

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

Serviços Ambientais em Sistemas Agrícolas e Florestais do Bioma Mata Atlântica

*Lucilia Maria Parron
Junior Ruiz Garcia
Edilson Batista de Oliveira
George Gardner Brown
Rachel Bardy Prado
Editores Técnicos*

Embrapa
Brasília, DF
2015

Matéria orgânica como indicador da qualidade do solo e da prestação de serviços ambientais

Claudia Maria Branco de Freitas Maia; Lucilia Maria Parron

Resumo: O solo é reconhecido pelo seu múltiplo papel nos serviços prestados pelos ecossistemas, tais como a retenção de carbono e nitrogênio, a manutenção da qualidade da água, a redução da lixiviação de nitrato, o equilíbrio do clima e a conservação da biodiversidade. O carbono orgânico é um dos indicadores mais frequentemente usados na avaliação da qualidade e da sustentabilidade do solo. Tal atributo tem forte impacto sobre outras propriedades físicas, químicas e biológicas do solo. Os diversos sistemas de uso da terra podem levar a diferentes acúmulos das frações da matéria orgânica no solo, de estabilidades variadas. Porém, dependendo do procedimento usado no estudo destes atributos, diferentes frações podem ser obtidas. Isto ocorre porque existem muitas possibilidades de isolamento e fracionamento da MOS, o que leva à grande pluralidade de interpretações e conclusões. Este capítulo discute os tipos de frações da MOS, sua origem, processos de acúmulo e suas funções no solo. Uma descrição é dada sobre os métodos de fracionamento físico da MOS e sobre as funções no solo relacionadas às frações resultantes e como estas podem ser usadas como indicadores para comparar diferentes usos da terra e, conseqüentemente, estimar a prestação de serviços ambientais.

Palavras-chave: carbono do solo; serviços ambientais; fracionamento da MOS.

Organic matter as an indicator of soil quality and ecosystem services

Abstract: *The soil is known for its multifunctional role in ecosystem services such as retention of carbon and nitrogen, maintenance of water quality, reduction of nitrate leaching, climate balance and biodiversity conservation. Soil organic carbon is one of the most common indicator used to evaluate soil quality and sustainability since it has a strong impact on other physical, chemical and biological properties of the soil. Each land use system leads to a diverse accumulation of soil organic matter and to fractions with different stability. However, different fractions can be obtained in SOM studies, depending on the procedure or the research goal of the soil scientist. In fact, there are several ways of isolating or fractioning the SOM, leading to different interpretations and conclusions. This chapter presents and discusses some types of SOM fractions, their origin, accumulation processes and functions in soil. A description on the methodology of physical fractionation is given as well as on the soil functions related to each resulting fraction. Finally, we discuss how organic matter indicators have been used to compare land uses and to estimate the provision of ecosystem services.*

Keywords: *soil carbon; ecosystem services; SOM fractionation.*

1. Introdução

O solo tem sido a principal fonte de bens – alimentos, fibras e madeira - para a sobrevivência da humanidade, especialmente quando esta se estabeleceu como agricultora. O reconhecimento do valor dos serviços prestados pelo solo para as sociedades humanas vem mudando ao longo da história, variando conforme a base cultural e econômica de uma sociedade em dado contexto (ROMANYÀ et al., 2006). Hoje, além da importância para a produção de bens primários, o solo vem sendo também reconhecido pelo seu múltiplo papel nos serviços prestados pelos ecossistemas no aumento da retenção de carbono (PILLAR et al., 2012) e de nitrogênio, na manutenção da qualidade da água, redução da lixiviação de nitrato (HARMAND et al., 2007), no equilíbrio do clima e na conservação da biodiversidade (MOÇO et al., 2009).

Conforme exposto no Capítulo 1, solos e usos da terra desempenham um papel central na prestação de serviços ambientais de provisão (produção de alimentos, fibras e madeira), de suporte (ciclagem de nutrientes), de regulação (sequestro de carbono) e culturais (beleza cênica da paisagem) (JANETOS; KASPERSON, 2005). A manutenção da qualidade do solo é, sem dúvida, um dos principais pilares da sustentabilidade agrícola e florestal, entendendo-se como qualidade do solo a sua capacidade de produzir bens e serviços econômicos e de regular o ambiente (LAL, 1993) ou ainda, a capacidade do solo funcionar para manter a produtividade vegetal e animal, manter ou melhorar a qualidade do ar e da água e, assim, promover a saúde e habitação humanas, dentro dos limites de ecossistemas naturais ou manejados (KARLEN et al., 1997). Este capítulo discute a origem e processos de acúmulo da matéria orgânica do solo (MOS); descreve os métodos de fracionamento físico da MOS e as funções no solo que estão melhor relacionadas com estas frações; e mostra como esses indicadores podem ser utilizados para comparar usos da terra e, conseqüentemente, avaliar a prestação de serviços ambientais.

