

(DOI): 10.5777/PAeT.V5.N1.12

Este artigo é apresentado em Português e Inglês com "Resumen" em Espanhol.

Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada nas Ciências Agrárias, Guarapuava-PR, v.5, n.1, p.187-206, 2012.

Revisão Literária

Qualidade do solo: conceitos, indicadores e avaliação

Edson Alves de Araújo¹

João Carlos Ker²

Júlio César Lima Neves³

João Luiz Lani⁴

Resumo

Nas últimas décadas, motivado por estudos realizados em países de clima temperado, o tema qualidade do solo (QS) em ecossistemas tropicais tem crescido consideravelmente, principalmente no Brasil. Neste sentido, o presente trabalho de revisão literária trata dos aspectos conceituais da QS, dos indicadores físicos, químicos e biológicos e dos métodos e procedimentos utilizados para mensurar índices quantitativos de qualidade do solo em sistemas agrícola, pecuário e florestal. Em última análise, não se deve negar o aspecto positivo que representam os mecanismos e procedimentos (frameworks) utilizados para a mensuração da qualidade do solo, desde que integrem uma série de propriedades relacionadas às funções vitais do solo. Neste caso, pode-se ter uma visão mais integrada dos ecossistemas, mesmo sabendo que dificilmente se conseguirá avaliar integralmente a qualidade do solo.

Palavras-chave: Agroecossistemas. Índice de qualidade do solo. Sustentabilidade.

La calidad del suelo: conceptos, indicadores y evaluación

Resumen

En las últimas décadas, motivado por los estudios en países de clima templado, el tema calidad del suelo (CS) en los ecosistemas tropicales ha aumentado considerablemente, especialmente en Brasil. En este sentido, este trabajo es una revisión bibliográfica de los aspectos conceptuales de CS, los indicadores de los métodos físicos, químicos y biológicos y los procedimientos utilizados para medir los índices cuantitativos de la calidad del suelo en sistemas agrícolas, ganadería y forestal. En última instancia no se debe negar el aspecto positivo que representan los mecanismos y procedimientos (frameworks) utilizados para medir la calidad del suelo, siempre que integren una serie de propiedades relacionadas con las funciones vitales del suelo. En este caso, se puede tener una visión más integrada de los ecosistemas, aún que sabiendo que difícilmente se puede evaluar plenamente la calidad del suelo.

Palabras clave: agro ecosistemas, Índice de calidad del suelo, Sostenibilidad

Introdução

A partir dos anos 90, o interesse no estudo sobre a qualidade do solo aumentou consideravelmente, o que se comprova com o crescente número de trabalhos indexados em periódicos internacionais acerca da qualidade do solo (KARLEN et al., 1997; DORAN e PARKIN, 1994). Contrariamente a outros conceitos como a qualidade da água e qualidade do ar, a qualidade do solo não possui padrões e, portanto, não têm sido criadas regulamentações como forma de aferir sua qualidade. Além disso, não existe

até o presente, um consenso no que diz respeito ao seu conceito, embora tenham surgido vários conceitos de qualidade do solo, em sua maioria relacionados com as funções do solo em ecossistemas naturais e agrícolas (KARLEN et al., 1997).

Em linhas gerais, a qualidade do solo dependerá da extensão em que o solo funcionará para o benefício humano, de acordo com a composição natural do solo, sendo também fortemente relacionada com as práticas intervencionistas do homem.

Entretanto, devido à heterogeneidade e

Recebido em: 21/11/2011

Aceito para publicação em: 23/03/2012

1 Doutor em Solos e Nutrição de Plantas. Secretaria de Estado de Agropecuária do Acre. E-mail: jearaujo.ac@gmail.com;

2 Professor do Departamento de Solos. Universidade Federal de Viçosa – UFV. E-mail: jcker@ufv.br;

3 Professor do Departamento de Solos. Universidade Federal de Viçosa – UFV. E-mail: julio_n2003@yahoo.com.br;

4 Professor Departamento de Solos. Universidade Federal de Viçosa – UFV. E-mail: lani@ufv.br

Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia v.5, n.1 jan/abr. (2012)

Print-ISSN 1983-6325 (On line) e-ISSN 1984-7548

dinâmica do compartimento solo, a sua qualidade não pode ser mensurada diretamente, podendo ser estimada a partir de indicadores arbitrados pelo homem. As mudanças no "status" da qualidade do solo têm sido avaliadas por intermédio de sistemas quantitativos em que se utilizam indicadores apropriados, efetuando-se a comparação com valores desejáveis em diferentes intervalos de tempo, para um fim específico em ecossistemas diversos (KARLEN e STOTT, 1994; CHAER, 2001; MELO FILHO et al., 2007).

Assim, o objetivo desta revisão bibliográfica é apresentar uma discussão concisa acerca dos conceitos de qualidade do solo, alguns indicadores empregados para sua definição e a investigação de métodos e procedimentos ("framework") quantitativos utilizados na mensuração da qualidade do solo em sistemas agrícola, pecuário e florestal.

