

Dinâmica da Matéria Orgânica em solos de Cerrado

Renato Roscoe
Embrapa Agropecuária Oeste
roscoe@cpao.embrapa.br

1. Introdução:

O bioma Cerrado representa uma área de aproximadamente 2 milhões de km², constituindo o segundo maior bioma do país, perdendo em extensão territorial somente para a Amazônia. Estende-se de norte a sul e de leste a oeste, conectando-se com todos os demais biomas do país. Devido à grande expansão da agricultura e pecuária, a região é considerada hoje uma das 25 áreas “hotspots” da biodiversidade no mundo, onde elevada taxa de perda do ambiente natural põe em risco a grande diversidade biológica.

Os solos do Cerrado são, em sua maioria, altamente intemperizados, dominados por argilas de baixa atividade (caulinita e oxi-hidróxidos de Fe e Al), com baixa disponibilidade de nutrientes e elevada acidez. Mesmo com atributos químicos desfavoráveis, devido às suas propriedades físicas e topografia favoráveis, além do desenvolvimento de tecnologias de correção da acidez e adubação, esses solos vêm sendo utilizados intensamente para a produção de grãos e fibras, pastagens cultivadas e reflorestamento com espécies exóticas (pinus e eucaliptus). Em muitos casos, o uso intensivo do solo pode gerar um rápido processo de degradação, com perda de matéria orgânica, desbalanço nos processos biológicos e no fluxo de nutrientes, além da deterioração das propriedades físicas.

O respeito às áreas de preservação permanente, reservas legais e corredores de biodiversidade são importantes estratégias para a manutenção do bioma Cerrado. Entretanto, no que tange a necessidade de produção de alimentos, fibras e energia, a manutenção da qualidade do solo representa um desafio para uma exploração sustentável destes ambientes.

Diante de suas características, principalmente a baixa atividade das argilas predominantes, os solos de Cerrado são amplamente dependentes da matéria orgânica do solo para um funcionamento adequado e sustentável. Os diversos processos químicos, físicos e biológicos no solo são controlados pelos fluxos de energia e matéria que, por sua vez, dependem, basicamente, da dinâmica de entrada e saída de matéria orgânica do solo.

Neste contexto, a busca por sistemas sustentáveis de produção, em solos de Cerrado, passa necessariamente pelo aprimoramento do entendimento da dinâmica da matéria orgânica nestes ambientes. O objetivo deste trabalho foi o de reunir informações básicas para o entendimento do balanço de carbono em ambientes de Cerrado e discutir a importância da dinâmica da matéria orgânica para o adequado funcionamento de seus solos.

2. O sistema solo e a matéria orgânica

O solo pode ser considerado um sistema aberto (Adiscott, 1995; Bayer, 2004), onde o fluxo de matéria e energia é controlado por seus processos internos e, sobretudo, por suas relações com o ambiente externo (Figura 1). O solo em si vem de um longo processo, onde suas características atuais são a resultante da interação dos seus fatores de formação: material de origem, clima, topografia, organismos e tempo (Rezende et al.,

1997). A **fração mineral** do solo vem do material de origem, sendo constituída por partículas de tamanho variado (areia, silte e argila), contendo uma combinação de minerais primários e secundários. Geralmente, com o avanço do intemperismo, minerais primários tendem a dar lugar aos secundários. Em solos tropicais, como os de Cerrado, a fração argila é dominada por minerais secundários de baixa atividade, como argilas silicatadas do grupo das caulinitas e óxidos e hidróxidos de Fe e Al. A fração areia, por sua vez, é dominada por minerais primários resistentes ao intemperismo, como o quartzo, e por concreções ferruginosas (em solos muito ricos em Fe). A fração silte tem uma composição intermediária. A **matéria orgânica do solo** (MOS) é composta por todo o carbono orgânico presente no solo, sendo considerados três importantes reservatórios: a **MOS transitória**, composta, sobretudo, por resíduos de plantas e organismos do solo de fácil decomposição e materiais orgânicos produzidos pela microbiota e raízes (ácidos de baixo peso molecular e polissacarídeos); a **MOS humificada**, composta por materiais recalcitrantes, os quais passaram por um processo intenso de transformação, como ácidos húmicos e fúlvicos, além de matérias carbonizadas; e a **biomassa**, formada pela meso e macrofauna, além da microbiota do solo.

O sistema solo interage com outros sistemas externos, como as plantas e o clima (atmosfera e energia solar) (Figura 1). O **sol** fornece a energia luminosa e a **atmosfera** a matéria na forma de CO₂ e água (proveniente das chuvas, mas que deve ser armazenada no solo para o seu aproveitamento pelas plantas), sendo as **plantas** responsáveis em transformá-los em energia química e compostos orgânicos, através da **fotossíntese**. Embora o solo possa absorver diretamente energia solar, que vem a ser extremamente importante para regulação da temperatura e o processo de evaporação, a principal fonte de energia e matéria para a biota do sistema solo vem da deposição de resíduos de plantas e animais e de exsudatos radiculares. Esses resíduos vão sendo gradativamente transformados em MOS, ocorrendo, neste ponto, a interação com a fração mineral no **processo de agregação do solo**. Este processo inicia-se com a interação da fração mineral com MOS humificada, formando complexos organo minerais. Posteriormente, com a inclusão de mais MOS humificada e parte de MOS transitória, há a formação de microagregados. Esses, por sua vez, são unidos, principalmente, pela energia mecânica proveniente da ação de organismos da macrofauna (formação de túneis, retrabalho em mandíbulas e trato intestinal), e do crescimento de raízes e hifas fúngicas, sendo estabilizados por MOS transitória (principalmente polissacarídeos). Como resultado há um incremento no **grau de ordenação do solo**, com redução da entropia e aumento no armazenamento de energia (entalpia), dando condições para o surgimento de propriedades emergentes do sistema, como melhor infiltração e armazenamento de água, maior aeração, menor resistência ao crescimento de raízes, melhores condições para o desenvolvimento da biota do solo e das próprias plantas (Bayer, 2004). Como pode ser visto, o processo de ordenação do solo depende diretamente da atividade biológica, a qual é a responsável pelo fluxo de energia e matéria no sistema. A atividade da biota do solo, por sua vez, depende do fluxo de entrada de energia e matéria, vindo, sobretudo, dos resíduos vegetais.

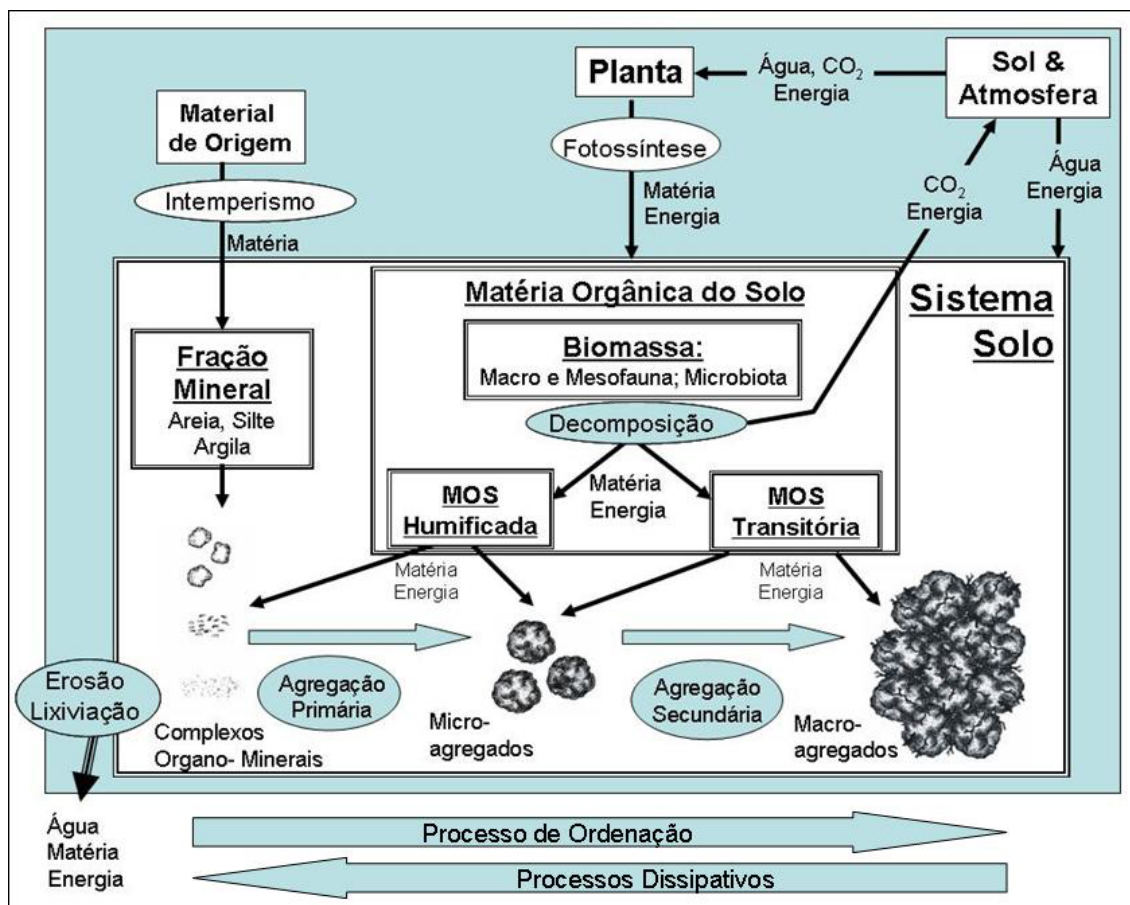


Figura 1. Representação esquemática do processo de ordenação do solo, destacando os principais sub-processos e fluxos de energia e matéria

Antagonicamente, **processos dissipativos** ocorrem no solo quando há uma redução no fluxo de energia e matéria no sistema, principalmente quando combinado a processos que favoreçam a ruptura de agregados e o aumento na taxa de oxidação da MOS (Figura 1). Estes processos levam a uma redução na energia armazenada no sistema (entalpia) e aumento da desorganização do solo, culminando em compactação, baixa resistência à erosão, menor infiltração e retenção de água, e, consequentemente, menor produtividade do sistema vegetal.