2. Indicadores de qualidade do solo e funções ecossistêmicas

A qualidade do solo pode ser medida por indicadores definidos a partir de diferentes pontos de vista, como o ecológico, o econômico ou o social e levam em consideração certa propriedade, ou função do solo, que reflita as mudanças em um agroecossistema ou em sistema florestal (MARTINEZ-SALGADO et al., 2010). A escolha de um indicador de qualidade depende, primeiramente, do

objetivo do estudo e do interesse do observador (SHUKLA et al., 2006) e a diferença entre o olhar conservacionista e o produtivista pode levar a escolhas diferentes na função do solo a ser avaliada. Em geral, estudos que adotam indicadores de qualidade podem ser classificados em dois tipos: os que avaliam a variação de um indicador do solo no tempo dentro de um sistema e os que comparam diferentes sistemas entre si. No primeiro caso, é desejável que o indicador seja sensível a variações em um curto espaço de tempo. No segundo caso, a dependência temporal não é tão importante, mas é preciso que o indicador seja sensível às mudanças no manejo (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009). Outros critérios a considerar na escolha do indicador são: a facilidade de medição, a confiabilidade metodológica e os custos envolvidos em sua medição.

Os indicadores de solos podem representar propriedades físicas, químicas ou biológicas associadas aos diferentes processos que ali ocorrem, tais como, ciclagem de nutrientes, retenção hídrica, potencial de erosão, potencial de lixiviação, atividade biológica, entre outros. Textura, porosidade, densidade e estabilidade de agregados podem ser citadas como as propriedades físicas mais usadas como indicadores de solo. A acidez (pH), salinidade, teor de carbono total ou orgânico, fósforo disponível, capacidade de troca iônica, entre outros, são exemplos de atributos. Quanto às propriedades biológicas, podem ser citadas as medidas de abundância de diferentes organismos do solo (minhocas, nematoides, térmitas, formigas, actinomicetos, etc.), a biomassa microbiana, atividade enzimática, entre outros. Para ser um bom indicador de qualidade, a propriedade ou função que ele representa precisa se relacionar com os processos envolvidos na transformação do solo, decorrente das práticas agrícolas adotadas no sistema estudado. Portanto, a definição e delimitação claras de tais processos são fundamentais para a escolha de indicadores da qualidade do solo. Frequentemente, nesta etapa do estudo, algum juízo de valor será usado e a escolha de indicadores pode tomar tempo considerável no planejamento dos experimentos frequentemente usados para avaliar a qualidade de solos (MAIA et al., 2013).

3. Matéria Orgânica do Solo como indicador de funções do ecossistema

Por estar intimamente relacionada a várias funções essenciais, a MOS, ou as propriedades/processos do solo

por ela afetados, estão entre os indicadores mais estudados para avaliar a qualidade do solo (MARTINEZ-SALGADO et al., 2010; REEVES, 1997). Entre estas funções, por exemplo, a MOS é a fonte primordial de carbono (C), que em compartimentos terrestres está estimada entre $1,22 \times 10^{18}$ g de C (SOMBROEK et al., 1993) e $2,293 \times 10^{18}$ g de C até um metro de profundidade (BATJES, 1996). É o maior depósito de C na superfície terrestre, estimado em três a quatro vezes maior que o C atmosférico (BATJES, 1996; STOCKMANN et al., 2013). A MOS, portanto, constitui a principal fonte de energia e nutrientes para a atividade microbiana. Processos como a “respiração microbiana do solo” ou evolução de dióxido de carbono (CO_2) estão fortemente associados ao teor e à qualidade da MOS e, como consequência, a própria diversidade biológica estará refletindo, também, a qualidade da MOS. Sua estabilidade será, por sua vez, consequência da dinâmica da atividade microbiana, do tipo e da quantidade de resíduos vegetais e animais aportados na superfície do solo e na rizosfera, e de outros atributos do solo, tais como tipo de argila, textura e pH. Por sua ação cimentante, a MOS influencia ainda diversas propriedades físicas do solo, tais como agregação, porosidade, densidade, retenção hídrica, potencial de infiltração e lixiviação, resistência à erosão, entre outros (SIX et al., 2002).