Aspectos conceituais de qualidade do solo

O termo qualidade do solo se tornou mais usual a partir de 1990, após a publicação do relatório intitulado "Soil and water quality - an agenda for agriculture" (NATURAL RESEARCH COUNCIL-NRCC, 1993). Conforme esse relatório, a qualidade do solo havia sido concebida em razão de seu papel em ecossistemas naturais e agroecossistemas, uma vez que a qualidade deste recurso natural, historicamente, sempre esteve relacionada à sua produtividade.

O desenvolvimento do conceito e sua aplicação no manejo e uso da terra, desde então, tem tido várias abordagens entre cientistas da ciência do solo (DORAN e PARKIN, 1994; KARLEN et al., 1997; SEYBOLD et al., 1999; SOJKA e UPCHURCH, 1999; NORFLEET et al., 2003), sendo que a maioria dos conceitos propostos atualmente se baseiam na qualidade do solo como a capacidade deste funcionar dentro dos limites do ecossistema e interagir positivamente com o meio ambiente externo daquele ecossistema. (LARSON e PIERCE, 1994). Já a Sociedade Americana de Ciência do Solo conceitua a qualidade do solo como a capacidade de um dado solo funcionar, dentro de um sistema natural ou manejado de forma a manter a produtividade vegetal e animal, manter ou melhorar a qualidade da água e do ar e suportar a saúde humana e habitacional. (KARLEN et al., 1997).

SOJKA e UPCHURCH (1999) ressaltam

o caráter definível de qualidade do solo em três múltiplos cenários: a) a definição pode mudar para a mesma área de terra e mesmo uso, dependendo das condições climáticas (efeito da sazonalidade); b) a definição pode mudar dependendo da habilidade de cada produtor em manejar sua área, uma vez que alguns aplicam demasiada quantidade de "inputs", fazem uso inadequado de mecanização, desperdiçando tempo no campo, dentre outros; c) a definição deve mudar para cada cultivo e sistema de cultivo, para cada praga, doença, e outros, uma vez que a sistemática para cada cenário altera a definição de qualidade do solo.

DORAN e PARKIN (1994) enfatizam ser difícil uma definição concreta e consensual, e sustentam ser a qualidade do solo uma característica abstrata e que, portanto, não pode ser definida, uma vez que ela depende de fatores externos, como práticas de manejo e uso da terra, interações do meio ambiente e dos ecossistemas, prioridades socioeconômicas e políticas, e outros. Situação corroborada por, SOJKA e UPCHURCH (1999), ao demonstrarem a complexidade em definir a qualidade do solo para os solos, já que as composições física, química e biológica variam enormemente, tendo sistemas são mais diversos e dinâmicos.

O tema é controverso e não existe consenso com relação ao conceito de qualidade do solo, razão da existência de múltiplas definições, baseadas, em sua maioria, na utilização do solo pelo homem para fins agrícolas e relacionadas com as funções do solo em ecossistemas naturais e agrícolas (DORAN e PARKIN, 1994; SINGER e EWING, 1999; SOJKA e UPCHURCH, 1999; KARLEN et al, 1997), o que sugere que seu conceito continuará a evoluir.

Alguns autores têm sido bastante incisivos com relação ao conceito e à concepção do termo cunhado como qualidade do solo. SOJKA e UPCHURCH (1999), por exemplo, são favoráveis à busca da qualidade do solo através do bom manejo do solo, em termos de potencial de produção, sustentabilidade e impacto ambiental, porém sem requerer a reinvenção da ciência do solo.

NORFLEET et al. (2003) destacam a forte correlação entre a qualidade do solo e os fatores de formação do solo. Neste sentido, destacam que a qualidade do solo pode ser pensada como uma extensão (ramo) da pedologia, com foco nas características do solo e alterações decorrentes da intervenção humana.

Em discussão de cunho mais filosófica sobre o

termo qualidade, PIRSIG (1984) enfatiza o seu caráter indefinível em virtude da percepção de que qualidade varia conforme as experiências anteriores de cada indivíduo. De acordo com esse autor, a qualidade permite estabelecer todas essas correspondências, ou seja, é o estímulo constante imposto pelo meio ambiente, para que seja criado todo o mundo em que se vive. Assim, qualquer tentativa de definição só conseguirá abranger uma pequena parte da qualidade como um todo.

Assim, GREGORICH et al. (1997) definem qualidade do solo como o grau de aptidão de dado solo para um fim específico, ou seja, a qualidade do solo dependerá da extensão na qual o solo funcionará para o benefício humano.

Indicadores de qualidade de solo

Pelo fato de necessitar de um número razoável de variáveis, a qualidade do solo não pode ser mensurada diretamente, mas pode ser estimada a partir de indicadores de qualidade do solo (KARLEN e STOTT, 1994; KARLEN et al., 1997; ANDREWS et al., 2004).

