S.; SYERS, J.K. & COUGHLAN, K.J. Measuring sustainability of agricultural systems at the farm level. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, SSSA, 1996. p.401-410. (Special, 49)
- GOVAERTS, B.; SAYRE, K.D. & DECKERS, J. A minimum data set for soil quality assessment of wheat and maize cropping in the highlands of Mexico. *Soil Till. Res.*, 87:163-174, 2006.
- GRANATSTEIN, D. & BEZDICEK, D.F. The need for a soil quality index: Local and regional perspectives. *Am. J. Altern. Agric.*, 7:12-16, 1992.

- GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R.; ANGERS, D.A.; MONREAL, C.M. & ELLERT, B.H. Towards a minimum data set to assess soil organic matter quality in agricultural soils. *Can. J. Soil Sci.*, 74:367-385, 1994.
- HARBERERN, J. A soil health index. *J. Soil Water Conserv.*, 47, 1992. (Editorial)
- HARRIS, R.F. & BEZDICEK, D.F. Descriptive aspects of soil quality/health. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, SSSA, 1994. p.23-35. (Special, 35)
- HERRICK, J.E. Soil quality: An indicator of sustainable land management? *Appl. Soil Ecol.*, 15:75-83, 2000.
- HERRICK, J.E. & WANDER, M.M. Relationships between soil organic carbon and soil quality in cropped and rangeland soils: The importance of distribution, composition, and soil biological activity. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLET, R.F. & STEWART, B.A., eds. *Soil processes and the carbon cycle*. Boca Raton, CRC Press, 1998. p.405-425.
- HUFFMAN, E.; EILERS, R.G.; PADBURY, G.; WALL, G. & MacDONALD, B. Canadian Agri-Environmental indicators related to land quality: Soil cover, soil erosion, soil salinity and risk of water contamination. In: CONGRESS OF SOIL SCIENCE, 16., Montpellier, 1998. Anais. Montpellier, Rural Development Sector – World Bank, 1998. CD ROM
- HUSSAIN, I.; OLSON, K.R.; WANDER, M.M. & KARLEN, D.L. Adaptation of soil quality indices and application to three tillage systems in southern Illinois. *Soil Till. Res.*, 50:237-249, 1999.
- KARLEN, D.L. & STOTT, D.E. A framework for evaluating physical and chemical indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, SSSA, 1994. p.53-72. (Special, 35)
- KARLEN, D.L.; ANDREWS, S.S. & DORAN, J.W. Soil quality: Current concepts and applications. *Adv. Agron.*, 74:1-40, 2001.
- KARLEN, D.L.; EASH, N.S. & UNGER, P.W. Soil and crop management effects on soil quality indicators. *Am. J. Altern. Agric.*, 7:48-55, 1992.
- KARLEN, D.L.; MAUSBACH, M.J.; DORAN, J.W.; CLINE, R.G.; HARRIS, R.F. & SCHUMAN, G.E. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation (a guest editorial). *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 61:4-10, 1997.
- KARLEN, D.L.; WOLLENHAUPT, N.C.; ERBACH, D.C.; BERRY, E.C.; SWAN, J.B.; EASH, N.S. & JORDAHL, J.L. Crop residue effects on soil quality following 10-years of no-till corn. *Soil Till. Res.*, 31:149-167, 1994a.
- KARLEN, D.L.; WOLLENHAUPT, N.C.; ERBACH, D.C.; BERRY, E.C.; SWAN, J.B.; EASH, N.S. & JORDAHL, J.L. Long-term tillage effects on soil quality. *Soil Till. Res.*, 32:313-327, 1994b.
- KATHOUNIAN, C.A. A reconstrução ecológica da agricultura. *Botucatu, Agroecológica*, 2001. 348p.
- KENNEDY, A.C. & PAPENDICK, R.I. Microbial characteristics of soil quality. *J. Soil Water Conserv.*, 50:243-248, 1995.
- KOUTIKA, L-S.; NOLTE, C.; YEMEFACK, M.; NDANGO, R.; FOLEFOC, D. & WEISE, S. Leguminous fallows improve soil quality un south-central Cameroon as evidenced by the particulate organic matter status. *Geoderma*, 125:343-354, 2005.