De acordo com Hayes e Swift (1978), a MOS pode ser descrita como o componente não-vivo da fração orgânica do solo, formada por uma mistura heterogênea composta principalmente pelos produtos resultantes da transformação química e microbiana de detritos orgânicos. Esta fração não-viva da MOS representa cerca de 95% de seus constituintes (MAIA et al., 2013) e pode ser dividida em duas partes: a fração não húmica em vários estágios de decomposição da biomassa de origem e a fração sem identidade morfológica e alterada quimicamente. A primeira fração, em geral, é associada à fração particulada da MOS e a segunda à fração da MOS estabilizada e frequentemente chamada de húmus (MAIA et al., 2013).

A quantidade e composição da MOS são fortemente afetadas pelo uso e cobertura da terra. Pegoraro et al. (2011), por exemplo, estudando solos sob eucalipto e pastagens e suas serapilheiras, encontrou maiores teores de fenóis derivados de lignina siringílica em solos sob eucaliptos do que sob pastagens. Porém, os solos nestas pastagens apresentaram maiores teores de carboidratos e amino açúcares do que os solos sob eucalipto. Várias

propriedades químicas do solo, como capacidade de troca iônica e teor de nutrientes, entre outras, são fortemente afetadas pela quantidade e qualidade da MOS (MARTINEZ-SALGADO et al., 2010; REEVES, 1997; SIX et al., 2002).

Por englobar um universo tão heterogêneo de componentes e pelas dificuldades metodológicas em discriminar tais componentes em uma amostra de solo, a MOS tem sido caracterizada diferentemente de acordo com o método usado na sua amostragem e no seu fracionamento (MAIA et al., 2013). Como consequência disto, uma grande diversidade de indicadores associados à MOS vem sendo sugerida na literatura, desde índices de humificação associados ao teor das frações húmicas extraídas quimicamente, até o estudo de frações extraídas por soluções aquosas ou com diferentes densidades. Dependendo do foco adotado pelo cientista de solo na caracterização da MOS e dependendo do procedimento usado no estudo, diferentes aspectos podem estar refletidos nos resultados. Isto se deve ao fato de que existem muitas possibilidades de isolamento e fracionamento da MOS, o que leva a grande pluralidade de interpretações e conclusões. De qualquer forma, quando se pretende estudar a dinâmica da MOS, é quase sempre necessário se definir diferentes *pools*, ou reservatórios, conceituais baseado na velocidade de decomposição ou estabilidade química (LÜTZOW et al., 2007). Assim, o fracionamento da MOS, de modo a representar satisfatoriamente estas características ou atributos, é um desafio analítico. No contexto deste trabalho, o termo fração refere-se aos componentes da MOS mensuráveis e o termo *pool* refere-se aos componentes do solo, separados dentro de uma visão teórica (WANDER, 2004).

4. Fracionamento da matéria orgânica do solo (MOS)

O fracionamento visa separar frações homogêneas quanto à natureza, dinâmica e função da MOS, mas, ao mesmo tempo, manter sua identidade. A escolha do método de fracionamento depende do objetivo a alcançar, seja a caracterização química da MOS ou a quantificação de *pools* da MOS, associados à ciclagem e liberação de nutrientes para as plantas (ROSCOE; MACHADO, 2002).

Analiticamente, o fracionamento pode ser químico ou físico. No primeiro caso, a abordagem clássica é separar a MOS em três diferentes frações, de acordo com suas



solubilidades em diferentes faixas de pH: ácido húmico, solúvel em base; ácido fúlvico, solúvel em qualquer pH e humina insolúvel em qualquer pH. Atualmente, considera-se que estas frações, representam mera definição operacional, pois é sabido que moléculas simples, tais como açúcares, aminoácidos ou ácidos graxos, podem estar associadas a elas, juntamente com componentes mais humificados (MAIA et al., 2013). Os métodos físicos são considerados menos invasivos, preservando melhor as características do material de origem. Estes métodos podem ser granulométricos, quando fracionam a MOS de acordo com o tamanho de partícula, ou densimétricos, quando fracionam a MOS de acordo com a densidade dos seus diferentes componentes livres ou associados ao material mineral na forma de agregados.