Indicadores de qualidade do solo são propriedades mensuráveis (quantitativas ou qualitativas) do solo ou da planta acerca de um processo ou atividade e que permitem caracterizar, avaliar e acompanhar as alterações ocorridas num dado ecossistema (KARLEN et al., 1997).

A utilização de indicadores de qualidade do solo tem sido muito difundida em países de clima temperado, com maior ênfase na listagem de indicadores e sua influência em dada propriedade do solo (SCHOENHOLTZ et al., 2000) do que propriamente na sua utilização, em termos práticos, na mensuração da qualidade do solo (SNAKIN et al., 1996; ANDREWS et al., 2004).

A utilização de indicadores de qualidade do solo, relacionados à sua funcionalidade, constitui uma maneira indireta de mensurar a qualidade dos solos, sendo úteis para o monitoramento de mudanças no ambiente. Neste caso, as características de funcionalidade estariam relacionadas, basicamente, àquelas exercidas pela pedosfera no sistema solo-planta, quais sejam a) reguladora de processos bióticos, tais como o suprimento de minerais e água para as plantas; b) reguladora e controladora do fluxo de bioelementos (ciclagem de nutrientes); c) reguladora das trocas gasosas entre a atmosfera; e) condução e distribuição da água em vários fluxos

hidrológicos (KARLEN e STOTT, 1994).

Nas últimas décadas tem havido uma tendência em classificar os indicadores de qualidade/degradação do solo em físicos, químicos e biológicos (DORAN e PARKIN, 1996; SNAKIN et al., 1996). No entanto, REINERT (1998) categoriza os indicadores em descritivos e analíticos. Aqueles são de caráter visual e, ou morfológico, como: cor, cobertura vegetal, friabilidade, erosão, drenagem, espessura dos horizontes ou camadas, dentre outros, e estes são de natureza física, química e biológica.

Para nortear a escolha de indicadores de qualidade/degradação do solo, DORAN e PARKIN (1996) sugerem alguns critérios, quais sejam: a) correlacionar-se com os processos naturais do ecossistema (aspecto de funcionalidade); b) ser relativamente de fácil utilização em campo, de modo que tanto especialistas como produtores possam usá-los para avaliar a qualidade do solo (aspecto de praticidade e facilidade nos processos de difusão de tecnologia e extensão rural); c) ser suscetível às variações climáticas e de manejo (devem ter um caráter dinâmico); d) ser componente, quando possível, de uma base de dados.

Evidentemente, a escolha de determinados indicadores depende da finalidade a que se propõe a utilização de determinado solo. Além disso, a seleção de uma propriedade específica como indicador de qualidade do solo pode ser trabalhoso e variar de acordo com as características intrínsecas de cada ambiente.

Indicadores físicos de qualidade do solo

A qualidade física de solos é um importante elemento de sustentabilidade, sendo uma área de estudo em contínua expansão (LAL, 2000; REYNOLDS et al., 2002), já que as propriedades físicas e os processos do solo estão envolvidas no suporte ao crescimento radicular; armazenagem e suprimento de água e nutrientes, trocas gasosas e atividade biológica (ARSHAD et al., 1996).

Geralmente, os principais indicadores físicos, que têm sido utilizados e recomendados são textura; espessura (horizonte A; solum); densidade do solo; resistência à penetração; porosidade; capacidade de retenção d'água; condutividade hidráulica; e estabilidade de agregados.

A textura do solo é uma das propriedades mais estáveis, sendo modificada levemente pelo

cultivo e outras práticas que ocasionam a mistura de diferentes camadas (ARSHAD et al., 1996). Contudo, é uma propriedade que tem estreita relação com a retenção e o transporte de água, estrutura do solo, teor de nutrientes e de matéria orgânica, além de influenciar fortemente os processos erosivos do solo (FELLER e BEARE, 1997).

A espessura, principalmente do horizonte superficial, tem sido sugerida como um dos melhores indicadores da qualidade do solo, pois, nesta faixa, encontra-se maior atividade da biota, sendo, conseqüentemente, um local propício para ciclagem de matéria orgânica e nutrientes. Além disso, há uma estreita relação entre a produtividade agrícola e a profundidade do solo, levando-se em consideração sua importância na armazenagem de água e suprimento de nutrientes para as plantas SNAKIN et al. (1996).

O processo de compactação do solo pode alterar a estrutura do solo, aumentar a sua densidade, diminuir a porosidade, reduzir a permeabilidade (ar e água) e alterar o padrão de crescimento radicular (BATEY e MCKENZIE, 2006). A densidade é a propriedade física mais dinâmica e varia em função da textura, de acordo com as condições estruturais do solo, sendo alterada pelo cultivo, pela compressão de máquinas agrícolas, por animais e condições ambientais do meio (ARSHAD et al., 1996).