A importância da MOS fica evidenciada quando se busca uma visão mais integrada do sistema solo, principalmente em ambientes tropicais. A MOS é a responsável por regular a atividade biológica e, com isso, a expressão de propriedades importantes para o funcionamento adequado do sistema solo. Entender a dinâmica da MOS nesses sistemas possibilita gerar alternativas de manejo mais apropriadas para a exploração do Cerrado.

3. O bioma Cerrado: Clima, solos e vegetação

O clima da região é caracterizado por duas estações claras, com uma primavera-verão úmida (estação chuvosa) e um outono-inverno seco (estação seca) (Adámoli et al., 1985). A precipitação anual varia entre 600 e 2.200 mm, mas em 65% da área as precipitações variam entre 1.200 e 1.600 mm, anualmente. A estação seca dura entre 4 e 7 meses em 88% da área, mas concentra-se entre 5 a 6 meses para 67% da área. A temperatura média anual varia entre 22°C no sul e 27°C no norte.

Os tipos de solo variam bastante no Bioma Cerrado. Os solos mais expressivos, no entanto, são os Latossolos (46% do total), Neossolos Quatzarênicos (15%) e Argissolos (15%) (Reatto et al., 1998). Estes solos apresentam características diferentes e podem interferir no tipo de vegetação presente. Entretanto, não existe uma relação direta, de forma geral, entre o tipo de solo e vegetação. Em geral os solos são bastante intemperizados, apresentando baixo teor de nutrientes e elevada acidez, sendo dominados por argilas de baixa atividade (caulinitas e óxi-hidróxidos de Fe e Al).

O bioma Cerrado é composto por um mosaico de diferentes tipos de vegetação, variando em composição e estrutura (Tabela 1). Três tipos de formações básicas o compõem: florestas, savanas e campos (Ribeiro & Walter, 1998). As formações predominantes são as savânicas. A ocorrência dos grupos e sub-grupos fisionômicos é uma resultante das condições edafoclimáticas, sobretudo as que controlam a disponibilidade de água e nutrientes, assim como as que determinam a profundidade efetivas destes solos.

Tabela 1. Grupos e sub-grupos fisionômicos da vegetação encontrada no bioma Cerrado (adaptado de Ribeiro & Walter, 1998).

Grupos	Sub-grupos	Altura do extrato arbóreo/ arbustivo (m)	Densidade do dossel (% área total)
Florestas	Mata Ciliar	20-25	50-90
	Mata de Galeria (mata ciliar formando galeria)	20-30	70-95
	Mata seca	15-25	50-95
	Cerradão	8-15	50-95
Savanas	Cerrado <i>sensu stricto</i> – denso	5-8	50-70
	Cerrado <i>sensu stricto</i> – típico	3-6	20-50
	Cerrado <i>sensu stricto</i> – ralo	2-3	5-20
	Cerrado <i>sensu stricto</i> – rupestre	2-4	5-20
	Parque de cerrado (áreas de murunduns)	3-6	5-20
	Palmeiral	8-15	30-60
	Vereda	12-15	5-10
Campos	Campo sujo	2	< 5
	Campo rupestre	< 2	< 5
	Campo limpo	< 2	< 1

4. Estoques de carbono no Cerrado

As estimativas para o estoque de carbono em savanas tropicais, segundo dados do Painel Intergovernamental em Mudanças Climáticas (Watson et al., 2000), seriam em média de 29 t ha⁻¹ de C na vegetação. Estudos realizados em áreas de Cerrado têm demonstrado uma grande variação nos estoques de carbono na parte aérea e subterrânea (Aduan, 2003). Os valores variam de algo em torno de 5 t ha⁻¹ de C para as fitofisionomias mais abertas como os campos limpos e campos sujos (Castro & Kauffmann, 1998; Ottmar et al., 2001), a valores por volta de 25 t ha⁻¹ de C em cerrado *strictu sensu* denso (Abdalla et al., 1998; Castro & Kauffmann, 1998; Ottmar et al., 2001). Na parte subterrânea, Castro & Kauffmann (1998) publicaram valores para os primeiros dois metros de profundidade de 16 t ha⁻¹ de C (campo limpo), 30 t ha⁻¹ de C (campo sujo), 47 t ha⁻¹ de C (cerrado *strictu sensu* típico) e 53 t ha⁻¹ de C (cerrado *strictu sensu* denso). Abdalla et al. (1998), para um cerrado *strictu sensu* típico, obtiveram 33 t ha⁻¹ de C até uma profundidade de 6,2 m, sendo que 27 t ha⁻¹ de C

encontravam-se no primeiro metro de profundidade. Nos estudos relatados, observa-se uma clara tendência de aumento da biomassa de parte aérea e de raízes com a densidade da fitofisionomia. Observa-se, ainda, que há uma tendência de maiores estoques de carbono no sistema radicular, quando comparado à parte aérea. Esta característica é ainda mais pronunciada em vegetações mais abertas e ricas em gramíneas.

A serrapilheira, camada de resíduos sobre o solo, também, depende do tipo de vegetação. Ottmar et al. (2001) obtiveram valores médios de $0,2 \text{ t ha}^{-1}$ de C (campo limpo), $0,5 \text{ t ha}^{-1}$ de C (campo sujo), $2,0 \text{ t ha}^{-1}$ de C (cerrado *stricto sensu* típico) e $1,6 \text{ t ha}^{-1}$ de C (cerrado *stricto sensu* denso). Roscoe et al. (2000b), para um cerrado *stricto sensu* denso em transição para cerradão, obtiveram valores de $3,7 \text{ t ha}^{-1}$ de C.

As quantidades de carbono orgânico no solo, por sua vez, não seguem completamente as variações da fitomassa das diferentes vegetações do cerrado. Os valores observados para as diferentes fitofisionomias variam entre 143 e 209 t ha^{-1} de C, mas com uma tendência de maiores valores para as vegetações menos densas, mais ricas em gramíneas (Tabela 2). Os estoques médios, considerando os dados disponíveis para cerrados *stricto sensu* e para campos limpos e sujos, mostram que há uma tendência de valores bem próximos de carbono total entre os sistemas (Figura 2). Isso sugere que as vegetações mais abertas, embora tenham um menor fitomassa aérea e subterrânea, apresentam, provavelmente, um fluxo de carbono no solo superior às vegetações mais densas, o que explicaria os maiores acúmulos de MOS. Evidentemente, estas são somente indicações, visto que os dados disponíveis apresentam limitações quanto à representatividade.

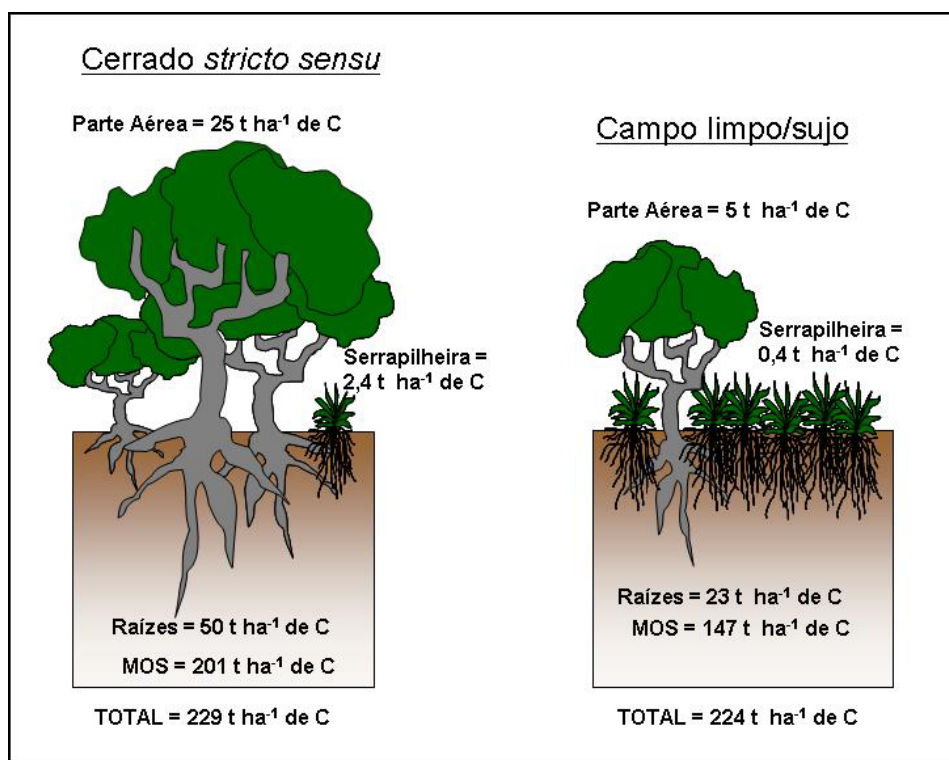


Figura 2. Estoques médios de carbono nos principais reservatórios de cerrados *stricto sensu* e campos limpos e sujos (valores obtidos a partir de médias dos diferentes reservatórios encontradas em Abdalla et al., 1998; Castro & Kauffmann, 1998; Roscoe et al., 2000b; Ottmar et al., 2001).

Os estoques de carbono, quando são considerados os diversos tipos de vegetação, de forma integrada, estão diretamente relacionados com a textura do solo,

havendo uma clara tendência de aumento com a elevação dos teores de argila (Tabela 3). Esta tendência está relacionada com a proteção física e química que a fração argila exerce sobre a MOS (Feller & Beare, 1997; Christensen, 2000; Roscoe & Machado, 2002).

Tabela 2. Estoques de carbono em solos sob diferentes fitofisionomias de Cerrado e sobre diferentes tipos de solo, variando em textura.