- LAL, R. Residue management, conservation tillage and restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. *Soil Till. Res.*, 43:81-107, 1997.
- LAL, R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security. *Science*, 304, 2004. Disponível em: < <http://www.science.org>>. Acesso em: 6 de fev. 2007.
- LAL, R. Sustainable land use systems and soil resilience. In: GREENLAND, D.J. & SZABOLCS, I., eds. *Soil resilience and sustainable land use*. Wallingford, CAB International, 1994. p.41-67.
- LAL, R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. *Soil Till. Res.*, 27:1-8, 1993.
- LAL, R. & PIERCE, F.J. The vanishing resource. In: LAL, R. & PIERCE, F.J., eds. *Soil management for sustainability*. Ankeny, Soil Water Conservation Society, 1991. p.1-5.
- LAL, R.; KIMBLE, J. & FOLLETT, R.F. Pedospheric processes and the carbon cycle. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLETT, R.F. & STEWART, B.A., eds. *Soil processes and the carbon cycle*. Boca Raton, CRC Press, 1998b. p.1-8.
- LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLETT, R.F. & STEWART, B.A. Soil processes and the carbon cycle. Boca Raton, CRC Press, 1998a. 609p.
- LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E. & STEWART, B.A. Soil management and greenhouse effect. Boca Raton, CRC Press, 1995. 385p.
- LAPEN, D.R.; TOPP, G.C.; GREGORICH, E.G. & CURNOE, W.E. Least limiting water range indicators of soil quality and corn production, eastern Ontario, Canada. *Soil Till. Res.*, 78:151-170, 2004.
- LARSON, W.E. & PIERCE, F.J. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, SSSA, 1994. p.37-51. (Special, 35)
- LEITE, L.F.C.; MENDONÇA, E.S.; NEVES, J.C.L.; MACHADO, P.L.O.A. & GALVÃO, J.C.C. Estoques totais de carbono orgânico e seus compartimentos em Argissolo sob floresta e sob milho cultivado com adubação mineral e orgânica. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:821-832, 2003.
- LIEBIG, M.A. & DORAN, J.W. Evaluation of point-scale assessments of soil quality. *J. Soil Water Conserv.*, 54:510-518, 1999.
- LIEBIG, M.A.; TANAKA, D.L. & WIENHOLD, B.J. Tillage and cropping effects on soil quality indicators in the northern Great Plains. *Soil Till. Res.*, 78:131-141, 2004.

- LINDEN, D.R.; HENDRIX, P.F.; COLEMAN, D.C. & van VLIET, P.C.J. Faunal indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. Defining soil quality for a sustainable environment. Madison, SSSA, 1994. p.91-106. (Special, 35)
- LOGSDON, S.D. & KARLEN, D.L. Bulk density as a soil quality indicator during conversion to no-tillage. *Soil Till. Res.*, 78:143-149, 2004.
- MARINARI, S.; MANCINELLI, R.; CAMPIGLIA, E. & GREGO, S. Chemical and biological indicators of soil quality in organic and conventional farming systems in Central Italy. *Ecol. Indic.*, 6:701-711, 2006.
- MATSUOKA, M.; MENDES, I.C. & LOUREIRO, M.F. Biomassa microbiana e atividade enzimática em solos sob vegetação nativa e sistemas agrícolas anuais e perenes na região de Primavera do Leste (MT). *R. Bras. Ci. Solo*, 27:425-433, 2003.
- McQUAID, B.F. & OLSON, G.L. Soil quality indices of Piedmont sites under different management systems. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLET, R.F. & STEWART, B.A., eds. Soil processes and the carbon cycle. Boca Raton, CRC Press, 1998. p.427-433.
- MELLO, N.A. Efeito do sistema de manejo nos atributos do solo, movimentação de sedimentos e exportação de carbono orgânico numa microbacia rural sob cultura do fumo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006. 248p. (Tese de Doutorado).
- MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F.F. & DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S. & ALVAREZ V., V.H., eds. Tópicos ciência do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003. v.3. p.209-248.
- MONOKROUSOS, N.; PAPTHEODOROU, E.M.; DIAMANTOPOULOS, J.D. & STAMOU, G.P. Soil quality variables in organically and conventionally cultivated field sites. *Soil Biol. Biochem.*, 38:1282-1289, 2006.