A resistência do solo à penetração tem sido freqüentemente utilizada para avaliar sua compactação, por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas (LETEY, 1985) e de fácil e rápida determinação (STOLF, 1991). A determinação da resistência do solo à penetração é uma estratégia útil para avaliar a limitação à penetração e o crescimento e desenvolvimento do sistema radicular, mas pode haver divergências quanto à correlação entre a pressão exercida pelo penetrômetro e a real capacidade das raízes em exercer a referida pressão (GARDNER et al., 1999), sendo ainda, fortemente influenciada pelo conteúdo de água.

O conhecimento da porosidade total de um solo não constitui uma informação muito importante quanto às suas propriedades. Operacionalmente, costuma-se classificar os poros do solo de acordo com as classes de tamanho, ou seja, macroporos e microporos, cujo limite está nos poros com diâmetros menores e maiores que 0,6 mm, respectivamente, e uma altura da coluna de água de aparelhos com a mesa de tensão de 60 cm, admitindo-se que os

macroporos sejam responsáveis pelo livre movimento do ar, da água e do crescimento radicular, e os microporos um reservatório de água (REICHARDT, 1990).

A redução no número dos macroporos pode ocorrer devido à pressão mecânica de máquinas agrícolas; à compressão do ar nos microporos dos agregados, durante os ciclos de umedecimento e secagem do solo; à força cinética da gota da chuva; à aração profunda e ao entupimento dos microporos; e ao baixo conteúdo de matéria orgânica e nutrientes.

A porosidade e a densidade do solo têm sido utilizadas como indicadoras da qualidade do solo, por tratar-se de propriedades dinâmicas, suscetíveis ao uso e de fácil determinação, estando relacionadas, à compactação e à relativa restrição ao crescimento radicular (ARSHAD et al., 1996).

A capacidade de retenção de água de um solo dependerá do número e tamanho dos poros, os quais são influenciados primariamente pela textura, estrutura, matéria orgânica e mineralogia do solo (LOWERY et al., 1996). Esta propriedade está relacionada ao transporte e armazenamento de água no solo, à erosividade do solo e ao teor de água disponível (DORAN e PARKIN, 1996).

A condutividade hidráulica é uma propriedade do solo que descreve sua capacidade em transmitir água e que depende da geometria dos poros e das propriedades do fluido contido neles (REICHARDT, 1990). As duas propriedades dos fluidos que afetam diretamente a condutividade hidráulica são a viscosidade e a densidade. A textura e a estrutura do solo são os principais determinantes da geometria dos poros.

A estrutura do solo se refere ao tamanho e ao padrão de arranjo das partículas primárias (areia, silte e argila) e poros do solo, e como estão organizados (agregados). A intrincada dinâmica da agregação resulta da interação entre fatores ambientais, de manejo do solo, influência da planta e propriedades do solo, como: composição mineral, textura, carbono orgânico do solo, processos pedogenéticos, atividade microbiana, capacidade de troca catiônica, reserva nutricional e disponibilidade de água, sendo freqüentemente expressa em termos de estabilidade de agregados (BRONICK e LAL, 2005).

Segundo SÁ et al. (2000), a estabilidade de agregados o parâmetro que melhor se correlaciona com a erodibilidade do solo, estando pois influenciada pela infiltração, a retenção de água, a aeração e a

resistência à penetração de raízes, o selamento e o encrostamento superficial, a erosão hídrica e eólica. Com o cultivo, normalmente há redução nos teores da matéria orgânica e, conseqüentemente, na estabilidade de agregados, resultando no aumento da proporção relativa de microagregados no solo, cuja estabilidade não é influenciada pelo manejo (TISDALL e OADES, 1982).

A avaliação da estabilidade dos agregados em solos depende das forças que ligam as partículas e da natureza e magnitude das forças desagregantes aplicadas nesta avaliação (BEARE e BRUCE, 1993), existindo diferenças entre os métodos disponíveis para avaliação da estabilidade de agregados (EMBRAPA, 1997; SÁ et al., 2000; DIAZ-ZORITA et al., 2002), sendo motivo de controvérsia.

Além dos indicadores físicos discutidos, têm sido desenvolvidos parâmetros físicos que integram propriedades físicas do solo, como o intervalo hídrico ótimo (IHO) (SILVA et al., 1994), a densidade relativa do solo (KLEIN, 2006) e o parâmetro S (DEXTER, 2004).

Indicadores químicos de qualidade do solo

Os indicadores químicos são, normalmente, agrupados em variáveis relacionadas com o teor de matéria orgânica do solo, a acidez do solo, o conteúdo de nutrientes, elementos fitotóxicos (Al^{3+} , por exemplo) e determinadas relações como a saturação de bases (V%) e de alumínio (m).

A matéria orgânica do solo (MOS) refere-se a todo material orgânico contido no solo, incluindo a liteira, as frações leves, a biomassa microbiana, substâncias orgânicas solúveis em água e a matéria orgânica estabilizada, comumente denominada húmus (STEVENSON, 1994). A MOS é referida como indicadora da qualidade do solo em virtude de sua suscetibilidade de alteração em relação às práticas de manejo e por correlacionar-se com a maioria das propriedades do solo (MIELNICKZUK, 1999).