Tipo de vegetação de Cerrado	Tipo de solo ^a	Argila (g kg ⁻¹)	C orgânico (t ha ⁻¹) ^b	Referência
Cerradão	LE	707	143	Brossard et al. (1997)
Cerrado <i>stricto sensu</i>	LE	707	148	Brossard et al. (1997)
Cerrado <i>stricto sensu</i>	LE	490	154	Corazza et al. (1999)
Cerrado <i>stricto sensu</i>	LE	880	150	Roscoe et al. (2000b)
Cerrado <i>stricto sensu</i>	LE	480	145	Resck et al. (2000)
Cerrado <i>stricto sensu</i>	-	689-808	143	Lardy et al. (2002)
Campo sujo	LV	540	190	Brossard et al. (1997)
Campo sujo	-	568-668	209	Lardy et al. (2002)
Campo limpo	LE	616	208	Brossard et al. (1997)
Campo limpo	-	436-589	198	Lardy et al. (2002)
Todas	LV	< 150	75	Tognon et al. (1998)
Todas	LV	150-250	128	“
Todas	LV	250-350	172	“
Todas	LV	350-600	188	“
Todas	LV	> 600	188	“
Todas	LE	< 150	87	“
Todas	LE	150-250	109	“
Todas	LE	250-350	172	“
Todas	LE	350-600	180	“
Todas	LE	> 600	182	“

^a LE – Latossolo Vermelho; LV – Latossolo Vermelho Amarelo;

^b estoques até a profundidade de um metro. Roscoe et al. (2000b) utilizaram combustão a seco na determinação de carbono. Tognon et al. (1998) utilizou oxidação em via úmida (Embrapa, 1979) e seus dados foram corrigidos aplicando-se um fator de 1,5, conforme sugerido pelo Anexo F, em Embrapa (1999). Brossard et al. (1997), Corazza et al. (1999) e Lardy et al. (2002) utilizaram oxidação em via úmida (Nelson & Sommers, 1982), e tiveram os dados corrigidos pelo fator de correção 1,15, conforme proposto por Brossard et al. (1997).

5. Processos que controlam a dinâmica da MOS nos Cerrados

Tanto em ambientes naturais, quanto nos alterados pelo homem, os principais fatores que afetam a dinâmica da matéria orgânica do solo são aqueles que controlam a sua produção (entrada) e perda (saída). Como fatores que controlam a entrada de matéria e energia no sistema solo estão aqueles relacionados à produção primária dos ecossistemas, enquanto as saídas são controladas pelos processos de lixiviação, erosão e decomposição. Todos estes processos são influenciados pela disponibilidade de água, nutrientes, ocorrência de fogo e práticas de manejo do ambiente.

5.1. Aporte de carbono para o sistema: Produção primária da vegetação

Os dados sobre fluxo de carbono no Cerrado são ainda escassos. As produções primárias líquidas (PPL) das diferentes fitofisionomias são ainda pouco conhecidas e não foram ainda propriamente acessadas (Boddey et al., 2001). Conforme levantado por estes autores, os métodos de determinação de PPL utilizados pelo *International*

Biological Program (IBP) apresentam grandes limitações quando aplicados a vegetações que apresentam crescimento contínuo ao longo do ano. As savanas enquadram-se neste tipo de vegetação, embora em muitos casos haja uma drástica redução da PPL durante a estação seca. Portanto, foram buscados valores na literatura para PPL de savanas onde foram utilizadas metodologias de medições contínuas da alteração da biomassa ao longo do ano. Valores médios para savanas a nível global variam entre 2,8 e 8,7 t ha⁻¹ano⁻¹ de C, com média em 6,4 t ha⁻¹ano⁻¹ de C (Scholes & Hall, 1996). Valores similares, média de 6,3 t ha⁻¹ano⁻¹ de C (considerando 45% de C na matéria seca), são reportados por Mistry (2001). Grace (2001) aponta para valores ligeiramente menores, em média 4,5 t ha⁻¹ano⁻¹ de C. Estes valores, no entanto, são significativamente superiores aos sistematizados por Boddey et al. (2001) para formações de cerrado, estimados a partir da metodologia do IBP, que variaram entre 0,54 e 1,67 t ha⁻¹ano⁻¹ de C (considerando 45% de C na matéria seca).

Como sugerido anteriormente, os fluxos de carbono nas formações mais abertas são, provavelmente, maiores, visto que sustentam quantidades mais elevadas de carbono no solo, mesmo tendo uma biomassa significativamente menor (Figura 2).

A disponibilidade de água representa, na maioria dos cerrados nativos, o fator climático mais limitante à produção primária da vegetação, visto que a luminosidade é intensa e não há grandes variações de temperatura (Adámoli et al., 1985). Existe uma relação direta entre o período de estresse hídrico a que a vegetação está exposta durante o ano e a produção primária líquida, conforme demonstrado por Scholes & Hall (1996), para as diversas formações savânicas do mundo (Figura 3). A disponibilidade de água depende não somente do clima, mas também de propriedades do solo, como taxa de infiltração e capacidade de armazenamento de água. Estas propriedades, por sua vez, são expressas em intensidades diferentes, em função das características do solo (textura, mineralogia, teor de MOS) e dos processos de ordenação biológica dos mesmos (Figura 1). Sistemas onde o fluxo de carbono é mais intenso, tendem a ter uma atividade biológica maior e, conseqüentemente, um processo de ordenação biológica que favorece a estruturação do solo e armazenamento de água no ambiente.

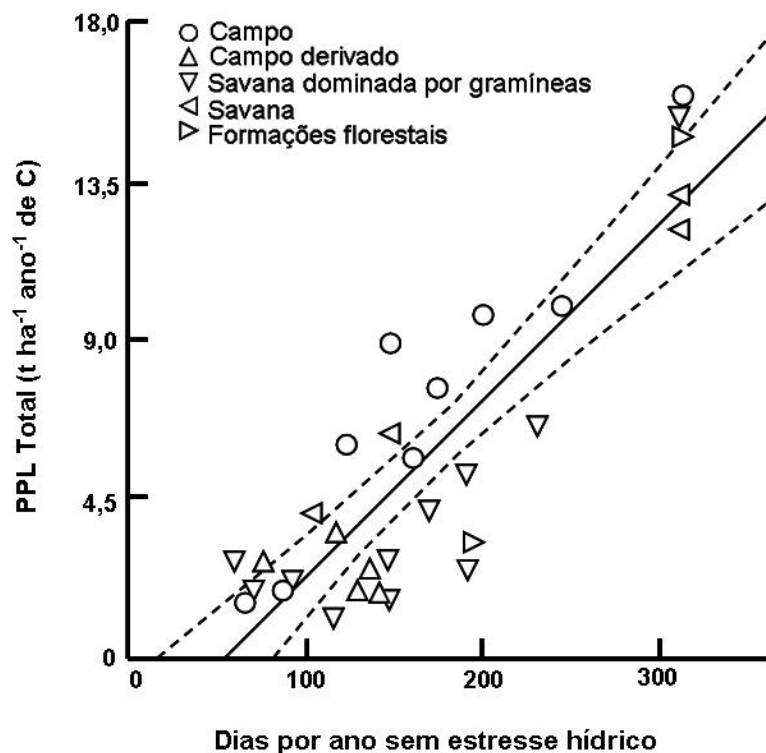


Figura 3. Produção primária líquida (PPL) total de vegetações savânicas, em função do número de dias por ano sem estresse hídrico (DSEH). A linha cheia representa a reta ajustada aos dados e as linhas pontilhadas os limites do intervalo de confiança, com 95% de probabilidade. $PPL = 11 DSEH - 539$ ($n = 37$; $F = 108,6$; $p < 0,001$; $r^2 = 0,75$) (adaptado de Scholes e Hall, 1996).

Outros fatores edáficos importantes para produção primária da vegetação são aqueles relacionados com as propriedades químicas do sistema solo. A disponibilidade de nutrientes e a acidez do solo são fundamentais para a produção primária dos ecossistemas naturais e manejados. Em zonas climáticas semelhantes, existe uma tendência de vegetações mais exuberantes (cerradão) em solos com maior disponibilidade de nutrientes e água (Ribeiro & Walter, 1998). Em ambientes manejados (pastagens e lavouras), a dependência da produção de matéria seca das culturas às condições químicas do solo são bem conhecidas.

A periodicidade e a intensidade da ocorrência de incêndios é outro fator importante no controle da produção primária da vegetação de Cerrado (Mistry, 1998). A susceptibilidade à queima está associada ao conteúdo de umidade dos extratos de material combustível presente nas vegetações, por esse motivo, as vegetações mais abertas estão muito mais sujeitas ao fogo do que as formações mais fechadas (Kauffman et al., 1994). Embora a ignição possa ocorrer espontaneamente, acredita-se que a grande maioria dos incêndios aconteçam por ação antrópica, desde os primórdios da ocupação humana há mais de 10 mil anos (Mistry, 1998). O fogo afeta a mineralização da matéria orgânica no sistema, havendo perda de energia, carbono, nitrogênio e enxofre para a atmosfera, mas acumulando fósforo, potássio, cálcio e magnésio nos primeiros cinco centímetros de profundidade (Coutinho, 1982). Este acúmulo favorece o desenvolvimento rápido do extrato de gramíneas, em detrimento das árvores e arbustos, sendo utilizado como uma forma de “fertilização” de pastagens nativas. Entretanto, os efeitos em longo prazo destas práticas podem causar degradação do solo (Mistry, 1998),

principalmente se combinados a práticas de superpastejo. O aumento na frequência das queimadas pode gerar a alteração da fisionomia da vegetação, diminuindo significativamente o extrato arbóreo/arbustivo, conforme observado para um cerrado *stricto sensu* por Roscoe et al. (2000b). Por outro lado, a proteção contra o fogo tende a aumentar a densidade da vegetação, elevando o número de indivíduos no extrato arbóreo/arbustivo (Mistry, 1998).