- MONREAL, C.M.; DINEL, H.; SCHNITZER, M. & GAMBLE, D.S. Impact of carbon sequestration on functional indicators of soil quality as influenced by management in sustainable agriculture. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLET, R.F. & STEWART, B.A., eds. Soil processes and the carbon cycle. Boca Raton, CRC Press, 1998. p.435-457.
- PANKHURST, C.E. Biological indicators of soil health and sustainable productivity. In: GREENLAND, D.J. & SZABOLCS, I., eds. Soil resilience and sustainable land use. Wallingford, CAB International, 1994. p.331-351.
- PARISI, V.; MENTA, C.; GARDI, C.; JACOMINI, C. & MOZZANICA, E. Microarthropod communities as a tool to assess soil quality and biodiversity: A new approach in Italy. *Agric. Ecosys. Environ.*, 105:323-333, 2005.
- PARR, J.F.; PAPENDICK, S.B.; HORNICK, S.B. & MEYER, R.E. Soil quality: Attributes and relationship to alternative and sustainable agriculture. *Am. J. Altern. Agric.*, 7:5-11, 1992.
- PRIGOGINE, I. As leis do caos. São Paulo, Universidade Estadual de São Paulo, 2002. 109p.
- PRIGOGINE, I. O fim das certezas. São Paulo, Universidade Estadual de São Paulo, 1996. 199p.
- PRIGOGINE, I. & KONDEPUDI, D. Termodinâmica: Dos motores térmicos às estruturas dissipativas. Lisboa, Instituto Piaget, 1999. 418p.
- PRIGOGINE, I. & STENGERS, I. A nova aliança: Metamorfose da ciência. 3.ed. Brasília, Universidade de Brasília, 1997. 247p.
- PRIGOGINE, I. & STENGERS, I. Entre o tempo e a eternidade. São Paulo, Companhia das Letras, 1992. 226p.
- PULLEMAN, M.M.; BOUMA, J.; van ESSEN, E.A. & MEIJLES, E.W. Soil organic matter content as a function of different land use history. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:689-693, 2000.
- REEVES, D.W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil Till. Res.*, 43:131-167, 1997.
- REICOSKY, D.C. & FORCELLA, F. Cover crop and soil quality interactions in agroecosystems. *J. Soil Water Conserv.*, 53:224-229, 1998.
- RIBEIRO, K.A.; OLIVIERA, T.S.; MENDONÇA, E.S.; XAVIER, F.A.S.; MAIA, S.M.F. & SOUSA, H.H.F. Qualidade do solo na cultura do cajueiro anão precoce cultivado sob diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 31:341-351, 2007.
- RICE, C.W.; MOORMAN, T.B. & BEARE, M. Role of microbial biomass carbon and nitrogen in soil quality. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, SSSA, 1996. p.203-215. (Special, 49)
- ROMIG, D.E.; GARYLAND, J.M.; HARRIS, R.F. & McSWEENEY, K. How farmers assess soil health and quality. *J. Soil Water Conserv.*, 50:229-236, 1995.
- ROMIG, D.E.; GARYLAND, J.M. & HARRIS, R.F. Farmer-based assessment of soil quality: A soil health scorecard. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, SSSA, 1996. p.39-60. (Special, 49)
- SALTON, J.C. Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005. 158p. (Tese de Doutorado)
- SANCHEZ, P.A.; PALM, C.A. & BUOL, S.W. Fertility capability soil classification: A tool to help assess soil quality in the tropics. *Geoderma*, 114:157-185, 2003.
- SANDERS, D.W. International activities in assessing and monitoring soil degradation. *Am. J. Altern. Agric.*, 7:17-24, 1992.
- SARRANTONIO, M.; DORAN, J.W.; LIEBIG, M.A. & HALVORSON, J.J. On-farm assessment of soil quality and health. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. Methods for assessing soil quality. Madison, SSSA, 1996. p.83-105. (Special, 49)

- SCHLOTER, M.; DILLY, O. & MUNCH, J.C. Indicators for evaluating soil quality. *Agric. Ecosys. Environ.*, 98: 255-262, 2003.
- SCHMITZ, J.A.K. Indicadores biológicos de qualidade do solo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 234p. (Tese de Doutorado)
- SEYBOLD, C.A.; HERRICK, J.E. & BREJDA, J.J. Soil resilience: A fundamental component of soil quality. *Soil Sci.*, 164:224-234, 1999.