O fracionamento densimétrico é usado para isolar a MOS que não está firmemente associada ao solo mineral (fração leve, FL) da fração formada por complexos organo-minerais (fração pesada, FP), com o objetivo de obter informações sobre os diferentes *pools* funcionais da MOS, representantes de sua estabilidade: o ativo, um intermediário e o passivo (LÜTZOW et al., 2007). Assim, este procedimento é usado para relacionar a MOS com a agregação e a estabilidade de agregados do solo ou, ainda, para a quantificação de compartimentos da MOS, visando estudos sobre sua dinâmica e sobre o papel das frações minerais na estabilização e transformação da MOS (ROSCOE; MACHADO, 2002). O fracionamento densimétrico remete a três frações: leve livre (FLL), leve oclusa (FLO) e fração pesada (FP).

Durante o processo de decomposição, uma parte da MOS associa-se às partículas minerais do solo, acumulando-se em frações de diferentes densidades (CONCEIÇÃO, 2006). A parte não decomposta (ou pouco decomposta) e fracamente associada às argilas, constitui a fração leve (FL), que pode, ainda, estar oclusa e protegida no interior dos agregados (FLO) ou livre entre estes agregados (FLL). A FLL é obtida mediante agitação branda em líquido de densidade conhecida, antes da dispersão completa dos agregados. A estabilidade desta fração está estreitamente associada à estabilidade de seus componentes moleculares. Assim, materiais mais ricos em lignina potencialmente se degradam mais lentamente do que materiais mais ricos em carboidratos ou proteínas. A FLO é, em geral, obtida após a destruição de agregados por sonicação e compreende um conjunto de compostos orgânicos em maior estágio de

decomposição do que a FLL (CONCEIÇÃO et al., 2008), mas com alguns componentes similares a esta última fração. A estabilidade da FLO é dada principalmente da proteção física provida pelo agregado.

Pesquisas recentes sugerem que a degradação da MOS depende mais da acessibilidade de seus componentes à enzimas e microrganismos, do que de sua estabilidade química (DUNGAIT et al., 2012; KLEBER et al., 2011; SCHMIDT et al., 2011). A fração pesada representa compostos orgânicos em estágio mais avançados de decomposição, fortemente associados à fração mineral (CONCEIÇÃO et al., 2008).

5. Mudanças no uso e cobertura da terra e o fracionamento densimétrico da MOS

Diferentes sistemas de uso da terra levam a diferentes acúmulos das frações da MOS, com diferentes estabilidades químicas. No caso do fracionamento densimétrico, admite-se que a associação das partículas do solo e seu arranjo espacial têm um papel fundamental nesta dinâmica da MOS (LÜTZOW et al., 2007).

A fração leve representa o material vegetal não decomposto ou em estágio inicial de decomposição. Assim, esta fração representa, também, uma fase de transição no processo de humificação (LEIFELD; KÖGEL-KNABNER, 2005). Frações da MOS com tempos de degradação entre anos a décadas, tais como a FL, muitas vezes respondem mais rapidamente às mudanças induzidas pelo manejo do solo, do que a fração mais estabilizada, ou mais humificada, associada à fração mineral (CONCEIÇÃO, 2006; LEIFELD; KÖGEL-KNABNER, 2005).

A dinâmica das frações da MOS é afetada pelos mecanismos de estabilização (recalcitrância, proteção física e associação com os minerais), especialmente de 0 a 20 cm de profundidade. Mudanças nos sistemas de uso e manejo do solo usualmente afetam primeiramente os estoques de FLL, cuja persistência no solo depende essencialmente de sua recalcitrância, seguida pela FLO, que além da recalcitrância é protegida pela oclusão em agregados, e, finalmente, pela FP que pode sofrer a influência dos três mecanismos (recalcitrância, oclusão e interação coloidal) (TOMAZI, 2008).

Na Tabela 1 encontram-se alguns resultados sobre estudos da distribuição das frações LL, LO e P em solos de clima tropicais e subtropicais.

Tabela 1. Carbono total e nas frações leve livre, leve oclusa e pesada da matéria orgânica, entre 0-20 cm de profundidade, em solos tropicais e subtropicais, em diferentes sistemas de uso do solo.