Nos sistemas manejados, o aporte de carbono para o solo varia bastante em função das práticas de manejo adotadas. Assim como para a vegetação nativa, são ainda escassos os dados sobre PPL de sistemas agrícolas e pastagens, principalmente no que se refere à biomassa subterrânea. O carbono aportado ao solo pela parte aérea das culturas de verão mais plantadas no Cerrado (soja, milho e algodão) varia entre 2,3 e 3,3 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C (Tabela 3). Considerando um aporte de carbono pelas raízes igual ao da parte aérea, estes valores chegariam a cerca de 5 a 7 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C. Considerando a possibilidade de uma segunda safra no outono/inverno (safrinha) de culturas como milho, trigo e aveia, poderiam ser aportados mais 1 a 3 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C pela parte aérea (Tabela 3), ou 2 a 6 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C, considerando a mesma proporção da contribuição de raízes. A sucessão de culturas soja/milho safrinha, bastante utilizada nos cerrados de Mato Grosso do Sul, poderia gerar cerca de 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C para o sistema.

Tabela 3. Produção total de carbono em grãos e fibras e na parte aérea remanescente das principais culturas produzidas no bioma Cerrado (Fabrício, 2005, dados não publicados; e Lamas, 2005, comunicado pessoal).

Cultura (época de plantio)	Grãos e fibras	Parte aérea	Local	Fonte
	----- (t ha ⁻¹ ano ⁻¹ de C) -----			
Soja (verão)	1,6	2,3	Dourados - MS	Fabrício (2005)
Milho (verão)	3,1	3,3	“	“
Algodão (verão)	1,4	3,2	Média para vários locais em MS e MT	Lamas (2005)
Milho (outono)	2,7	2,8	Dourados - MS	Fabrício (2005)
Trigo (outono)	0,9	1,2	“	“
Aveia preta (outono)	0,5	2,5	“	“

Plantas de cobertura utilizadas em rotações de culturas na região de Cerrado podem gerar aportes de resíduos bastante significativos para os sistemas de produção (Tabela 4). A produção de biomassa destas culturas pode variar em função da espécie, das condições edafoclimáticas de cada local e da época de plantio. Em geral, as gramíneas (como a *Brachiaria spp.*, milheto, sorgo e capim-pé-de-galinha) tendem a produzir mais biomassa do que as leguminosas (como a crotalária, guandu, feijão-bravo-do-ceará e mucunas) e crucíferas (nabo forrageiro) (Tabela 4). Plantios no outono, logo após a retirada da cultura principal, tendem a introduzir maiores quantidades de C para o sistema, do que plantios de primavera. Isso se deve à diferença no período de crescimento, uma vez que, na primavera, o intervalo entre as primeiras chuvas e o plantio da cultura principal de verão é muito curto (30 a 60 dias). No outono, as plantas têm períodos de crescimento maiores (podendo passar de 120 dias), o que cria a possibilidade de uma maior produção de biomassa.

O local é outro fator que influencia sobremaneira a produção de biomassa das plantas de cobertura, em função de diferenças em radiação, temperatura, precipitação e condições edáficas. Nos exemplos da Tabela 4, observa-se uma clara tendência de produções bem mais elevadas nas regiões de Primavera do Leste e Sorriso, ambas em Mato Grosso, quando comparadas a Planaltina, Distrito Federal. Enquanto o milheto,

sorgo, crotalária e guandu produziram entre 3,5 e 4,4 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C na parte aérea nas duas regiões de Mato Grosso, as produções das mesmas espécies foram inferiores a 1 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C, no Distrito Federal. As diferenças nos resultados podem ser explicadas por um melhor índice pluviométrico e distribuição de chuvas nas duas regiões de MT, quando comparadas a Planaltina – DF.

Fazendo um exercício de extrapolação, considerando uma produção de biomassa de raízes igual à de parte aérea, observa-se que o aporte total de C para sistemas que utilizem plantas de cobertura no outono podem variar entre 1 e 2 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C (em áreas com maior déficit hídrico) e entre 7 a 8 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C (em áreas com melhor distribuição de chuvas). Combinando com valores de 5 a 7 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C de culturas comerciais de verão, poder-se-ia obter entre 6 e 15 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C, em sistemas de rotação de culturas no Cerrado. Isso, provavelmente, representaria fluxos de C no sistema superiores aos do ambiente nativo, que em média aporta pouco mais de 6 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C (Scholes & Hall, 1996).

Tabela 4. Produção total de carbono na parte aérea de diferentes plantas de cobertura, em experimentos conduzidos em Primavera do Leste – MT e Sorriso – MT (Lamas & Staut, 2005) e Planaltina – DF (Carvalho, 2005).

Espécie de Cobertura	Outono			Primavera		
	Primavera do Leste – MT ^a	Sorriso – MT ^a	Planaltina – DF ^b	Primavera do Leste – MT ^a	Sorriso – MT ^a	Selvíria - MS ^c
	----- (t ha ⁻¹ ano ⁻¹ de C) -----					
<i>Brachiaria decumbens</i>	4,6	4,9	nd	2,2	1,3	nd
Milheto	3,5	4,4	0,9	2,1	2,8	4,6
Sorgo	4,4	3,9	0,5	2,2	3,2	nd
Capim-pé-de-galinha	5,1	3,7	nd	2,2	1,5	nd
Nabo-forrageiro	2,1	1,8	nd	nd	nd	nd
Crotalária juncea	4,3	3,5	0,8	2,0	1,8	2,9
Guandu	4,4	3,6	0,6	1,9	1,1	1,5
Feijão-bravo-do-ceará	nd ^d	nd	1,3	nd	nd	nd
Mucuna-cinza	nd	nd	1,2	nd	nd	nd
Mucuna-preta	nd	nd	nd	nd	nd	1,9

^a Lamas & Staut (2005); ^b Carvalho (2005); ^c Carvalho et al. (2004); ^d nd = não determinado.

Quando são consideradas as pastagens manejadas, as adições de C ao sistema, via produção de matéria seca, podem ser ainda maiores que as estimadas para possíveis sistemas de rotação de culturas anuais. Aduan (2003), estudando pastagens de *Brachiaria brizantha* de baixa produtividade (0,5 UA ha⁻¹ ano⁻¹), sob pastoreio contínuo e sem adubação de manutenção, obtiveram estimativas de aporte para o solo de 12 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C da parte aérea (Tabela 5). Em um estudo mais completo, Machado et al. (2005, dado não publicados) obtiveram, em pastagem de *Brachiaria brizantha* sob pastoreio contínuo e adubação de manutenção, em experimentos implantados em Latossolo Vermelho distroférrico de Dourados-MS, um aporte de cerca de 10 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C de parte aérea e 7 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C de raízes (profundidade de 0,45 m), totalizando 17 t ha⁻¹ ano⁻¹ de C (Tabela 6). Embora os dados disponíveis sejam limitados em termos de representatividade, observa-se que há um grande potencial de produção de biomassa para as gramíneas em pastagens cultivadas, superando os sistemas de rotação de culturas e o ambiente natural.

Vale ressaltar que as extrapolações feitas no presente trabalho devem ser tomadas com bastante cautela, diante da grande diversidade de condições edafológicas do Cerrado e das inúmeras possibilidades de sistemas de manejo. Entretanto, os dados

disponíveis permitem inferir que práticas comuns que vêm sendo utilizadas no Cerrado, como a combinação de duas safras por ano, além da inclusão de plantas de cobertura no sistema de produção e a integração lavoura-pecuária, podem gerar aportes de resíduos em quantidades bem superiores à vegetação nativa.

Tabela 5. Estimativas de balanço de carbono em pastagem de *Brachiaria brizantha*, sob pastoreio contínuo, derivado de dados de vários estudos em pastagens de Planaltina – DF (adaptado de Aduan, 2003).

Fonte/Dreno de Carbono	Parte aérea	Fezes/Urina	Total
	----- (t de C ha ⁻¹ ano ⁻¹) -----		
<i>Brachiaria brizantha</i>	14,0	-	14,0
Animal	- 3,6	1,6	- 2,0
Saldo Final	10,4	1,6	12,0

Tabela 6. Estimativas de balanço de carbono em pastagem de *Brachiaria brizantha*, sob pastoreio contínuo e adubação de manutenção, em um Latossolo Vermelho distroférico argiloso de Dourados – MS (Machado et al., 2005, dados não publicados).

Fonte/Dreno de Carbono	Folha	Colmos	Raízes ^a	Fezes/Urina	Total
	----- (t de C ha ⁻¹ ano ⁻¹) -----				
<i>Brachiaria brizantha</i>	4,1	7,2	7,2	-	18,5
Animal	- 2,3	- 0,5	-	1,4	- 1,4
Saldo Final	1,8	6,7	7,2	1,4	17,1

^a até a profundidade de 0,45 m.

5.2. Saídas de carbono do sistema: Lixiviação, erosão e decomposição

As saídas de matéria orgânica do sistema estão relacionadas com os processos de lixiviação, erosão e decomposição. As perdas de matéria orgânica por lixiviação são pequenas, não havendo estimativas precisas para diferentes ambientes. As perdas por erosão, em ambientes naturais, são, também, pouco expressivas, mas tendem a aumentar rapidamente em ambientes alterados pelo homem. Segundo dados sistematizados por Hernani et al. (2002b), as perdas médias de solo para o Brasil são de 15 t ha⁻¹ ano⁻¹ em áreas de lavoura e de 0,4 t ha⁻¹ ano⁻¹ em pastagens. Tais valores equivalem, segundo os autores, a perdas de matéria orgânica do solo da ordem de 0,48 t ha⁻¹ ano⁻¹ em lavouras e 0,01 t ha⁻¹ ano⁻¹ em pastagens. Em lavouras, no entanto, o uso do sistema plantio direto pode reduzir as perdas de solo para valores médios de 2,5 t ha⁻¹ ano⁻¹ (Hernani et al., 2002a), o que geraria uma redução nas perdas de matéria orgânica do solo para valores de 0,08 t ha⁻¹ ano⁻¹ de solo.