Apesar da pouca contribuição em termos de massa total em solos minerais a fração orgânica pode exercer acentuada influência nas propriedades físicas, químicas e biológicas do solo, bem como nos processos de funcionamento do ecossistema (STEVENSON, 1994; BALDOCK e NELSON, 2000).

A decomposição dos resíduos orgânicos e, por conseguinte, o conteúdo da MOS são regulados pelo sistema de manejo adotado e

pelas características da comunidade microbiana decompositora, do material orgânico e do ambiente onde o processo ocorre, incluindo, nesse caso, as condições edafometeorológicas (STEVENSON, 1994; BALDOCK e NELSON, 2000).

A fitotoxidez por Al^{3+} é uma das principais limitações químicas ao uso agrícola em ecossistemas tropicais, em razão de sua capacidade de gerar acidez no solo, devido às reações de hidrólise do Al^{3+} hidratado em solução (MARSCHNER, 1995). Embora a toxidez por alumínio não ocorra em solos com pH acima de 5,5, ela é comum mediante a ocorrência de valores mais baixos de pH, particularmente abaixo de 5, faixa em que a solubilidade de alumínio aumenta e mais da metade do complexo de troca pode ser ocupado por ele (FOY, 1974).

Medidas que expressam a disponibilidade de nutrientes, como cálcio e magnésio trocáveis, fósforo, potássio, micronutrientes, assim como suas relações são importantes para avaliar qualidade de solo entre diferentes sistemas de manejos.

Indicadores biológicos de qualidade do solo

Os indicadores biológicos, como a biomassa microbiana do solo, o nitrogênio mineralizável, a respiração microbiana do solo, a atividade enzimática e o quociente metabólico, são importantes tanto no que se refere à ciclagem dos nutrientes, como também na estimativa da capacidade do solo para o crescimento vegetal.

A biomassa microbiana do solo é o componente vivo da matéria orgânica do solo. Sua avaliação é útil para obter informações rápidas sobre mudanças nas propriedades orgânicas do solo; detectar variações causadas por cultivos ou por devastação de florestas; medir a regeneração dos solos após a remoção da camada superficial; e avaliar os efeitos de poluentes como metais pesados e pesticidas (FRIGHETTO, 2000).

Os métodos mais freqüentemente utilizados para determinação da biomassa microbiana são fumigação-incubação (JENKINSON e POWLSON, 1976), fumigação-extração (VANCE et al., 1987) e irradiação com microondas (ISLAM e WEIL, 1998).

Os métodos da fumigação-incubação e fumigação-extração têm o inconveniente de demandarem tempo de análise e serem relativamente perigosos devido à utilização de clorofórmio ($CHCl_3$) no processo de fumigação. Nesse sentido, tem

sido defendida a possibilidade de substituição da fumigação pela irradiação das amostras de solo em forno de microondas, pelo fato de ser mais rápido, exigir procedimentos simples e não ser tóxico (FERREIRA et al., 1999).

A quase totalidade do N no solo está na forma de compostos orgânicos que não podem ser utilizados diretamente pelas plantas e também não são suscetíveis à lixiviação (BALDOCK e NELSON, 2000). O conteúdo de N convertido da forma orgânica para a mineral (mineralização) depende do manejo adotado, do clima e de propriedades inerentes ao solo (DRINKWATER et al., 1996). Esse potencial de conversão do N orgânico para o N mineral (nitrogênio potencialmente mineralizável) tem sido considerado importante sob o ponto de vista edáfico, sendo, portanto, um indicador recomendável de qualidade do solo.

Um dos métodos mais recomendados para se estimar o N potencialmente mineralizável envolve a mensuração do conteúdo de N mineral liberado no solo pela atividade microbiana durante a incubação (DRINKWATER et al., 1996), que pode se processar em meio aeróbico ou anaeróbico.

A respiração microbiana do solo é um processo que reflete a atividade biológica do solo, sendo definida como a produção de CO₂ ou o consumo de O₂ como resultado de processos metabólicos de organismos vivos do solo. Existem basicamente dois métodos propostos para quantificar o conteúdo de CO₂ produzido: o primeiro é baseado na determinação do fluxo de CO₂ usando câmaras que são colocadas sobre o solo; o segundo é usado para avaliar a atividade microbiana, sendo baseado na produção de CO₂ a partir de uma amostra de solo em laboratório (PARKIN et al., 1996).

O quociente microbiano (q_{MIC}), que corresponde à relação entre o carbono da biomassa microbiana (CBM) e o carbono orgânico total (COT), reflete processos importantes relacionados às adições e transformações da matéria orgânica, assim como a eficiência de conversão de C desta em C microbiano (SPARLING, 1992). Em circunstâncias de desequilíbrio ambiental ou em situação em que a biomassa experimenta algum fator de estresse (deficiência de nutrientes, acidez, déficit hídrico, etc.), a capacidade de utilização de C é diminuída e, neste caso, o q_{MIC} tende a diminuir (WARDLE, 1992).