Área	Uso	Sistema	Textura do solo	CO (Mg ha ⁻¹)				C Total (%)			Referência
				FLL	FLO	FP	Total	FLL	FLO	FP	
Eldorado do Sul, RS	L	PC AM	P franco-argilo-arenoso	0,84	3,97	22,95	27,76	3	14	84	Conceição (2006)
Eldorado do Sul, RS	L	Plantio direto	P franco-argilo-arenoso	1,07	4,51	25,51	31,09	3	15	82	Conceição (2006)
Eldorado do Sul, RS	N	Campo nativo	P franco-argilo-arenoso	1,49	4,78	33,04	39,31	4	12	84	Conceição (2006)
Santo Ângelo, RS	L	Plantio convencional	LV muito argiloso	0,97	8,08	30,98	40,03	3	21	76	Conceição (2006)
Santo Ângelo, RS	L	Plantio direto	LV muito argiloso	0,75	8,2	31,4	40,35	2	21	77	Conceição (2006)
Santo Ângelo, RS	N	Mata	LV muito argiloso	4,65	15,26	45,98	65,89	7	23	70	Conceição (2006)
Luziânia, GO	L	Preparo convencional	LVA muito argiloso	2,76	7,92	39,47	50,15	6	16	79	Tomazi (2008)
Luziânia, GO	L	Plantio direto	LVA muito argiloso	7,51	9,25	39,44	56,2	13	17	70	Tomazi (2008)
Luziânia, GO	L	Cultivo mínimo	LVA muito argiloso	4,48	9,12	36,13	49,73	9	18	73	Tomazi (2008)
Luziânia, GO	N	Cerrado	LVA muito argiloso	2,83	8,1	38,83	49,76	6	16	78	Tomazi (2008)
Costa Rica, MS	L	Preparo convencional	LV muito argiloso	3,43	8,17	36,75	48,35	7	17	76	Tomazi (2008)
Costa Rica, MS	L	Plantio direto	LV muito argiloso	3,29	8,31	39,6	51,2	6	16	77	Tomazi (2008)
Costa Rica, MS	L	Cultivo mínimo	LV muito argiloso	2,71	7,81	38,03	48,55	6	16	78	Tomazi (2008)
Costa Rica, MS	N	Cerrado	LV muito argiloso	3,84	8,8	46,94	59,58	6	15	79	Tomazi (2008)
Belo Oriente, MG	FP	Eucalipto	Argiloso	2,19	0,73	38,64	41,56	5	2	93	Lima et al. (2008)
Belo Oriente, MG	P	Extensiva degradada	Argiloso	2,20	0,61	28,73	31,54	7	2	91	Lima et al. (2008)
Belo Oriente, MG	N	Mata	Argiloso	4,93	1,78	46,28	52,99	9	3	87	Lima et al. (2008)
Virginópolis, MG	FP	Eucalipto	Muito argiloso	6,36	0,68	60,36	67,40	9	1	90	Lima et al. (2008)
Virginópolis, MG	P	Extensiva degradada	Muito argiloso	3,73	0,49	48,95	53,17	7	1	92	Lima et al. (2008)
Virginópolis, MG	N	Mata	Muito argiloso	7,08	1,34	73,84	82,26	9	2	90	Lima et al. (2008)

L – lavoura; N - nativo; FP – floresta plantada; P – pastagem; PC AM – preparo convencional aveia-milho; P – Argissolo; LV – Latossolo vermelho; LVA – Latossolo vermelho amarelo.

Conceição (2006), estudando diferentes usos da terra (plantio direto sobre Argissolo e pastagens em Latossolo), no Rio Grande do Sul, encontrou que na área de plantio direto, considerando a camada arável (0-20 cm), a variação da FLL caiu para 7%, enquanto a FLO foi responsável por 16% do acúmulo da MOS. As maiores diferenças no acúmulo de C ocorreram, no entanto, na FP. No mesmo estudo, considerando dois diferentes sistemas de preparo de solo, em Latossolo Vermelho (LV) muito argiloso sob rotação trigo-soja-nabo-milho, a concentração de C na FLL da MOS foi similar entre os sistemas de preparo para todas as camadas, sendo que as maiores concentrações ocorreram na superfície (0-5 cm), coerente com a taxa de deposição de resíduos na superfície no solo sob plantio direto (PD). Nesta camada, a concentração de C na FLO foi maior no sistema PD do que no plantio convencional (PC). O estudo demonstrou que o PD acumulou mais C do que no sistema PC e que este acúmulo foi mais importante na fração FLO da camada mais superficial.