A principal forma de perda do carbono no sistema solo é via decomposição, onde a biota do solo utiliza a matéria orgânica como fonte de energia e matéria para o seu desenvolvimento (Figura 1).

5.2.1. Fatores que controlam a decomposição

Vários são os fatores que controlam a decomposição de resíduos orgânicos na serrapilheira e no solo. A atividade biológica, a verdadeira responsável por esse processo, depende das características intrínsecas do material orgânico a ser decomposto (composição e complexidade estrutural) e das condições ambientais (temperatura, umidade, aeração, disponibilidade de nutrientes, acidez do solo e interação com a matriz mineral). Tanto as características intrínsecas do material orgânico aportado, quanto várias das condições ambientais, podem ser afetadas pela ação antrópica.

A **composição e complexidade do material a ser decomposto** variam bastante. A MOS é composta por uma gama de compostos, partindo de resíduos recentemente aportados, portanto com composição e estrutura bem próximos aos tecidos vegetais e animais, e chegando a materiais já bastante transformados, compostos por moléculas altamente recalcitrantes, ligadas ou não à matriz mineral (Roscoe & Machado, 2002). De forma geral, os compostos presentes nos resíduos são divididos em metabólicos e estruturais (Parton et al., 1987). Os compostos metabólicos são constituídos por materiais hidrosolúveis e polissacarídeos, os quais são decompostos rapidamente, em questão de dias a poucos meses. Os estruturais são dominados por materiais com taxas de decomposição cada vez menores, como proteínas, lignina, polifenóis (como os taninos) e compostos lipofílicos (principalmente suberina e cutina), sendo decompostos em escala de anos (Parton et al., 1987; Baldock et al., 1992; Schulten & Leinweber, 2000). O balanço entre estas frações será determinante da susceptibilidade do resíduo à decomposição. As variáveis mais utilizadas para avaliar este balanço são as relações entre lignina/N, polifenóis/N e (lignina + polifenóis)/N (Carvalho, 2005). Estudos com serrapilheira de espécies arbóreas de savanas têm demonstrado que a relação lignina/N, amplamente satisfatória para condições temperadas, não se aplica muito bem nestes ambientes (Scholes & Hall, 1996). Compostos secundários, como taninos e outros polifenóis, são produzidos em grandes quantidades por espécies de Cerrado, o que dificulta bastante sua decomposição (Scholes & Hall, 1996).

Estudos de decomposição da serrapilheira de cerrados têm demonstrado que esta apresenta uma taxa de decomposição relativamente lenta, com a meia-vida variando entre 580 a 2850 dias (Tabela 7). O trabalho de Constantino (1988) aponta, no entanto, para uma diferenciação da meia-vida de materiais provenientes do extrato graminoso e do extrato arbóreo/arbustivo em cerrado *stricto sensu*. A serrapilheira proveniente das gramíneas tende a ciclar mais rapidamente, quando comparada à do extrato lenhoso (Tabela 7). Esta diferença em meia-vida corrobora com a hipótese de que nas fitofisionomias mais abertas, o fluxo de carbono no sistema é maior, o que possibilita estoques de C no solo superiores às fitofisionomias mais fechadas (Figura 2). Os tempos de ciclagem de materiais de pastagens e culturas anuais são bem menores, quando comparados aos de cerrado. As evidências sugerem que o material de cerrado tem uma composição que dificulta sua decomposição, principalmente compostos secundários como polifenóis, enquanto o C de pastagens e culturas anuais tende a se decompor mais facilmente.

As **condições ambientais** representam um fator importante no controle da decomposição dos resíduos e da MOS. Temperatura e umidade são afetadas pelas condições climáticas e edáficas. A interferência do clima e os efeitos diretos da temperatura e da umidade na decomposição de resíduos e MOS são bem descritos na literatura (Parton et al., 1987). As interferências indiretas das condições edáficas sobre a decomposição, no que se refere à dinâmica de água, são bem descritas em modelos de simulação da dinâmica da MOS, como no CENTURY (Parton et al., 1997). Entretanto, para as condições de Cerrado, alguns avanços são ainda necessários, principalmente integrando a vasta gama de dados sobre dinâmica de água nos solos destes ambientes aos modelos de simulação. O mesmo pode ser dito para as questões relacionadas à aeração, disponibilidade de nutrientes e acidez do solo. Sabe-se que, em geral, condições anaeróbicas reduzem drasticamente a taxa de decomposição (Parton et al., 1987). Correções da acidez e de deficiências nutricionais tendem a aumentar as taxas de decomposição, tanto por aumentar a decomposibilidade dos resíduos produzidos sob estas condições, quanto por estimular a atividade biológica (Parton et al., 1987).

Tabela 7. Meia vida (h) da serrapilheira de vegetações de cerrado, pastagens, algumas culturas anuais e plantas de cobertura, medidas através da técnica de *litter bags*, com e sem incorporação ao solo.

Vegetação/Espécies Vegetais	Meia Vida (h) ^a		Fonte
	Sem Incorp.	Com Incorp.	
	------(dias)-----		
Cerrado <i>stricto sensu</i> típico	990	-	Aduan (2003)
Cerrado <i>stricto sensu</i> denso	770	-	“
Cerrado <i>stricto sensu</i> típico (gramioso)	580	-	Constantino (1988)
Cerrado <i>stricto sensu</i> típico (arbóreo/arbustivo)	2850	-	“
Pastagem (<i>Brachiaria decumbens</i>)	91	-	Urquiaga et al. (1998)
Girassol	77	69	Carvalho (2005)
Nabo-forrageiro	78	65	“
Feijão-bravo-do-ceará	86	76	“
Crotalaria juncea	97	81	“
Vegetação Espontânea	108	81	“
Milheto	119	91	“
Mucuna-cinza	122	100	“
Guandu	136	107	“

^a Meia vida (h) = $\ln 2/k$, onde k é a constante de decomposição, calculada a partir do ajuste de modelo exponencial $A_1 = A_0 \times e^{kt}$ (onde A_0 é a quantidade inicial de serrapilheira no tempo 0, A_1 é a quantidade de serrapilheira no tempo i e t é o tempo em dias).

Um fator decisivo para a dinâmica da MOS nos ambientes de Cerrado e que ainda merece maior atenção da pesquisa é a **interação da MOS com a matriz mineral** (Roscoe & Machado, 2002). Assim como a MOS tem um papel importante no processo de ordenação do solo (Figura 1), atuando na definição do arranjo e da ligação entre as partículas em agregados, o mesmo processo atua na sua proteção química e física no solo. As ligações químicas entre a MOS e as argilas, formando complexos organo-minerais, dificultam a sua decomposição por microrganismos e enzimas extracelulares, protegendo-a quimicamente (Feller & Beare, 1997; Christensen, 2000). Quando os complexos organo-minerais vão se unindo e formando micro e macroagregados, a MOS pode ficar aprisionada em micro-habitats inacessível a microrganismos e enzimas, sendo protegida fisicamente (Feller & Beare, 1997; Christensen, 2000). Os teores de argila do solo afetam diretamente a proteção química e física da MOS, sendo que esta tende a se acumular em solos mais argilosos (Hassink & Whitmore, 1997; Schulten & Leinweber, 2000; Roscoe & Machado, 2002). O efeito da textura tem sido bem estudado para solos não tropicais, sendo incorporada com sucesso em simuladores da dinâmica da MOS (Falloon & Smith, 2000; Paustian, 2001). Bons resultados têm sido alcançados com simuladores também em ambientes sub-tropicais (Mielniczuk et al., 2003), o que sugere que o efeito da textura esta sendo bem captado nestes ambientes. Entretanto, em solos tropicais, alguns avanços são ainda necessários, pois diferenças marcantes são observadas em solos com textura semelhante, mas mineralogia distinta.

Os solos de Cerrado são amplamente dominados por argilas de baixa atividade (Resende et al., 1997). A caulinita (argila silicatada 1:1) forma a base da **composição mineralógica da fração argila** na maioria destes solos, sendo variáveis os teores de óxidos e hidróxidos de Fe e Al. Alguns solos extremamente intemperizados podem ter a fração argila dominado por gibbsita (hidróxido de Al) ao invés de caulinita, apresentando carga residual positiva em horizontes sub-superficiais (Oliveira et al., 1992). Os teores de óxidos (oxi-hidróxidos de Fe e Al) tendem a afetar os teores e estabilidade da MOS de duas formas: (1) pela formação de complexos organo-minerais primários de alta estabilidade devido à interação eletrostática das cargas positivas dos óxidos e cargas negativas da MOS; e (2) através de mudanças na estrutura. A pHs