Por outro lado, em ecossistemas estáveis, onde predominam condições favoráveis, há uma tendência de aumento da atividade microbiana e,

em consequência, o q_{MIC} tende a crescer até atingir um equilíbrio (POWLSON et al., 1987). Desse modo em ambientes preservados, em estado de equilíbrio, o valor desta relação pode ser usado como padrão para avaliar quanto um solo se encontra degradado.

Avaliação da qualidade do solo

Até o presente não existe um método prático e confiável para estimar a qualidade do solo (KARLEN et al., 1997), porém, mudanças na qualidade do solo têm sido avaliadas por intermédio da mensuração de indicadores apropriados e pela sua comparação com valores desejáveis (limite crítico ou “threshold level”) em diferentes intervalos de tempo, para um fim específico em ecossistemas agrícolas, florestais e pecuários.

ARSHAD e MARTIN (2002) sugerem as seguintes etapas como pressupostos para avaliar a qualidade do solo: a) dividir a região ou área de estudo em diferentes ecorregiões; selecionar zonas ecológicas, fazendas ou bacias hidrográficas com solos similares; b) definir o objetivo do estudo sobre a qualidade do solo (produção agrícola, proteção ambiental ou qualquer outro uso); c) eleger um conjunto de indicadores para a área de estudo; selecionar um ponto de referência (linha base) para cada indicador; d) especificar os limites críticos para os indicadores selecionados, que irão variar em função de cada indicador e transformá-los em qualidade do solo/índice de sustentabilidade.

Na etapa de seleção de indicadores, CAMERON et al. (1998) recomendam o uso de escores que auxiliem na escolha de indicadores potenciais para solos degradados ou em processo de degradação, de maneira a possibilitar o ranking em comparação com outros potenciais indicadores.

No processo de avaliação da qualidade do solo têm surgido vários sistemas quantitativos expressos na forma de índices (KARLEN e STOTT, 1994; SNAKIN et al., 1996; ISLAM e WEIL, 2000) e que são considerados importantes dado à facilidade de uso e a possibilidade de uma escala contínua de avaliação (SINGER e EWING, 1999).

Dentre os métodos quantitativos mencionados acima, o conjunto de procedimentos (“framework”) proposto por KARLEN e STOTT (1994) é o que tem se destacado em diversos trabalhos de mensuração da qualidade do solo (CHAER, 2001; MELO FILHO et al., 2007; ANDREWS et al., 2004; ERKOSSA et al., 2007). Nesses trabalhos têm sido dada ênfase na integração

de indicadores de modo a gerar um valor (índice de qualidade do solo) que possa ser comparado entre várias práticas de manejo, ao longo do tempo, em ecossistemas agrícolas, florestais e pecuários, e tem demonstrado ser bastante flexível e de relativa facilidade de utilização.

De forma mais simplificada, ISLAM e WEIL (2000) avaliaram as mudanças de uso da terra em ecossistemas de floresta tropical de Bangladesh, utilizando o índice de deterioração do solo (IDS), proposto anteriormente por ADEJUWON e EKANADE (1988). ISLAM e WEIL (2000) partiram do princípio de que o status das propriedades individuais do solo sob plantios florestais e pastagem eram os mesmos para aqueles solos adjacentes sob floresta nativa, anterior ao processo de conversão. As diferenças entre as propriedades dos solos sob pastagem, comparadas à linha-base das propriedades do solo sob vegetação nativa, foram calculadas e expressas como a percentagem da média dos valores individuais de cada propriedade a fim de compor o índice de deterioração do solo (IDS).

As dificuldades apresentadas com a utilização desses procedimentos são, em muitas situações, em decorrência de fatores como: a) complexidade no processo de integração das variáveis envolvidas; b) busca constante de indicadores-chave e seus limites críticos (*threshold values*) (ARSHAD e MARTIN, 2002); c) padronização dessas variáveis (NORTCLIFF, 2002); e d) busca e ajuste dos métodos de amostragem e procedimentos analíticos (DORAN e JONES, 1996), e em razão do caráter multidisciplinar.

Conclusões

Em última análise, não se deve negar o aspecto positivo que representam os mecanismos e procedimentos (frameworks) utilizados para a mensuração da qualidade do solo, desde que integrem uma série de propriedades relacionadas às funções vitais do solo. Neste caso, pode-se ter uma visão mais integrada dos ecossistemas, mesmo sabendo que dificilmente se conseguirá avaliar integralmente a qualidade do solo.