- SEYBOLD, C.A.; MAUSBACH, M.J.; KARLEN, D.L. & ROGERS, H.H. Quantification of soil quality. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLET, R.F. & STEWART, B.A., eds. *Soil processes and the carbon cycle*. Boca Raton, CRC Press, 1998. p.387-404.
- SHERWOOD, S. & UPHOFF, N. Soil health: Research, practice and policy for a more regenerative agriculture. *Appl. Soil Ecol.*, 15:85-97, 2000.
- SHUKLA, M.K.; LAL, R. & EBINGER, M. Determining soil quality indicators by factor analysis. *Soil Till. Res.*, 87:194-204, 2006.
- SMITH, J.L.; HALVORSON, J.J. & PAPENDICK, R.I. Multiple variable indicator kriging: A procedure for integrating soil quality indicators. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, SSSA, 1994. p.149-157. (Special, 35)
- SMYTH, A.J. & DUMANSKI, J. A framework for evaluating sustainable land management. *Can. J. Soil Sci.*, 75:401-406, 1995.
- SOIL AND TILLAGE RESEARCH. Tillage and crop management impacts on soil carbon storage. *Soil Till. Res.*, 47:1-175, 1998. (Special Issue)
- SOJKA, R.E. & UPCHURCH, D.R. Reservations regarding the soil quality concept. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 63:1039-1054, 1999.
- SOJKA, R.E.; UPCHURCH, D.R. & BORLAUG, N.E. Quality soil management or soil quality management: Performance versus semantics. *Adv. Agron.*, 79:1-68, 2003.
- STORK, N.E. & EGGLETON, P. Invertebrates as determinants and indicators of soil quality. *Am. J. Altern. Agric.*, 7:38-47, 1992.
- SUN, B.; ZHOU, S. & ZHAO, Q. Evaluation of spatial and temporal changes of soil quality based on geostatistical analysis in the hill region of subtropical China. *Geoderma*, 115:85-99, 2003.
- TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, 33:141-163, 1982.
- TURCO, R.F.; KENNEDY, A.C. & JAWSON, M.D. Microbial indicators of soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A., eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, SSSA, 1994. p.73-90. (Special, 35)
- USDA-NRCS. Soil Quality Institute, Ames, IA. Disponível em: <http://soils.usda.gov/sqi/> Acesso em: 15 de abr. 2008.
- VARGAS, L.K. & SCHOLLES, D. Biomassa microbiana de produção de C-CO₂ e N mineral de um Podzólico Vermelho-Escuro submetido a diferentes sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, 24: 35-42, 2000.
- VEZZANI, F.M. Qualidade do sistema solo na produção agrícola. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001. 184p. (Tese de Doutorado)
- VIEIRA, F.C.B.; BAYER, C.; ZANATTA, J.A.; DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J. & HE, Z.L. Carbon management index base don physical fractionation of soil organic matter in na Acrisol under long-term no-till cropping systems. *Soil Till. Res.*, 96:195-2004, 2007.
- VISSER, S. & PARKINSON, D. Soil biological criteria as indicators of soil quality: Soil microorganisms. *Am. J. Altern. Agric.*, 7:33-37, 1992.
- WANG, X. & GONG, Z. Assessment and analysis of soil quality changes after eleven years of reclamation in subtropical China. *Geoderma*, 81:339-355, 1998.
- XAVIER, F.A.S.; MAIA, S.M.F.; OLIVIERA, T.S. & MENDONÇA, E.S. Biomassa microbiana e matéria orgânica leve em solos sob sistemas agrícolas orgânico e convencional na Chapada da Ibiapaba-CE. *R. Bras. Ci. Solo*, 30:247-258, 2006.
- YOUNGBERG, G. ed. *Soil Quality - Special Issue*, 7: 2-68, 1992.
- ZANATTA, J.A.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; VIEIRA, F.C.B. & MIELNICZUK, J. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. *Soil Till. Res.*, 94:510-519, 2007.
- ZINCK, J.A. & FARSHAD, A. Issues of sustainability and sustainable land management. *Can. J. Soil Sci.*, 75:407-412, 1995.