naturalmente encontrados nos solos tropicais, os oxi-hidroxidos apresentam altas quantidades de cargas positivas (Oades et al., 1989). Estas cargas interagem com grupos funcionais da MOS (i.e. carboxílicos e fenólicos), os quais apresentam cargas negativas nas mesmas condições de pH. Os complexos formados apresentam alta estabilidade e podem tornar o material orgânico indisponível para a microbiota (Oades et al., 1989). Por outro lado, os teores de óxidos pode influenciar marcadamente a estrutura dos solos tropicais (Resende et al., 1997; Ferreira et al. 1999). Os solos ricos em oxi-hidroxidos de Fe e Al tendem a apresentar uma estrutura tipicamente granular (Oliveira et al., 1992; Resende et al., 1997). Os óxidos seriam os principais responsáveis pela desorganização das partículas de argila em escala microscópica, impedindo a orientação face-a-face dos cristais de caulinita (Resende et al., 1997). Esta desorientação impediria a formação de plasma denso, favorecendo o surgimento da estrutura granular típica, após repetidos ciclos de umedecimento e secagem (Resende et al., 1997). Evidências confirmando tal hipótese foram obtidas por Ferreira et al. (1999) ao demonstrarem que a estrutura de Latossolos da Região Sudeste do Brasil estava intimamente relacionada com mineralogia da fração argila. Enquanto solos com menores teores de óxidos apresentaram estrutura em blocos, os com elevados teores apresentaram estrutura granular. Segundo o modelo de agregação proposto pelos autores, a MOS seria um agente agregante secundário em relação aos óxidos em solos ricos nestes minerais, sendo mais importante para solos com caráter caulínítico. Reciprocamente, esta diferença estrutural teria efeitos diretos na proteção da MOS. As estruturas granulares dos solos ricos em óxidos são extremamente resistentes e dificilmente alteradas pelo cultivo (Resck et al., 2000; Roscoe et al., 2001; Roscoe & Buurman, 2003). Roscoe et al. (2000a) demonstraram que a estrutura granular de um Latossolo Vermelho distrófico apresentava elevada resistência à dispersão ultra-sônica. Para este mesmo solo, os autores demonstraram que somente um a dois por cento do carbono orgânico total está protegido dentro destas estruturas (Roscoe et al., 2001; Roscoe & Buurman, 2003). Em um outro estudo, Roscoe et al. (2004) demonstraram que a composição da MOS oclusa nessas estruturas é dominada por materiais altamente recalcitrantes e com avançado grau de humificação, com uma taxa de decomposição muito lenta. Os autores observaram ainda que 80-90% do carbono total do solo estava presente em complexos organo-minerais primários, sobretudo do tamanho argila ($< 2\mu\text{m}$). Estes resultados sugerem que para solos ricos em óxidos, a MOS esta estabilizada mais por ligações com a fração mineral do que por oclusão dentro das estruturas granulares. Por outro lado, as estruturas dos solos mais pobres em óxidos seriam menos estáveis, desfazendo-se facilmente com o cultivo (Oades & Walters, 1991; Golchin et al., 1997). A MOS presente nestes agregados seriam desprotegidas e ficariam expostas ao ataque dos decompositores. Um “*feedback*” positivo processar-se-ia, pois a MOS é importante para a estabilidade destas estruturas (Figura 1).

6. Sistemas de uso e MOS

Os diferentes sistemas de uso do solo podem causar alterações na dinâmica da MOS, alterando os estoques de carbono e suas funções no sistema solo. Vários trabalhos vêm ressaltando que a conversão de vegetações nativas tropicais em áreas de produção agrícola pode causar drásticas reduções nos teores de MOS ou de algumas de suas frações, devido a perdas por erosão, alterações no suprimento de resíduos (quantitativas e qualitativas) e ao aumento na taxa de decomposição (Feller & Beare, 1997; Silva et al., 1994; Hernani et al., 2002a, 2002b; Roscoe & Machado 2002; Mielniczuk et al. 2003; Bayer, 2004).

Em um trabalho clássico realizado no Oeste do Estado da Bahia, Silva et al. (1994) analisaram 220 amostras de lavoura de soja contínua, sob **sistema de plantio convencional**, com até cinco anos de cultivo (Figura 4). Os solos foram divididos em três grupos com textura contrastante: Neossolos Quartzarênicos (< 15 % de argila); Latossolos Vermelho-Amarelos de textura média (15 a 30% de argila); e Latossolos Vermelho-Amarelos argilosos (> 30% de argila). Em cinco anos de cultivo os teores de MOS caíram 73, 68 e 45%, respectivamente, para os solos arenosos, textura média e argilosos. Este trabalho alerta para as possibilidades de perdas de carbono em solos de Cerrado, quando são combinados baixo aporte de resíduos (com elevada taxa de decomposição) e sistemas de manejo com revolvimento do solo.

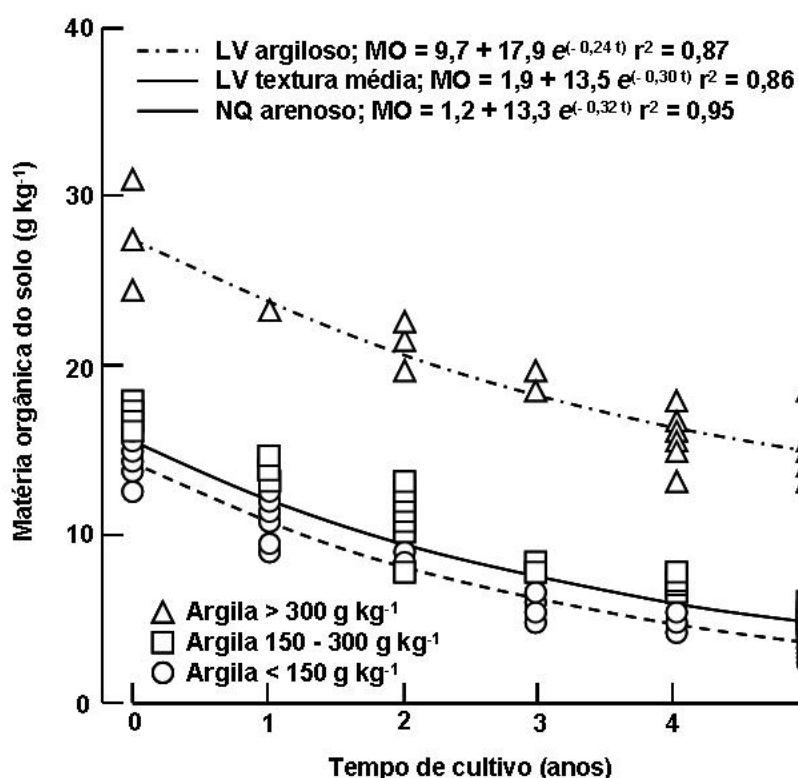


Figura 4. Teores de matéria orgânica do solo em função do tempo de cultivo de solos com diferentes texturas, no Oeste do Estado da Bahia (Silva et al., 1994).

Os **sistemas convencionais de cultivo**, nos quais são realizadas arações e gradagens, são os que provocam maiores impactos na MOS, por promoverem alterações na temperatura, umidade e aeração, rompimento de agregados, aumento no grau de fracionamento e incorporação dos resíduos vegetais e diminuição da cobertura do solo (Bayer & Mielniczuk, 1999). Contudo, nem sempre são registradas perdas de matéria orgânica mesmo em solos cultivados por muitos anos sob sistemas convencionais. Freitas et al. (2000), em um Latossolo Vermelho distrófico, não observaram reduções nos teores de MOS após 25 anos de cultivo convencional de hortaliças, arroz, milho e feijão. Da mesma forma, Roscoe & Buurman (2003), em áreas previamente cobertas por cerrado *stricto sensu*, em um Latossolo Vermelho distrófico argiloso, não registraram perdas nos estoques de carbono orgânico total após 30 anos de cultivo de milho e feijão em sucessão, sob irrigação. Conforme descrito anteriormente, muitos latossolos de Cerrado têm elevados teores de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, o que confere alta

estabilidade à MOS (Oades et al., 1989). Solos argilosos, com elevados teores destes minerais, têm mostrado grande capacidade de proteção da MOS, que concentra-se na fração argila ($< 2 \mu\text{m}$), na forma de complexos organo-minerais. Geralmente, 90% ou mais o C orgânico total do solo encontra-se nesta fração em latossolos argilosos (Roscoe & Machado, 2002).

Vale ressaltar, no entanto, que, em muitas situações, mesmo não sendo detectadas perdas acentuadas de C orgânico total, mudanças significativas podem ocorrer em algumas de suas frações, comprometendo o desempenho de suas funções no ambiente (Roscoe & Machado, 2002). Isso ocorre porque a precisão dos métodos de determinação de carbono e a sua própria variabilidade a campo podem mascarar mudanças acentuadas em frações mais dinâmicas, como a matéria orgânica transitória e a biomassa (Figura 1), mas que representam somente proporções inferiores a 10% do total da MOS. No mesmo estudo relatado anteriormente, Roscoe & Buurman (2003), embora não tenham registrado perdas de MOS total em 30 anos de cultivo, observaram significativas reduções na fração leve livre (densidade $1,7 \text{ g cm}^3$) da MOS. Outros estudos mostraram que o sistema de plantio convencional reduz significativamente a biomassa microbiana e a atividade enzimática do solo, mesmo não havendo mudança no C orgânico total (Roscoe et al., 2000c; Mercante et al., 2000). A redução de frações mais ativas da MOS, como a fração leve livre e o C na biomassa microbiana, podem afetar os diversos processos de ordenação do solo (Figura 1). A manutenção da produção de compostos transitórios, como os polissacarídeos, é fundamental para a manutenção da agregação (Golchin et al., 1997), sendo necessário um fluxo constante destes compostos, uma vez que degradam-se rapidamente no solo (Stevenson & Cole, 1999).

As evidências indicam que sistemas convencionais, mesmo com rotações de culturas que garantam elevadas taxas de entrada de resíduos, podem não ser adequado para manter os teores e as funções da MOS, principalmente em solos de textura média e arenosos.

Por outro lado, **sistemas conservacionistas**, como o plantio direto, podem gerar benefícios adicionais, por reduzir as taxas de decomposição da MOS, garantindo um fluxo contínuo de matéria e energia no solo. Não revolvendo o solo, o sistema plantio direto (SPD) mantém os resíduos na superfície, sendo gradativamente incorporado ao solo pela atividade da macrofauna e favorecendo a manutenção e até o acúmulo de C (Bayer & Mielniczuk, 1999). Resck & Silva (1995) compararam a taxa de decomposição da MOS sob diferentes sistemas de manejo em Planaltina – DF. Os autores observaram taxas de perda do C orgânico de 0,005 a 1,6% ao ano, em sistemas convencionais, envolvendo escarificador, arado de disco e de aiveca. Em sistema plantio direto, os autores observaram taxas positivas de acúmulo de C orgânico, entre 0,001 e 0,002 % ao ano. A meia vida do carbono orgânico nos sistemas de manejo foi de 5 a 12 anos para os sistemas convencionais e de 34 a 61 anos para o sistema plantio direto. Cardoso (2005) obtiveram reduções significativas na taxa de decomposição de resíduos de plantas de cobertura, quando os mesmos foram deixados na superfície do solo e não incorporados (Tabela 7).