Tomazi (2008) estudou, também, lavouras sob diferentes sistemas de preparo (plantio direto, cultivo mínimo e cultivo convencional, usando área de Cerrado como referência) em três Latossolos brasileiros e concluiu que o sistema PC promoveu reduções significativas do C no solo e nas frações leve e pesada, com redução principalmente na labilidade do C. Entretanto, a conversão para PD acumulou C nos três solos em relação ao PC, na mesma taxa anual. Neste estudo, nem sempre a mesma fração mostrou a mesma relevância na variação do estoque de carbono, de 0-20 cm. Por exemplo, no LV (Mato Grosso do Sul) a FP teve a maior contribuição para o aumento do C do solo (90%), enquanto que nos Latossolos Vermelho-Amarelo (LVA), de Goiás e do Maranhão, a FL foi mais importante (78%). Desta forma, o PD proporcionou melhor qualidade do solo quando comparado ao PC. O estudo mostrou que os mecanismos dominantes de perdas ou acúmulo de C podem variar de solo para solo. No LVA (Goiás), por exemplo, apenas as frações leves foram afetadas pelo manejo, enquanto que no LV (Mato Grosso do Sul), a fração pesada foi a que mais influenciou na variação de C. Neste estudo, os dois solos comportaram-se diferentemente, tanto na resistência às perdas de MOS nas frações, como na dinâmica de acúmulo de C nestas frações.

Em sistemas florestais, o estudo de Lima et al. (2008) sobre o fracionamento da MOS em plantios de eucalipto, em áreas previamente ocupadas com pastagens degradadas, demonstrou que houve aumento no estoque de C na FLL, que se mostrou um bom indicador das mudanças na MOS pela mudança de uso da terra, no solo mais fértil. O aumento da fração FLL

ocorreu principalmente nas camadas superficiais (0-5 cm) nos solos sob eucalipto e reflete a maior deposição de resíduos na superfície do solo, em relação à pastagem. Essa recuperação da FLL nas camadas superficiais é importante, pois, embora seu estoque seja menor do que outras frações mais estáveis da MOS, essa fração tem ciclagem rápida e pode favorecer a biota do solo e assim, influenciar outras frações. O estudo mostra, também, que o maior acúmulo de C nos solos sob menor temperatura média anual pode ser explicado pela menor taxa de degradação da FLL, com relação aos solos sob clima mais quente.

Mais recentemente, Santos et al. (2013) estudaram a camada mais superficial (0-7,5 cm) de um Argissolo Vermelho Eutrófico arênico, submetido a diferentes sistemas de uso (florestamento homogêneo de *Eucalyptus grandis*, sistema agrossilvipastoril e campo nativo). O estudo apontou maiores estoques de COT nas FLL e FLO em solos sob eucalipto do que nos demais. O estudo mostra que em solos arenosos ou franco-arenosos, o mecanismo de proteção por oclusão em agregados é menos importante e a proteção via associação com as partículas minerais passa a ser mais significativa, o que está refletido no maior teor de C na humina destes solos.

A utilização do fracionamento da matéria orgânica como indicador ecológico e de propriedades do solo, associado a outros indicadores, é apropriada para o monitoramento de mudanças nas práticas de uso da terra. Permite avaliar a complexidade dos ecossistemas identificando especificidades que o monitoramento de carbono orgânico total, utilizado isoladamente como indicador, muitas vezes não permite.

6. Considerações finais

A qualidade do solo é um fator fundamental na produtividade agrícola ou florestal e no provimento de vários serviços ambientais do solo. Alguns indicadores de qualidade do solo estão estreitamente relacionados a esses serviços, tais como a agregação e estabilidade de agregados do solo, bases para uma boa estrutura do solo. No entanto, dada a complexidade dos atributos e mecanismos envolvidos nos serviços prestados pelo solo, não é simples estabelecer e dimensionar essa relação. O fracionamento densimétrico da matéria orgânica do solo tem importante potencial, fornecendo indicadores úteis em estudos sobre as alterações do carbono do solo provocadas por manejo ou mudança de uso da terra. Seu uso por gestores públicos e privados nos

programas de pagamentos por serviços ambientais deve estar associado a outros indicadores do solo, tais como o carbono orgânico total ou o carbono total, uma vez que o fracionamento densimétrico é sensível não somente às mudanças de uso da terra, mas, também, às características do sítio, incluindo a textura do solo, posição topográfica, material de origem, clima e suas interações com o manejo do solo.