Referências

- ADEJUWON, J.O.; EKANADE, O. A comparison of soil properties under different land use types in a part of the Nigerian cocoa belt. **Catena**, v.15, p.319-331, 1988.
- ANDREWS, S.S.; KARLEN, D.L.; CAMBARDELLA, C.A. The soil management assessment framework: a quantitative soil quality evaluation method. **Soil Science Society of America Journal**, v.68, p.1945-1962, 2004.
- RSHAD, M.A.; LOWER, B.; GROSSMAN, B. Physical tests for monitoring soil quality. **In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.). Methods for assessing soil quality. Soil Science Society of America**, p.123- 141, 1996. (Special publication, 49).
- ARSHAD, M.A.; MARTIN, S. Identifying critical limits for soil quality indicators in agro-ecosystems. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.88, n.2, p.153-160, 2002.
- BALDOCK, J.A.; NELSON, P.N. Soil organic matter. **In: SUMMER, M.E. (Ed.). Handbook of soil science**. Georgia, USA: University of Georgia, 2000. p.B25-B84.
- BATEY, T.; MCKENZIE, D.C. Soil compaction: identification directly in the field. **Soil Use and Management**, v.22, n.2, p.123-131, 2006.
- BEARE, M.H.; BRUCE, R.R. A comparison of methods for measuring water-stable aggregates: implications for determining environmental effects on soil structure. **Geoderma**, v.56, n.1, p87-104, 1993.
- BRONICK, C.J.; LAL, R. Soil structure and management: a review. **Geoderma**, v.124, n.1, p.3-22, 2005.
- CAMERON, K.; BEARE, M.H.; MCLAREN, R.P.; DI, H. Selecting physical, chemical and biological indicators of soil quality for degraded or polluted soils. **In: Proceedings of World Congress of Soil Science**, 16, France. Montpellier, France, 1998. (Scientific registration, 2516 - Symposium, 37).
- CHAER, G.M. **Modelo para determinação de índice de qualidade do solo baseado em indicadores físicos, químicos e microbiológicos**. Dissertação (Mestrado em Microbiologia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, MG. 2001. 89f.

- DEXTER, A.R. Soil physical quality - Part I. Theory, effects of soil texture, density, and organic matter, and effects on root growth. *Geoderma*, v.120, n.3-4, p.201-214, 2004.
- DIAZ-ZORITA, M.; PERFECT, E.; GROVE, J.H. Disruptive methods for assessing soil structure. *Soil e Tillage Research*, v.64, n.1, p.3-22, 2002.
- DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society of America, 1996. 409 p.
- 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, Wisconsin: Soil Science Society American, 1994. p. 3-21. (Special Publication, 35).
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Quantitative indicators of soil quality: a minimum data set. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Wisconsin, USA: Soil Science Society American, 1996. p.25-37. (Special Publication, 49).
- Drinkwater, L.E., Cambardella, C.A., Reeder, J.D., Rice, C.W. Potentially mineralizable nitrogen as indicator of biologically active soil nitrogen. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Wisconsin, USA: Soil Science Society America, 1996. Cap.13, p.217-229. (Special Publication, 49).
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.
- ERKOSSA, T.; ITANNA, F.; STAHR, K. Indexing soil quality: a new paradigm in soil science research. *Australian Journal of Soil Research*, v.45, n.2, p.129-137, 2007.
- FELLER, C.; BEARE, M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. *Geoderma*, v.79, n.1, p.69-116, 1997.
- FERREIRA, A.S.; CAMARGO, F.A.O.; VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v.23, n.4, p.991-996, 1999.
- FOY, C.D. Effects of aluminum on plant growth. In: CARSON, E.W. (Ed.). **The plant root and its environment**. Charlottesville: University Press of Virginia, 1974. p. 601-642.
- FRIGHETTO, R.T.S. Análise da biomassa microbiana em carbono: método de fumigação - extração. In: FRIGHETTO, R.T.S.; VALARINI, P.J. (Coords.). **Indicadores biológicos e bioquímicos da qualidade do solo: manual técnico**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2000. 198p. (EMBRAPA Meio Ambiente - Documentos, 21).
- GARDNER, C.M.K.; LARYEA, K.B.; UNGER, P.W. **Soil physical constraints to plant growth and crop production**. Roma: FAO, 1999.106 p.
- GREGORICH, E.G.; CARTER, M.R.; DORAN, J.W.; PANKHURST, C.E.; DWYER, M. Biological attributes of soil quality. In: GREGORICH, E.G.; CARTER, M. (Ed.). **Soil quality for crop production and ecosystem health**. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science, 1997.
- ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. *Agriculture, Ecosystems e Environment*, v.79, n.1, p.9-16, 2000.
- ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. *Biology and Fertility Soils*, v. 27, n. 4, p. 408-416, 1998.
- JENKINSON, D.S.; POWLSON, D.S. The effects of biocidal treatments on metabolism in soil: method for measuring soil biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, v.8, n.3, p.209-213, 1976.
- 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. *Soil Science Society America Journal*, v.61, n.1, p.4-10, 1997.
- KARLEN, D.L.; STOTT, D. A framework for evaluating physical and chemical indicators. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F.; STEWART, B.A. (Eds.). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison, Wisconsin, USA: Soil Science Society American, 1994. Cap.4, p.53-72. (Special Publication, 35).