Os resultados de pesquisa, no entanto, não são conclusivos quanto ao acúmulo de C em sistema plantio direto. Alguns estudos relatam incrementos nos teores de MOS (Corazza et al., 1999; Bayer et al., 2004; Oliveira et al., 2004), enquanto outros trabalhos não mostraram diferenças significativas em relação ao sistema natural ou ao plantio convencional (Freita et al., 2000; Roscoe & Buurman, 2003). As diferenças nos resultados podem ser atribuídas às condições específicas de cada sistema (tipo de solo e rotação/sucessão de culturas). Além disso, como discutido anteriormente, os trabalhos

de Freitas et al. (2000) e Roscoe & Buurman (2003) foram realizados em solos com elevado teor de argila e de óxidos, o que confere uma grande estabilidade à maior parte da MOS, que encontra-se em complexos organo-minerais.

Mesmo não alterando os teores totais de C, o sistema plantio direto pode alterar frações ou reservatórios funcionais da MOS. Roscoe et al. (2000c) avaliaram, em um Latossolo Vermelho distrófico muito argiloso, o efeito do sistema de preparo do solo no teor de MOS, atividade da enzima urease, teores de nitrogênio na biomassa, recuperação do N-uréia aplicado e produtividade de milho. Os autores observaram que, embora não houvesse diferença no teor de matéria orgânica entre os tratamentos, o SPD apresentou os maiores valores para os demais parâmetros avaliados, quando comparado a dois sistemas convencionais. A atividade da urease correlacionou-se positivamente com a produção de matéria seca total ($r = 0,71$; $P < 0,01$) e produção de grãos de milho ($r = 0,65$; $P < 0,05$). As produtividades máximas de milho, estimadas por modelos quadráticos, foram maiores para o SPD (6177 kg ha^{-1}) do que para os sistemas convencionais ($4640\text{-}5045 \text{ kg ha}^{-1}$). Além disso, as maiores produtividades foram obtidas com doses menores de N no SPD (147 kg ha^{-1}), comparativamente aos sistemas convencionais ($156\text{-}168 \text{ kg ha}^{-1}$).

Como pode ser observado, os sistemas conservacionistas tendem a reduzir a taxa de decomposição da MOS, o que garantiria uma maior permanência do carbono no ambiente. A prática do não revolvimento do solo, associada a rotação de culturas de alto rendimento de matéria seca, com mais de um cultivo por ano, podem garantir grandes aportes de resíduos e uma menor taxa de decomposição dos mesmos, o que geraria o acúmulo de C no solo. Mierniczuk et al. (2003) ressaltam, no entanto, que o nitrogênio representa fator limitante para o acúmulo de C no solo. Evidências para tal fato vem sendo publicadas para solos de região sub-tropical (Lovato et al, 2004; Sisti et al., 2004), mas faltam informações para as condições de Cerrado.

As **pastagens cultivadas** geralmente promovem a manutenção e o acúmulo de MOS, em condições de Cerrado. As grandes produções de resíduos (Tabelas 5 e 6), associadas ao não distúrbio do solo, favorecem o processo de acúmulo de MOS. Silva et al. (2004) estudaram o acúmulo de carbono em pastagens sob diferentes tipos de manejo, em solos de Cerrado, mostrando taxas de acúmulo variando de negativas ($-0,87 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de C) a altamente positivas ($3 \text{ t ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de C). Segundo os autores, pastagens bem manejadas, com adubação de manutenção e consórcio com leguminosas, favorecem o acúmulo de C no solo, enquanto pastagens degradadas e superpastejadas tendem a perder carbono. A combinação de ciclos de culturas anuais com pastagens, integração lavoura-pecuária, têm se mostrado como uma excelente opção para a utilização de solos de Cerrado, garantindo grandes aportes de resíduo e elevada taxa de acúmulo de MOS (Vilela et al. 2003).

7. Considerações Finais:

O aporte de resíduos é fator fundamental no balanço dos teores de carbono no solo. Os dados sistematizados no presente trabalho sugerem que os cerrados nativos apresentam, na maioria das vezes, aportes de C inferiores aos de uma pastagem ou de um sistema bem manejado de produção de grão, fibra ou energia. Entretanto, as taxas de decomposição dos resíduos orgânicos de pastagens e culturas anuais são bem maiores que as dos materiais de Cerrado. Quando a estratégia de manejo não abrange medidas que visam a redução das taxas de decomposição dos resíduos (como, por exemplo, o sistema plantio direto), geralmente não ocorre acúmulo de MOS, podendo haver perdas significativas.

Em geral, não há uma tendência de variações muito grandes nos estoques de carbono em solos de Cerrado, principalmente nos argilosos. Esta ausência de variações pode ser explicada pelo acúmulo relativo da MOS nas frações mais recalcitrantes (complexos organo-minerais) e pela forte proteção que os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio exercem sobre a mesma. Apesar disso, o fluxo de matéria orgânica transitória é fundamental para o adequado funcionamento do solo, uma vez que são responsáveis por importantes propriedades físicas, químicas e biológicas do sistema. O manejo adequado dos sistemas de produção e dos resíduos deve focar mais no estímulo ao desempenho adequado das funções da MOS, do que propriamente no acúmulo de carbono nesses ambientes.

Vale ressaltar ainda que, embora pastagens ou sistemas de rotação de culturas possam proporcionar um fluxo de C interessante no solo, as propriedades emergentes do processo de ordenação biológica estão operando a milhares de anos nos ambientes de Cerrado nativo. O distúrbio provocado pela conversão de cerrados em sistemas manejados não pode ser compensado em poucos anos de um manejo adequado. Um novo equilíbrio tendera a se estabelecer, certamente diferente daquele dos ambientes de vegetação nativa, o importante é buscar sistemas que promovam o menor distúrbio possível e um elevado fluxo de carbono no solo.

8. Referências Bibliográficas

ABDALA, G.C.; CALDAS, L.S. HARIDASAN, M.; EITEN, G. Above and belowground organic matter and root:shoot ratio in a Cerrado in Central Brazil. *Brazilian Journal of Ecology*, 2: 11-23, 1998.

ADÁMOLI, J.; MACEDO, J.; AZEVEDO, L.G.; MADEIRA NETO, J. Caracterização da região dos Cerrados. In: Goedert, W.J. (Ed.) *Solos dos Cerrados: tecnologias e estratégias de manejo*. EMBRAPA-CPAC, Nobel, 1985.

ADDISCOTT, T.M. Entropy and sustainability. *European journal of Soil Science*, 46: 161 – 168, 1995.

ADUAN, R.E. Respiração de solos e ciclagem de carbono em cerrado nativo e pastagem no Brasil Central. Universidade de Brasília, 2003. (Tese de Doutorado)

BALDOCK, J.A.; OADES, J.M.; WATERS, A.G.; PENG, X.; VASSALLO, A.M. & WILSON, M.A. Aspects of the chemical structure of soil organic materials as revealed by solid-state ¹³C NMR spectroscopy. *Biogeochem.*, 16: 1-42. 1992.
Boddey et al. (2001)

BAYER, C. Manejando os solos agrícolas para alta qualidade em ambientes tropicais e subtropicais. *Anais da Fertbio2004*, Lages-SC, 2004.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39: 677-683, 2004.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G.A.; CAMARGO, F.A.O. (Ed.). *Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais*. Porto Alegre: Genesis, 1999. p. 9-26.

BODDEY, R.M.; ALVES, B.J.R.; OLIVEIRA, O.C.; URQUIAGA, S. Potencial para acumulação e seqüestro de carbono em pastagens de brachiaria. In: LIMA, M.A.; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 213 - 229

BROSSARD, M.; LOPES ASSAD, M.L.; CHAPUIS, L.; BARCELLOS, A.O. Estoques de carbono em solos sob diferentes fitofisionomias de Cerrados. In: LEITE, L.L.; SATO, C.H. (org.) Contribuição ao conhecimento ecológico do Cerrado. Brasília: UnB, 1997. p. 272-277.

CARVALHO, A. M. Uso de plantas condicionadoras com incorporação e sem incorporação no solo: Composição química e decomposição dos resíduos vegetais; disponibilidade de fósforo e emissão de gases. Universidade de Brasília, 2005. (Tese de Doutorado).

CARVALHO, M.A.C.; ATHAYDE, M.L.F.; SORATTO, R.P.; ALVES, M.C.; SÁ, M.E. Aduabação verde e sistemas de manejo do solo na produtividade do algodoeiro. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 39 (12): 1205-1211, 2004.

CASTRO, E.A.; KAUFFMANN, J.B. Ecosystem structure in Brazilian Cerrado: a vegetation gradient of aboveground biomass, root biomass and consumption by fire. Journal of Tropical Ecology, 14: 263-283, 1998.

CHRISTENSEN, B.T. Organic matter in soil – structure, function and turnover. DIAS Report No. 30 Plant Production, Tjele, 2000. p. 95

CONSTANTINO, E. Influência da macrofauna na dinâmica de nutrientes do folheto em decomposição em cerrado *stricto sensu*. Universidade de Brasília, 1988. (Dissertação de Mestrado)

CORAZZA, E J; SILVA, J E D; 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. Revista Brasileira da Ciência do Solo, v.23, p. 425-432, 1999.

COUTINHO, L.M. Ecological effects of fire in Brazilian Cerrado. In: HUNTLEY, B.J. & WALKER, B.H.(Eds.) Ecology of tropical savannas. Ecological Studies 42, New York: Springer-Verlag. P. 273-291, 1982.

FALLOON, P.D.; SMITH, P. Modeling refractory soil organic matter. Biology and Fertility of Soils, v.30, p. 388-398, 2000.