Agradecimentos

Agradecemos as seguintes fontes pelo suporte e financiamento: Termo de Cooperação Técnica Embrapa-lapar no. 21500.10/0008-2 e projeto Embrapa-MP2 no. 02.11.01.031.00.01.

Referências

BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 47, p. 151–163, June 1996.

CONCEIÇÃO, P. C. **Agregação e proteção física da matéria orgânica em dois solos do sul do Brasil**. 155 f. 2006. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; DIECKOW, J.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio no estudo da proteção física da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 32, n. 1, p. 541–549, 2008.

DUNGAIT, J. A. J.; HOPKINS, D. W.; GREGORY, A. S.; WHITMORE, A. P. Soil organic matter turnover is governed by accessibility not recalcitrance. **Global Change Biology**, Oxford, v. 18, n. 6, p. 1781–1796, 2012.

HARMAND, J.-M.; ÁVILA, H.; DAMBRINE, E.; SKIBA, U.; DE MIGUEL, S.; RENDEROS DURAN, R. V.; OLIVER, R.; JIMENEZ, F.; BEER, J. Nitrogen dynamics and soil nitrate retention in a *Coffea arabica*—*Eucalyptus deglupta* agroforestry system in Southern Costa Rica. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 85, n. 2, p. 125–139, 2007.

HAYES, M. H. B.; SWIFT, R. S. The chemistry of soil organic colloids. In: GREENLAND, D. J.; HAYES, M. H. B. (Ed.). **The chemistry of soil constituents**. Chichester: Wiley, 1978. p. 179–320.

JANETOS, A. C.; KASPERSON, R. Synthesis: condition and trends in systems and services, trade-offs for human well-being, and implications for the future. In: HASSAN, R. M.; SCHOLE, R. J.; ASH, N. (Ed.). **Ecosystems and human well-being: current state and trends: volume 1**. Washington, DC: Island Press, 2005. p. 827–834.

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 American Journal**, Madison, v. 61, p. 4–10, 1997.

KLEBER, M.; NICO, P. S.; PLANTE, A.; FILLEY, T.; KRAMER, M.; SWANSTON, C.; SOLLINS, P. Old and stable soil organic matter is not necessarily chemically recalcitrant: implications for modeling concepts and temperature sensitivity. **Global Change Biology**, Oxford, v. 17, p. 1097–1107, 2011.

LAL, R. Tillage effects on soil degradation, soil resilience, soil quality, and sustainability. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 27, p. 108, 1993.

LEIFELD, J.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil organic matter fractions as early indicators for carbon stock changes under different land-use? **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 1-2, p. 143–155, 2005.

LIMA, N. A. M.; SILVA, I. R.; NEVES, J. C. L.; NOVAIS, R. F. de; BARROS, N. F. de; MENDONÇA, E. de S.; DEMOLINARI, M. de S. M.; LEITE, F. P. Frações da matéria orgânica do solo após três décadas de cultivo de Eucalipto no Vale do Rio Doce-MG. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, p. 1053–1063, 2008.

LÜTZOW, M. VON; KÖGEL-KNABNER, I.; EKSCHMITT, K.; FLESSA, H.; GUGGENBERGER, G.; MATZNER, E.; MARSCHNER, B. SOM fractionation methods: relevance to functional pools and to stabilization mechanisms. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 39, n. 9, p. 2183–2207, 2007.

MAIA, C. M. B. de F.; NOVOTNY, E. H.; RITTL, T. F.; HAYES, M. H. B. Soil Organic Matter: Chemical and Physical Characteristics and Analytical Methods. A Review. **Current Organic Chemistry**, Hilversum, v. 17, p. 2985–2990, 2013.