- KLEIN, V.A. Densidade relativa – um indicador da qualidade física de um Latossolo Vermelho. **Revista de Ciências Agroveterinárias**, v 5, n.1, p.26-32, 2006.
- LAL, R. Physical management of soils of the tropics: priorities for the 21st century. **Soil Science**, v.165, n.3, p.191-207, 2000.
- 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, Wisconsin, USA: Soil Science Society American, 1994. p.37-52. (Special Publication, 35).
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, v.1, p.277-294, 1985.
- LOWERY, B. Soil water parameters and soil quality. In: DORAN, J.W.; JONES, A.J. (Eds.). **Methods for assessing soil quality**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. Cap.8, p.143-155.
- MARSCHNER, H. **Mineral nutrition of higher plants**. Academic Press, 1995. 889 p.
- MELO FILHO, J. F; SOUZA, A.L.V; SOUZA, L.S. Determinação do índice de qualidade subsuperficial em um Latossolo Amarelo Coeso dos Tabuleiros Costeiros, sob floresta natural. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, n.6, p.1599-1608, 2007.
- MIELNICZUCK, J. Matéria orgânica e a sustentabilidade de sistemas agrícolas. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O (Eds.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. Cap.1, p.1-6.
- NATIONAL RESEARCH COUNCIL – NRCC. **Soil and water quality: and agenda for agriculture**. Washington, DC: National Academy Press, 1993. 542 p.
- NORFLEET, M.L.; DITZLER, C.A.; PUCKETT, W.E.; GROSSMAN, R.B.; SHAW, J.N. **Soil quality and its relationship to pedology**. **Soil Science**, v.168, n. 3, p. 149-155, 2003.
- NORTCLIFF, S. Standardization of soil quality attributes. **Agriculture Ecosystems e Environment**, v.88, n.2, p.161-168, 2002.
- PARKIN, T. B.; DORAN, J. W.; FRANCO-VIZCAÍNO. Field and laboratory tests of soil respiration. In: DORAN, J.W. e JONES, A., eds. **Methods for assessing soil quality**. Madison, Soil Science Society of America, 1996. p.231-245.
- PIRSIG, R.M. **Zen e arte de manutenção de motocicletas: uma investigação sobre valores**. 12.ed. Rio de Janeiro: Paz e Terra, 1984. 388 p.
- POWLSON, D.S.; BROOKES, P.C.K.; CHRISTENSEN, B.T. Measurement of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total organic matter due to straw incorporation. **Soil Biology and Biochemistry**, v.19, n.2, p.159-164, 1987.
- REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.
- REINERT, D.J. Recuperação de solos em sistemas agropastoris. In: DIAS, L.E.; GRIFFIT, J.J. (Eds.). **Recuperação de áreas degradadas**. Viçosa: UFV, 1998. p. 163-176.
- REYNOLDS, W.D. et al. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v.110, n.1-2, p.131-146, 2002.
- SA, M.A.C.; LIMA, J.M.; SILVA, M.L.N.; DIAS JUNIOR, M.S. Comparison of methods for aggregate stability studies in soils. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.9, 2000.
- SCHOENHOLTZ, S.H.; VAN MIEGROET, H.; BURGER, J.A.A. review of chemical and physical properties as indicators of forest soil quality: challenges and opportunities. **Forest Ecology and Management**, v.138, n.1-3, p.335-356, 2000.
- SEYBOLD, C.A.; HERRICK, J.E. & BREJDA, J.J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, v.164, n.4, p.224-234, 1999.

Araújo et al. (2012)

- SILVA, A.P. da; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.1775-1781, 1994.
- SINGER, M.J.; EWING, S.S. Soil quality. In: SUMMER, M.E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Georgia, USA: University of Georgia, 1999. p. G-271-G-298.
- SNAKIN, V.V.; KRECHETOV, P.P.; KUZOVNIKOVA, T.A.; ALYABINA, I.O.; GUROV, A.F.; STEPICHEV, A.V. The system of assessment of soil degradation. **Soil Technology**, v.8, n.4, p.331-343, 1996.
- SOJKA, R.E.; UPCHURCH, D.R. Reservations regarding the soil quality concept; discussion. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63, n.5, p.1039-1054, 1999.
- SPARLING, G.P. Ratio of microbial biomass carbon to soil organic carbon as a sensitive indication of changes in soil organic matter. **Australian Journal of Soil Research**, v.30, n.2, p.195-207, 1992.
- STEVENSON, F.J. **Humus chemistry**: genesis, composition, reactions. New York: John Wiley, 1994. 496 p.
- STOLF, R. Teoria de testes experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.15, p.229-235, 1991.
- TISDALL, J.M.; OADES, J.M. Organic matter and water stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, v.33, n.1, p.141-163, 1982.
- VANCE, E.D.; BROOKES, P.C.; JENKINSON, D.S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biology and Biochemistry**, v.19, n.6, p.703-707, 1987.
- WARDLE, D.A. A comparative assessment of factors which influence microbial biomass carbon and nitrogen levels in soil. **Biological Reviews**, v.67, n.3, p. 321-358, 1992.