FELLER, C.; BEARE, N. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. Geoderma, Amsterdam, v. 79, p. 69-116, 1997.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da Região Sudeste do Brasil. R. Bras. Ci. Solo, 23: 507-514, 1999.

FREITAS, P.L.; BLANCANEUX, P.; GAVINELLI, E.; LARRE-LARROUY, M.C.; FELLER, C. Nível e natureza do estoque orgânico de latossolos sob diferentes sistemas de uso e manejo. *Pesq. Agropec. Bras.*, 35, 157-170, 2000.

GRACE, J. Carbon cycle. *Encyclopedia of biodiversity*, 1: 609-629, 2001.

GOLCHIN, A.; BALDOCK, J.A.; OADES, J.M. A model linking organic matter decomposition, chemistry, and aggregate dynamics. In: LAL, R.; KIMBLE, J.M.; FOLLETT, R.F. & STEWART, B.A. *Soil processes and the carbon cycle*. Adv. in Soil Sci. Boca Raton, CRC Press. pp. 245-266, 1997.

HERNANI, L.C.; FREITAS, P.L.; DENARDIN, J.E.; KOCHHANN, R.A.; DE-MARIA, I.C.; LANDERS, J.N. Uma resposta conservacionista – o impacto do sistema plantio direto. In: MANZATTO, C.V.; FREITAS JÚNIOR, E.; PERES, J.R.R. *Uso agrícola dos solos brasileiros*, Embrapa: Rio de Janeiro, 2002b. p.151-161.

HERNANI, L.C.; FREITAS, P.L.; PRUSKI, F.F.; MARIA, I.C.; CARTRO FILHO, C.; LANDERS, J.N. A erosão e seu impacto. In: MANZATTO, C.V.; FREITAS JÚNIOR, E.; PERES, J.R.R. *Uso agrícola dos solos brasileiros*, Embrapa: Rio de Janeiro, 2002b. p.47 – 60

KAUFFMAN, J.B.; CUMMINGS, D.L. & WARD, D.E. Relationships of fire, biomass and nutrient dynamics along a vegetation gradient in Brazilian cerrado. *Journal of Ecology*, 82: 519-531, 1994.

LAMAS, F.M.; STAUT, L.A. Espécies vegetais para cobertura de solo no Cerrado de Mato Grosso. Embrapa-CPAO (Comunicado técnico, n. 97), p. 1-4, 2005.

LARDY, L.C.; BROSSARD, M.; LOPES, M.L.; LAURENT, J.Y. Carbon and phosphorus stocks of clayey Ferrasols in Cerrado native and agroecosystems, Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 92: 147-158, 2002.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C. & VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 175-187, 2004.

LUPATINI, G.C.; MACCARI, M.; ZANETTE, S.; PIACENTINI, E.; NEUMANN, M. Avaliação do desempenho agrônômico de híbridos de milho (*Zea mays*, L.) para produção de silagem. *Revista Brasileira de milho e Sorgo*, 3(2): 193-203, 2004.

MERCANTE, F.M.; FABRICIO, A.C.; GUIMARÃES, J.B.R. Biomassa microbiana como parâmetro indicador da qualidade do solo sob diferentes sistemas de manejo. Embrapa-CPAO (Comunicado Técnico, n.27), p.1-5, 2000.

MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F.M.; LOVATO, T.; FERNANDES, F.F.; DEBARBA, L. Manejo de solo e culturas e ua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. *Tópicos em Ciência do Solo*, 3: 209-248, 2003.

MISTRY, J. Fire in the cerrado (savannas) of Brazil: an ecological review. *Progress in Physical Geography*, 22(4), 425-448, 1998.

MISTRY, J. Savannas. *Progress in Physical Geography*. 25(4): 552-559.2001.

OADES, J.M.; GILLMAN, G.; UEHARA, G. Interactions of soil organic matter and variable-charge clays. In: COLEMAN, D.C., OADES, J.M. & UEHARA, G. (Eds.) *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*. NifTAL Project, University of Hawaii Press, Honolulu. pp. 69-95, 1989.

OLIVEIRA, J.B.; JACOMINE, P.K.; CAMARGO, M.N. *Classes gerais de solos do Brasil: Guia auxiliar para seu reconhecimento*. Jaboticabal: FUNEP, 1992. 201 p.

OLIVEIRA, O.C.; OLIVEIRA, I.P.; URQUIAGA, S.; ALVES, B.J.R; BODDEY, R.M. Chemical and biological indicators of decline/degradation of *Brachiaria* pastures in the Brazilian Cerrado. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103(2): 289-300, 2004.

PARTON, W.J.; SCHIMEL D.S.; COLE, C.V.; OJIMA, D.S. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 51:1173-1179, 1987.

PAUSTIAN, K. Modelling soil organic matter dynamics – Global challenges. In: Rees, R.M. Campbell, C.D. & Watson, C.A. (Eds.) *Sustainable Management of Soil Organic Matter*. CAB International, Wallingford-UK. p. 43-53, 2001.

REATTO, A.; CORREIA, J.R.; SPERA, S.T., 1998. Solos do Bioma Cerrado: aspectos pedológicos. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P. (Eds.). *Cerrado: ambiente e flora*. EMBRAPA-CPAC, Planaltina, pp. 47-87.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S.B.; CORRÊA, G.F. *Pedologia: base para distinção de ambientes*. 2ed. Viçosa, NEPUT. 367p, 1997.

RESCK, D.V.S. Sistemas de manejo do solo e balanço de carbono no Cerrado. In: LIMA, M.A.; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. *Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira*. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 231 - 255

RESCK, D.V.S.; VASCONCELLOS, C.A.; VILELA, L.; MACEDO, M.C.M. Impact of conversion of Brazilian Cerrados to cropland and pasture land on soil carbon pool and dynamics. In: LAL, R. KIMBLE, J.M. & STEWART, B.A., eds. *Global climate change and tropical ecosystems*. Adv. Soil Sci., Boca Raton, CRC Press. 2000. p.169-196.

RIBEIRO, J.F; WALTER, B.M.T. Fitofisionomias do Bioma Cerrado. In: SANO, S.M.; ALMEIDA, S.P. (Eds.). *Cerrado: ambiente e flora*. EMBRAPA-CPAC, Planaltina, pp. 89-168.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. *Soil Tillage & Research*, 70: 107-119, 2003.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VAN LAGEN, B.; VELTHORST, E.J. Transformations in occluded light fraction organic matter in a clayey Oxisol: Evidences from ^{13}C -CPMAS NMR and $\delta^{13}\text{C}$ signature. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28: 811-818, 2004.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E.J. Disruption of soil aggregates by varied amounts of ultrasonic energy in fractionation of organic matter of a clay Latosol: carbon, nitrogen, and $\delta^{13}\text{C}$ distribution in particle-size fractions. *European Journal of Soil Science*, 51: 445-454, 2000a.

ROSCOE, R., BUURMAN, P., VELTHORST, E.J. & PEREIRA, J.A.A. Effects of fire on soil organic matter in a “cerrado sensu-stricto” from Southeast Brazil as revealed by changes in $\delta^{13}\text{C}$. *Geoderma*, 95, 141-160, 2000b.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E.J.; VASCONCELLOS, C.A. Soil organic matter dynamics in density and particle size fractions as revealed by the $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ isotopic ratio in a Cerrado's Oxisol. *Geoderma*, 104: 185-202, 2001.

ROSCOE, R.; VASCONCELLOS, C.A.; FURTINI-NETO, A.E.; GUEDES, G.A.A.; FERNANDES, L.A. Urease activity and its relation to soil organic matter, microbial biomass nitrogen and urea-nitrogen assimilation by maize in a Brazilian Oxisol under no-tillage and tillage systems. *Biology and Fertility of Soils*, 32: 52-59, 2000c.

ROSCOE, R. & MACHADO, P. L. O. A. Fracionamento físico do solo em estudos de matéria orgânica. Dourados, Embrapa Agropecuária Oeste, 2002. 86p.

SILVA, J.E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D.V.S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 18: 541-547, 1994.

SILVA, J.E.; RESCK, D.V.S.; CORAZZA, E.J.; VIVALDI, L. Carbon storage in clayey Oxisol cultivated pastures in the Cerrado region, Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 103: 357-363, 2004.

SISTI, C.P.J.; SANTOS, H.P.; KOHHANN, R.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Changes in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil and Tillage Research*, 76: 39-58, 2004.

SCHOLES, R.J.; HALL, D.O. The carbon budget of tropical savannas, woodlands, and grasslands. In: Breymeyer, A.L.; Hall, D.O.; Melillo, J.M.; Agren, G.I. *Global Challenge: Effects on coniferous forests and grasslands*. SCOPE 56 – Scientific Committee on Problems of the Environment, 1996.

SCHULTEN, H.R. & LEINWEBER, P. 2000. New insights into organic-mineral particles: composition, properties and molecular structure. *Biol. Fert. Soils*, 30: 399-432.

STEVENSON, F.J.; COLE, M.A. Cycles of soils: carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients. 2.ed. New York, Wiley. 427p, 1999.

TOGNON, A.A., DEMATTÊ, J.L.I. AND DEMATTÊ, J.A.M., Teor e distribuição da matéria orgânica em Latossolos das regiões da Floresta Amazônica e dos Cerrados do Brasil Central. Scientific Agriculture (Piracicaba), 55(3): 343-354, 1998.

VILELA, L; MACEDO, M.C.M.; MARTHA-JÚNIOR, G.B.; KLUTHCOUSKI, J. Benefícios da integração lavoura-pecuária. In: KLUTHCOUSKI, J.; STONA, L.F.; AIDAR, H. (Eds.) Integração lavoura-pecuária. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão, 2003. p. 144 – 170.

WATSON, R. T.; NOBLE, I. R.; BOLIN, B.; RAVINDRANATH, N. H.; VERRARDO, D. J.; DOKKEN, D. J. **Land use, land-use change, and forestry**: a special report of the IPCC. Cambridge: IPCC: Cambridge University Press, 2000. 377 p.