- MARTINEZ-SALGADO, M. M.; GUTIERREZ-ROMERO, V.; JANNSENS, M.; ORTEGA-BLU, R. Biological soil quality indicators: a review. In: MENDEZ-VILAS, A. (Ed.). **Current research, technology and education topics in applied microbiology and microbial biotechnology**. [Badajoz]: Formatec Research Center, 2010. p. 319–328. (Microbiology book series, 2).
- MOÇO, M. K. S.; GAMA-RODRIGUES, E. F.; GAMA-RODRIGUES, A. C.; MACHADO, R. C. R.; BALIGAR, V. C. Soil and litter fauna of cacao agroforestry systems in Bahia, Brazil. **Agroforestry Systems**, Dordrecht, v. 76, n. 1, p. 127–138, 2009.
- PEGORARO, R. F.; SILVA, I. R. da; NOVAIS, R. F. de; BARROS, N. F. de; FONSECA, S. Fenóis derivados da lignina, carboidratos e aminoácidos em serapilheira e solos cultivados com Eucalipto e pastagem. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 2, p. 359–370, 2011.
- PILLAR, V. D.; TORNQUIST, C. G.; BAYER, C. The southern Brazilian grassland biome: soil carbon stocks, fluxes of greenhouse gases and some options for mitigation. **Brazilian Journal of Biology**, São Carlos, v. 72, n. 3, Suppl, p. 673–681, 2012.
- REEVES, D. W. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 43, n. 1-2, p. 131–167, 1997.
- ROMANYÀ, J.; SERRASOLSES, I.; VALLEJO, R. V. Indicators for soil quality: defining a framework to measure soil quality. In: CANALS, L. M.; BASSON, L.; CLIFT, R.; MÜLLER-WENK, R.; BAUER, C.; HANSEN, Y.; BRANDÃO, M. (Ed.). Expert workshop on definition of best indicators for biodiversity and soil quality for Life Cycle Assessment (LCA). **Proceedings...** Guildford: Centre for Environmental Strategy, University of Surrey, 2006. p. 12-16.
- ROSCOE, R.; MACHADO, P. L. O. de A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2002. 86 p. Disponível em: <<http://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/38820/1/LV20023.pdf>>.
- SANTOS, D. C. dos; FARIAS, M. D. O.; LIMA, C. L. R. de; KUNDE, R. J.; PILLON, C. N.; FLORES, C. A. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um argissolo vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Ciência Rural**, Santa Maria, RS, v. 43, n. 5, p. 838–844, 2013.
- SCHMIDT, M. W. I.; TORN, M. S.; ABIVEN, S.; DITTMAR, T.; GUGGENBERGER, G.; JANSSENS, I. A.; KLEBER, M.; KÖGEL-KNABNER, I.; LEHMANN, J.; MANNING, D. A.; NANNIPIERI, P.; RASSE, D. P.; WEINER, S.; TRUMBORE, S. E. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. **Nature**, v. 478, n. 7367, p. 49–56, 2011.
- SHUKLA, M. K.; LAL, R.; EBINGER, M. Determining soil quality indicators by factor analysis. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 87, n. 2, p. 194–204, 2006.
- SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S. M.; SA, J. C. de M.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effects of no-tillage. **Agronomie**, Paris, v. 22, p. 755–775, 2002.
- SOMBROEK, W. G.; NACHTERGALE, F. O.; HEBEL, A. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils. **Ambio**, Stockholm, v. 27, n. 2, p. 417–426, 1993.
- STOCKMANN, U.; ADAMS, M. A.; CRAWFORD, J. W.; FIELD, D. J.; HENAKAARCHCHIA, N.; JENKINS, M.; MINASNYA, B.; MCBRATNEY, A. B.; COURCELLESA, V. de R. de; SINGH, K.; WHEELER, I.; ABBOTT, L.; ANGERS, D. A.; BALDOCK, J.; BIRD, M.; BOOKES, P. C.; CHENU, C.; JASTROW, J. D.; LAL, R.; LEHMANN, J.; O'DONNELL, A. G.; PARTON, W. J.; WHITEHEAD, D.; ZIMMERMANN, M. The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 164, p. 80–99, 2013.
- TOMAZI, M. **Estabilidade da matéria orgânica em Latossolos do Cerrado sob sistemas de uso e manejo**. 2008. 120 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.
- VEZZANI, F. M.; MIELNICZUK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 33, n. 4, p. 743–755, 2009.
- WANDER, M. Soil organic matter fractions and the relevance to soil function. In: MAGDOFF, F.; WEIL, R. R. (Ed.). **Advances in agroecology**. Boca Raton: CRC Lewis Publishers, 2004. p. 67–102.